Berislav Jurković
Zlatko Smolčić

KOLEKTORSKI STROJEVI

ŠKOLSKA KNJIGA – ZAGREB

Urednik
DR ŽELIMIR MATUTINOVIĆ

Recenzenti
PROF. DR TEODOR JAKIMOV
PROF. DR MESUD IBRAHIMPAŠIĆ

Lektor
A. ČESKO, PROF.

Objavljivanje ovog sveučilišnog udžbenika odobrilo je Predsjedništvo Skupštine Sveučilišta u Zagrebu rješenjem broj 01-1074/1-84. od 26. rujna 1984.

Nacionalna i sveučilišna biblioteka, Zagreb
Katalogizacija na izvoru:

621.313.2(075.8)

JURKOVIĆ, Berislav
Kolektorski strojevi / Berislav Jurković, Zlatko Smolčić. – Zagreb : Školska knjiga, 1986. – XII, 730 str. : ilustr. ; 24 cm. – (Udžbenici Sveučilišta u Zagrebu = Manualia Universitatis studiorum Zagrabiensis)

Nakl. 2000 primj. – Bibliografija: str. 698–700 – Kazalo oznaka.

Tisak: Štamparski zavod »Ognjen Prica«, Karlovac

Prof. dr Berislav Jurković
Prof. dr Zlatko Smolčić

KOLEKTORSKI STROJEVI

ŠKOLSKA KNJIGA ZAGREB, 1986

PREDGOVOR

Nastava iz predmeta električni strojevi i srodni kolegiji na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu okupila je u Zavodu za elektrostrojarstvo tog fakulteta grupu stručnjaka s nastavnim iskustvom u toj domeni, koji su i u praksi upoznali probleme razvoja, projektiranja, gradnje i primjene tih strojeva. Kako bi se udovoljilo potrebi studenata za udžbenicima na našem jeziku, a ujedno želji stručnjaka u praksi na području elektrostrojarstva, automatizacije, energetike i ostalih grana primjene električnih strojeva za odgovarajućom literaturom, dogovoreno je izdavanje serije potrebnih sveučilišnih udžbenika. Ta bi serija trebalo da održava današnje stanje teorije, gradnje i korištenja električnih strojeva u opsegu primjerenome za studij, ali i za osvježavanje znanja, upoznavanje razvoja i kao poticaj za daljnji rad u praksi. Ova knjiga, jedna u nizu najavljenih, pokušava ispuniti taj zadatak ponajprije u pitanjima teorije, gradnje i upotrebe električnih kolektorskih strojeva.

Knjiga »Kolektorski strojevi«, ovako kako je napisana, daje skup informacija o osnovnoj fizikalnoj slici, teoriji i ponašanju istosmjernih i izmjeničnih kolektorskih strojeva, pretežno u statičkim pogonskim stanjima, i osnovna znanja o projektiranju, konstruiranju i eksploatacijskim pitanjima. Od velikog broja vrsta specijalnih kolektorskih strojeva obrađene su vrste primjerene današnjem stanju tehnike. Tehnološka pitanja, regulacijska svojstva te pitanja izvora energije obrađena su onoliko koliko je potrebno za ispravno razumijevanje ponašanja kolektorskih strojeva u praksi. Udžbenički karakter knjige u osnovi je odredio izbor i opseg materije, način izlaganja, primjenu matematičkog aparata, pretpostavljena predznanja itd. U tom je smislu udžbenik dobrim dijelom prilagođen nastavnom planu Elektrotehničkog fakulteta za stjecanje zvanja diplomiranog inženjera elektrostrojarstva i automatizacije (VII stupanj). Taj dio udžbenika otisnut je većim slovima. No u nekim dublje obrađenim dijelovima, posebno kad je riječ o složenijim teorijskim pitanjima, poslužit će i studentima na odgovarajućim postdiplomskim studijima. Ti dijelovi, kao i dijelovi posebno zanimljivi za stručnjake u praksi, otisnuti su sitnijim slovima.

Fizikalne veličine, i u tekstu i na slikama, otisnute su kurzivom, a jednako tako i faktori odnosno konstante koje označuju odnose među veličinama, dok su kratice jedinica i matematičke oznake tiskane uspravnim slovima. Vektori i simbolički vektori označeni su točkom ili crticom iznad slova gdje god to pridonosi boljem razumijevanju izlaganja.

Smatrali smo da knjiga postaje preglednija otisne li se na svakoj stranici redni broj (npr. 3.6. ili 6.1) potpoglavlja uz njegov skraćeni naziv. Tako taj broj postaje šifra i sastavni dio svake oznake slike, formule ili zadatka na toj stranici, pa se uz njih i ne piše, već se navodi samo broj unutar potpoglavlja. Pri citiranju u istom potpoglavlju navodi se samo taj broj. No pri pozivanju na sliku, formulu ili zadatak nekog drugog potpoglavlja navodi se njegova šifra (npr. »vidi sl. 9.2.1«, ili »prema relaciji (11.1 – 10)).

Na kraju svakog poglavlja dodano je posebno potpoglavlje sa zadacima i njihovim rješenjima. Dok su za određeni broj jednostavnijih zadataka u rješenjima dani samo rezultati, za opsežnije zadatke prikazan je (djelomično) i tok rješavanja. Na jednostavnijim zadacima može čitalac provjeriti koliko je shvatio i usvojio pojedini detalj iz izlaganja. Složeniji zadaci predstavljaju manje tehničke probleme kakvi nastaju u praksi, odakle su dobrim dijelom i preuzeti. Za njih je tipično da prilikom rješavanja zahtijevaju određeno, konkretno donošenje odluka (kojom metodom pristupiti rješavanju, koju točnost rezultata smatrati zadovoljavajućom, koliko zanemariti sporedne utjecaje, itd.). Takvo odlučivanje zahtijeva određeno iskustvo. Smatrali smo da treba uputiti čitaoca (studenta) kako valja odlučivati, i to na stvarnim primjerima, jer je sastavni dio namjene ove knjige.

Željeli bismo, na kraju, zahvaliti recenzentima, prof. Mesudu Ibrahimpašiću i prof. dru Todoru Jakimovu, redovnim profesorima elektrotehničkih fakulteta u Sarajevu i Skopju, na uloženom trudu pri čitanju rukopisa i na korisnim sugestijama. Također zahvaljujemo Sveučilištu u Zagrebu, Republičkoj zajednici za znanstveni rad SR Hrvatske i Poslovnoj zajednici izdavača i knjižara SR Hrvatske, koji su potpomogli izdavanje ovog udžbenika, kao i Izdavačkoj radnoj organizaciji »Školska knjiga« na njezinu sudjelovanju.

Zagreb, 1985. *Autori*

SADRŽAJ

1. UVOD 1

1.1. Povijesni razvoj istosmjernih strojeva i njihova perspektiva 1
1.2. Izvedba istosmjernog stroja 4

2. OSNOVNA FIZIKALNA SLIKA 11

2.1. Osnovni princip djelovanja istosmjernog stroja 11
2.2. Razmatranje posljedica osnovne fizikalne slike 16
2.3. Zadaci i problemi 21
2.3.1. Zadaci 21
2.3.2. Rješenja 22

3. NAMOTI ISTOSMJERNIH STROJEVA 24

3.1. Izvedbe namota. Osnovni pojmovi 24
3.1.1. Načelno o simetričnosti namota 31
3.2. Petljasti namoti 32
3.2.1. Jednovojni nekrižani petljasti namoti 32
3.2.2. Jednovojni križni petljasti namoti 35
3.2.3. Dvovojni petljasti namoti 37
3.2.4. Spojke izjednačenja 41
3.2.5. Stepeničasti namoti 45
3.3. Valoviti namoti 48
3.3.1. Valoviti križani namot 49
3.3.2. Valoviti nekrižani namot 51
3.3.3. Paralelne grane valovitih namota 52
3.3.4. Spojke izjednačenja valovitih namota 54
3.3.5. Stepeničasti valoviti namoti 54
3.3.6. Izvedivost valovitih namota 57
3.4. Opća teorija bubnjastih namota 63
3.5. Neki posebni namoti 66
3.5.1. Manjkavi namoti 66
3.5.2. Jednoslojni namoti 67
3.5.3. Žablji namot 68
3.6. Položaj četkica. Otpor armature 69
3.7. Ostali namoti istosmjernog stroja 71
3.8. Zadaci i problemi 71
3.8.1. Zadaci 71
3.8.2. Rješenja 73

4. TEORIJA ISTOSMJERNIH STROJEVA 91

4.1. Induciranje napona 91
4.2. Stvaranje okretnog momenta 97
4.3. Reakcija armature 98
4.3.1. Gubitak induciranog napona zbog reakcije armature 101

4.3.2. Povećanje gubitaka u željezu zbog reakcije armature 105
4.3.3. Pomak neutralne zone zbog reakcije armature 106
4.3.4. Porast napona među lamelama zbog reakcije armature 107
4.3.5. Pomak četkica 108
4.3.6. Kompaundni namot 110
4.3.7. Kompenzacijski namot 111
4.3.8. Pomoćni polovi 113
4.3.9. Odnosi između induciranog napona i napona na stezaljkama 117
4.4. Osnove komutacije 118
4.4.1. Klasična teorija komutacije 121
4.4.2. Komutacija i namot 131
4.5. Komutacija u statičkom stanju stroja 135
4.5.1. Napon samoindukcije 135
4.5.2. Magnetski krug pomoćnih polova 148
4.5.3. Prostorna raspodjela napona e_s i e_{pp} 154
4.5.3.1. Prostorna raspodjela napona samoindukcije 155
4.5.3.2. Prostorna raspodjela napona pomoćnog pola 166
4.5.3.3. Nekompenzirani napon prostorne raspodjele 168
4.6. Energetska teorija komutacije 170
4.6.1. Osnove energetske teorije komutacije 170
4.6.1.1. Pravocrtna komutacija 172
4.6.1.2. Nepravocrtna komutacija 173
4.6.2. Usporedba energetske i klasične teorije komutacije 176
4.6.3. Kriteriji energetske teorije komutacije 177
4.7. Zadaci i problemi 179
4.7.1. Zadaci 179
4.7.2. Rješenja 187

5. SKLOP ZA KOMUTACIJU 218

5.1. Kolektor 218
5.2. Četkice 232
5.2.1. Pad napona 234
5.2.2. Koeficijent trenja 241
5.2.3. Trošenje dijelova komutacijskog sklopa 244
5.2.3.1. Trošenje i potrošnja četkica 245
5.2.3.2. Trošenje kolektora 251
5.2.4. Gubici na kontaktu četkice i kolektora 253
5.2.5. Izvedba četkica 255
5.3. Držači četkica 260
5.3.1. Izvedbe držača četkica 260
5.3.2. Ugradnja držača četkica 265
5.4. Naprezanja kolektora 270
5.4.1. Termičko naprezanje kolektora 270
5.4.2. Potencijalna naprezanja na kolektoru 271
5.4.2.1. Kružna vatra na kolektoru 272
5.4.2.2. Kriteriji potencijalne stabilnosti kolektora 277
5.4.2.3. Potencijalno stanje na kolektoru 278
5.5. Održavanje sklopa za komutaciju 287
5.5.1. Kolektor 288
5.5.2. Držači četkica 290

5.5.3. Četkice ... 293
5.5.4. Rashladni zrak ... 295
5.5.5. Simptomi, uzroci i popravak kvara ... 296
5.6. Zadaci i problemi ... 296
5.6.1. Zadaci ... 296
5.6.2. Rješenja ... 298

6. VRSTE ISTOSMJERNIH STROJEVA ... 310
6.1. Uzbuda. Vrste uzbuđivanja ... 310
6.2. Osnovne vrste istosmjernih strojeva ... 312
6.2.1. Nezavisno uzbuđeni (nezavisni) generator ... 312
6.2.2. Poredno uzbuđeni (poredni) generator ... 314
6.2.3. Serijski uzbuđeni (serijski) generator ... 319
6.2.4. Složeno uzbuđeni (kompaundirani) generator ... 321
6.2.5. Paralelni rad istosmjernih generatora ... 323
6.2.6. Nezavisno uzbuđeni (nezavisni) motor ... 327
6.2.7. Poredno uzbuđeni (poredni) motor ... 329
6.2.8. Serijski uzbuđeni (serijski) motor ... 330
6.2.9. Složeno uzbuđeni (kompaundirani) motor ... 332
6.3. Oznake stezaljki, smjer vrtnje i spajanje namota ... 333
6.3.1. Vanjske stezaljke i stezaljke namota ... 333
6.3.2. Smjer vrtnje ... 336
6.3.3. Izvodi svitaka i stezaljke namota ... 336
6.3.4. Stara pravila o označavanju stezaljki ... 340
6.4. »I« – linije istosmjernih strojeva ... 343
6.4.1. Konstrukcija vanjskih karakteristika generatora ... 347
6.4.2. Konstrukcija motorskih karakteristika $n(I)$ ... 351
6.4.3. Analiza općih svojstava »I« – linije ... 352
6.5. Gubici istosmjernog stroja – korisnost ... 354
6.5.1. Gubici istosmjernog stroja – sistematizacija ... 354
6.5.2. Snaga stroja i korisnost ... 356
6.5.3. Proračun pojedinih vrsta gubitaka ... 357
6.5.4. Kritična visina vodiča namota armature ... 363
6.6. Zadaci i problemi ... 364
6.6.1. Zadaci ... 364
6.6.2. Rješenja ... 375

7. PRELAZNA STANJA I UPRAVLJANJE ISTOSMJERNIM STROJEVIMA 416
7.1. Stavljanje u pogon istosmjernih strojeva ... 416
7.1.1. Stavljanje u pogon istosmjernih generatora ... 416
7.1.2. Upuštanje istosmjernih motora ... 417
7.1.3. Promjene opterećenja, prelazi iz motorskoga u generatorsko stanje i obrnuto ... 418
7.2. Razbuđivanje istosmjernog stroja. Osnove prelaznih pojava ... 420
7.2.1. Osnove električkih prelaznih pojava istosmjernih strojeva ... 421
7.3. Podešavanje brzine vrtnje istosmjernog motora ... 423
7.3.1. Podešavanje brzine vrtnje nezavisno (poredno) uzbuđenog motora 424
7.3.2. Podešavanje brzine vrtnje serijski uzbuđenih motora ... 427
7.3.3. Podešavanje brzine vrtnje kompaundiranog motora ... 427
7.3.4. Osnove složenih prelaznih pojava istosmjernih strojeva ... 427

7.3.5. Reverziranje istosmjernih motora ... 428
7.4. Istosmjerni stroj kao pojačalo ... 429
7.4.1. Nezavisno uzbuđeni generator kao pojačalo ... 430
7.4.2. Uzbudnici kao pojačala ... 432
7.4.3. Pojačala sa samouzbudom ... 435
7.5. Komutacija u prelaznom stanju stroja ... 440
7.5.1. Vrtložne struje u magnetskom krugu ... 441
7.5.2. Prelazna stanja ... 443
7.5.3. Komutacija u prelaznom stanju ... 446
7.6. Zadaci i problemi ... 450
7.6.1. Zadaci ... 450
7.6.2. Rješenja ... 451

8. SPECIJALNI ISTOSMJERNI STROJEVI ... 456

8.1. Istosmjerni stroj s permanentnim magnetima ... 456
8.1.1. Teorija istosmjernog stroja s permanentnim magnetima ... 458
8.1.2. Izbor radne točke istosmjernog stroja s permanentnim magnetima 467
8.1.3. Svojstva istosmjernih strojeva s permanentnim magnetima ... 473
8.2. Unipolarni stroj ... 475
8.3. Metadini ... 477
8.3.1. Općenito o metadinima ... 477
8.3.2. Amplidin, sastav i princip djelovanja ... 479
8.4. Specijalni istosmjerni strojevi kao pojačala snage ... 482
8.4.1. Brzina odziva amplidina ... 486
8.4.2. Usporedba amplidina i kaskade ... 493
8.5. Generatori za vagonsku rasvjetu i generatori za svarivanje ... 499
8.5.1. Generatori za vagonsku rasvjetu ... 499
8.5.2. Generatori za svarivanje ... 503
8.5.2.1. Rosenbergov serijski generator za svarivanje ... 505
8.5.2.2. Svarni generator s rasipnim polovima ... 506
8.5.2.3. Tropolni svarni generator ... 509
8.5.2.4. Svarni protukompaundirani generatori specijalne izvedbe 511
8.6. Motor s pločastim rotorom ... 513
8.7. Zadaci i problemi ... 514
8.7.1. Zadaci ... 514
8.7.2. Rješenja ... 516

9. GRANIČNE SNAGE ISTOSMJERNIH STROJEVA ... 522

9.1. Granični uvjeti naprezanja za granične snage ... 522
9.1.1. Posebni granični uvjeti za istosmjerne strojeve ... 523
9.2. Današnje granične snage istosmjernih strojeva ... 526
9.2.1. Granične snage za D_{amax} i e_{smax} ... 527
9.2.2. Granična snaga za D_{amax} i dopuštene vrijednosti e_k ... 527
9.2.3. Granična snaga za v_{amax} i dopuštenu vrijednost e_s ... 528
9.2.4. Granična snaga za v_{amax} i dopuštenu vrijednost e_k ... 529
9.3. Upotreba strojeva granične snage ... 531
9.4. Dvovojni namoti za granične snage ... 533
9.4.1. Polusimetrični nestepeničasti dvovojni namot ... 534
9.4.2. Polusimetrični stepeničasti dvovojni namot ... 535
9.4.3. Nesimetrični (potpuno) nestepeničasti dvovojni namot ... 536

9.4.4. Nesimetrični stepeničasti dvovojni namot ... 536
9.4.5. Usporedba varijanti namota za granične snage ... 537
9.5. Posljedice upotrebe dvovojnog namota ... 542
9.6. Perspektive porasta granične snage istosmjernog stroja ... 545
9.7. Perspektive »istosmjernih« strojeva uz primjenu supravodljivosti ... 546
9.8. Zadaci i problemi ... 559
9.8.1. Zadaci ... 559
9.8.2. Rješenja ... 559

10. IZMJENIČNI KOLEKTORSKI STROJEVI ... 562

10.1. Uvod ... 562
10.2. Jednofazni kolektorski motori – općenito ... 563
10.2.1. Inducirani naponi jednofaznoga kolektorskog stroja ... 564
10.2.2. Moment jedofaznoga kolektorskog stroja ... 566
10.2.3. Komutacija jednofaznoga izmjeničnog kolektorskog stroja ... 568
10.3. Jednofazni serijski kolektorski motor ... 570
10.3.1. Komutacija jednofaznoga serijskog kolektorskog motora ... 579
10.4. Univerzalni motor ... 579
10.4.1. Osnovna fizikalna slika ... 580
10.4.2. Neki tehnički parametri ... 582
10.4.3. Točniji prikaz ponašanja univerzalnog motora ... 584
10.4.4. Konstrukcija vektorskog dijagrama ... 588
10.5. Repulzioni motor ... 591
10.6. Trofazni kolektorski strojevi – općenito ... 594
10.6.1. Osnovni pristup i principi djelovanja ... 595
10.6.2. Komutacija trofaznih kolektorskih strojeva ... 598
10.7. Serijski trofazni kolektorski motor ... 599
10.8. Poredni trofazni kolektorski motori ... 606
10.8.1. Osnovna teorija ... 606
10.8.2. Vrste i spojevi trofaznih kolektorskih poredni motora ... 611
10.8.3. Moment motora. Karakteristike ... 615
10.8.4. Komutacija trofaznih poredni kolektorskih motora ... 620
10.8.5. Utjecaj komutacije na snage poredni kolektorskih motora. Osobitosti izvedbe namota za veće snage ... 621
10.9. Zadaci i problemi ... 623
10.9.1. Zadaci ... 623
10.9.2. Rješenja ... 624

11. ISTOSMJERNI MOTORI NAPAJANI VALOVITIM NAPONOM ... 630

11.1. Osnovni pojmovi ... 631
11.2. Moment motora ... 637
11.3. Elektromagnetske pojave pri valovitom napajanju ... 639
11.3.1. Odnosi električnih i magnetskih parametara ... 640
11.3.2. Pulsacijski magnetski permeabilitet ... 642
11.3.3. Magnetski otpori ... 646
11.4. Nezavisno uzbuđen motor ... 652
11.4.1. Uzbudni strujni krug ... 653
11.4.2. Armaturni strujni krug ... 655
11.4.3. Vanjska karakteristika ... 658
11.5. Serijski uzbuđen motor ... 658

11.6. Posljedice u motoru pri valovitom napajanju 664
11.6.1. Potencijalno stanje na kolektoru 664
11.6.2. Nekompenzirani napon svitka u komutaciji 669
11.6.3. Gubici 680
11.6.3.1. Gubici na kolektoru 680
11.6.3.2. Gubici u namotima 681
11.6.3.3. Gubici u magnetskom krugu 682
11.6.4. Korisni moment motora 683
11.7. Zadaci i problemi 684
11.7.1. Zadaci 684
11.7.2. Rješenja 687
Popis literature 698
Indeks oznaka 701

1. UVOD

Kolektorski strojevi čine porodicu električkih strojeva karakteriziranu kolektorom na sekundarnom dijelu stroja. Taj sekundarni dio stroja gotovo je uvijek rotor. Iako u principu nije nemoguće izgraditi kolektor i na statoru, to se zbog praktičkih razloga izuzetno rijetko radi. Nešto češće, u nekim od brojnih varijacija izvedbe kolektorskih strojeva, priključuje se rotor (a s njime i kolektor), kao primar, na izvor napona. Kolektorski strojevi sa svojim brojnim vrstama (varijacijama), znatno brojnijima od strojeva bez kolektora, dijele se na dvije velike grupacije (porodice). Prvu čine strojevi koji se priključuju na istosmjerni izvor energije ili napona, kraće nazvani *istosmjerni strojevi*, a druga obuhvaća strojeve koji se priključuju na izmjenični izvor energije i napona pa se nazivaju *izmjenični kolektorski strojevi*. Istosmjerni su strojevi po nastanku najstarija vrsta električkih strojeva uopće, a izmjenični kolektorski strojevi ubrajaju se u mlađe vrste električkih strojeva. U današnjoj tehničkoj stvarnosti istosmjerni strojevi zauzimaju, po svome ekonomskom značaju i brojnosti tehničkih primjena i rješenja, neusporedivo važnije mjesto od izmjeničnih kolektorskih strojeva.

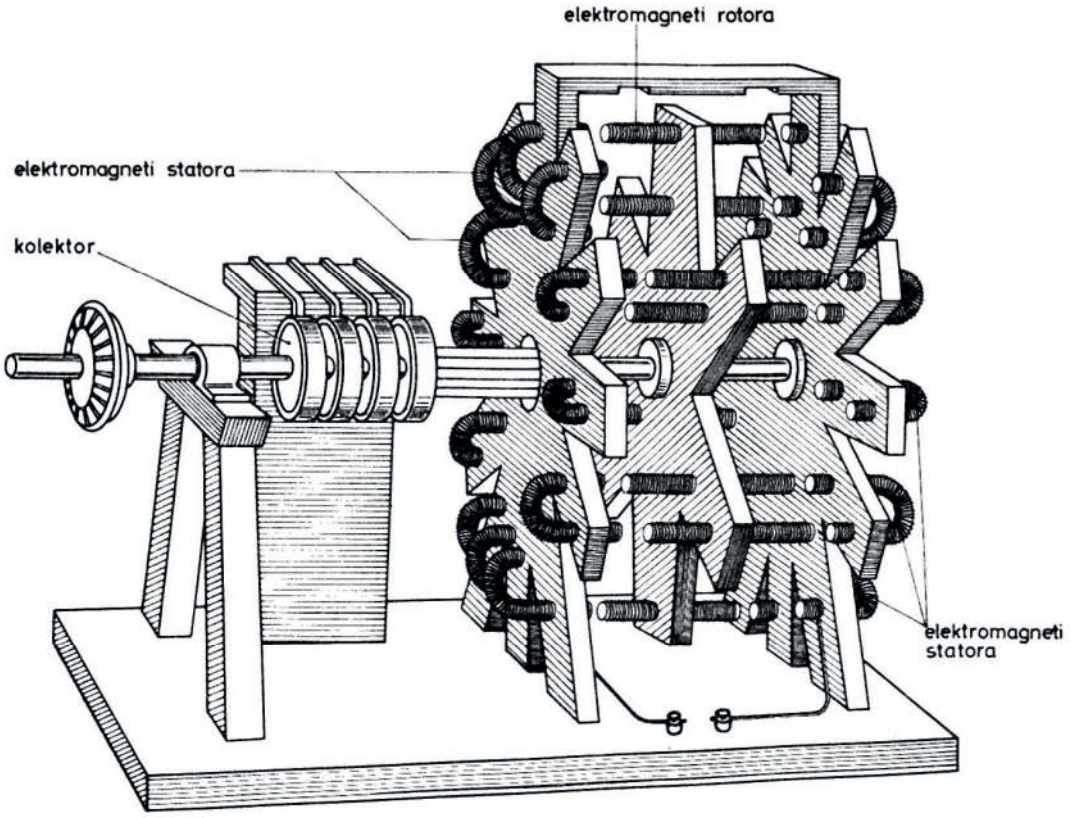
1.1. Povijesni razvoj istosmjernih strojeva i njihova perspektiva

Električki strojevi nastali su tek nakon pojave prvih izvora električne energije. To znači da su se prvo pojavili električki strojevi kojima se koristilo kao motorima, jer su pretvarali električnu energiju u mehanički rad, a tek poslije se oni upotrebljavaju i kao generatori električkog napona, pretvarajući mehaničku energiju u električnu. Među prvim elektrotehničkim napravama bili su galvanski članci i njihove baterije, koje su bile i prvi izvori električne energije, što je omogućilo da se pronađe i upotrijebi električki motor. Prvi električki motor sa stvarnom primjenom u praksi konstruirao je Jacobi u tadašnjem Petrogradu (danas Lenjingrad). On je svojim motorom, napajanim iz galvanske baterije (princip prikazan na sl. 1), tjerao čamac s 14 osoba.

Taj se motor zasnivao na principu privlačne sile među elektromagnetima. Na drvenoj konstrukciji statora i rotora bili su učvršćeni elektromagneti. Kad su elektromagneti rotora u svom kretanju došli do suprotnih polova elektromagneta statora, uslijedila je na rotoru promjena smjera struje i elektromagnete rotora privukli su idući elektromagneti statora, pa se rotor tako stalno vrtio započetim smislom. Na statoru su elektromagneti bili napajani istosmjernom strujom, a rotorski su se elektromagneti morali napajati izmjeničnom strujom. Istosmjernu struju za napajanje rotora u izmjeničnu mijenjao je kolektor na osovini rotora, koji je na tom stroju bio još vrlo primitivan. Već na primjeru toga prvog istosmjernog stroja vidi se da je on zapravo u biti izmjenični stroj, a da ga tek kolektor osposobljava za pogon istosmjernom strujom.

Werner Siemens je 1856. otkrićem rotora u obliku dvostrukog slova T pronašao rješenje smanjenja zračnog raspora, a 1866. je, svojim značajnim

otkrićem, dinamoelektričkim principom, omogućio pogon istosmjernoga električkog generatora bez permanentnih magneta, odnosno bez pomoćnih baterija za uzbudu. Jednostavno je namot uzbude priključio paralelno namotu rotora, a za početno uzbuđivanje koristio se naponom remanencije. Prvi dinamostroj koji ima rotor u obliku dvostrukog T prikazan je na slici 2.



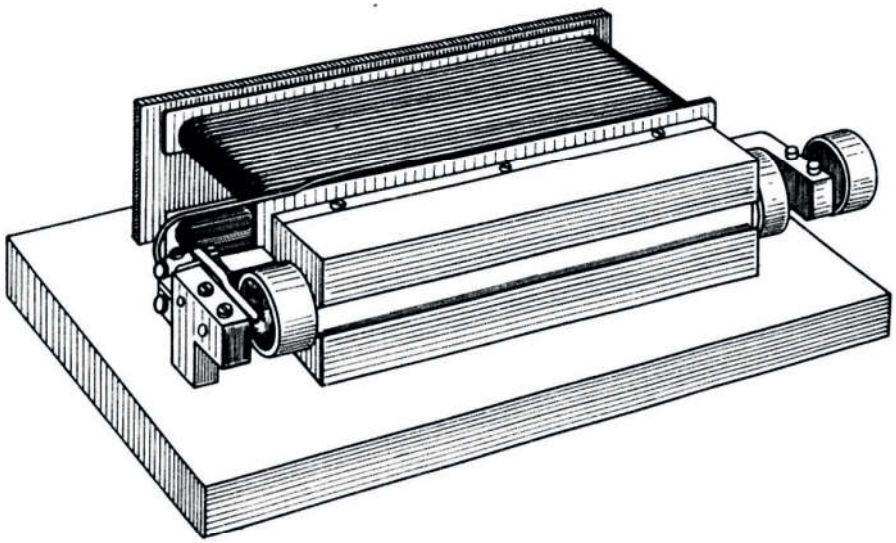
Sl. 1. Jacobijev istosmjerni motor

Elektrotehničar Gramme iz Belgije je 1873. izložio na Bečkom velesajmu generator za 25 V i 400 A s kolektorom od mnogo lamela, za razliku od dotadašnjih kolektora sa samo dvije lamele, preko kojih se dotad dobivala samo pulsirajuća istosmjerna struja. Na slici 3. shematski je prikaz Grammeova dinamostroja iz 1878.

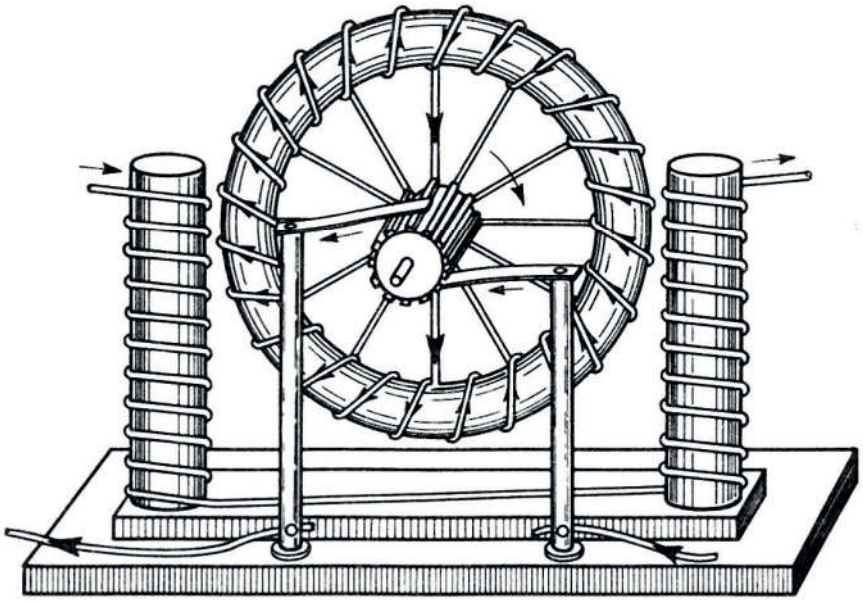
Hefner-Alteneek poboljšao je iskorištenje namota pronalaskom cilindrične armature. Tom izvedbom bili su pronađeni svi glavni elementi današnjega istosmjernog stroja.

Industrija je prihvatila gradnju tih strojeva, no bilo je još mnogo nedostataka. Problem komutacije nije bio riješen, pa su četkice na kolektoru vrlo jako iskrile. Strojevi su bili teški i glomazni.

Do kraja prošlog stoljeća istosmjerni je stroj uglavnom dobio današnji oblik, što se poklapalo i s općim stanjem elektrifikacije, tj. s jedinim u ono vrijeme poznatim istosmjernim energetskim sistemom. Osnovna je slabost tog sistema u relativno vrlo malome prostornom dometu mreže uz relativno male snage



Sl. 2. Prvi dinamostroj W. Siemensa u obliku dvostrukog slova T



Sl. 3. Grammeov dinamostroj iz 1878. godine

prijenosa električne energije. No pod sam kraj prošlog stoljeća počeo se, zaslugom mnogih izumitelja, od kojih je najvažniji bio Nikola Tesla, razvijati sistem izmjenične struje. Osnovna prednost tog sistema je neusporedivo (cca 1 000 puta) veći prostorni domet mreže i mogućnost prijenosa velikih snaga. Razvoj je tad išao u pravcu potiskivanja istosmjernih mreža i njihove zamjene izmjeničnima. Tokom vremena izmjenične su mreže sasvim potisnule istosmjerne, i njih više nema kao općih energetskih sistema, već su samo lokalne i ograničene u nekim dijelovima industrije i prometa. Osim prednosti prijenosa električne energije na daljinu donio je izmjenični sistem i mogućnost upotrebe jeftinih izmjeničnih, prije svega asinhronih motora kojih su, uz ostalo, osnovne prednosti, u tome što nemaju

kolektora. Razvojem izmjeničnog sistema koji je u prva četiri desetljeća sasvim potisnuo istosmjerni, izgledalo je da će istosmjerni strojevi praktički nestati iz upotrebe, jer je njihova jedina prednost pred izmjeničnima neusporedivo veći opseg podešavanja brzine vrtnje, u to doba razvoja tehnike ona je bila značajna samo za relativno mali broj tehničkih primjena. Međutim, nakon drugoga svjetskog rata, naglim razvojem tehnike počelo je novo razdoblje automacije. Automacija zahtijeva od elektromotornih pogona mogućnost fine i brze regulacije brzine vrtnje. Tome neusporedivo bolje odgovaraju istosmjerni motori, a u mnogim okolnostima oni su jedino moguće rješenje. I zato možemo govoriti da je tad za istosmjerne električke strojeve nastupila nova era — ne istosmjernih sistema, ne istosmjernih generatora, već istosmjernih elektromotornih pogona.

Istodobno s razvojem automacije razvija se i tehnika poluvodiča, koja danas preobražava neka područja elektrotehnike, a stvorila je i novo područje – energetsku elektroniku. Poluvodiči omogućuju ispravljanje izmjeničnih struja u istosmjernu s izvanredno visokim faktorom korisnosti, a osim toga jeftino i brzo upravljanje istosmjernim naponom kojim napajamo istosmjerni motor. No, u principu na jednak način, poluvodiči pretvaraju i izmjeničnu mrežu u izvor promjenljive frekvencije kojom se može, u određenom opsegu, regulirati i brzina vrtnje izmjeničnih strojeva. Danas se ne da s velikom sigurnošću predvidjeti daljnji razvoj cijelog tog područja, ali izgleda da u većini tehničkih primjena neće biti potisnut sistem istosmjernog motora napajanoga iz izmjenične mreže preko upravljačkih poluvodičkih naprava, pogotovo ne za one pogone koji zahtijevaju pogonske karakteristike istosmjernog motora. Uzevši u cijelosti, istosmjerni su strojevi tim cijelim razvojem opet dobili na važnosti, pa je potrebno da im se u studiju električkih strojeva posveti posebna pažnja.

1.2. Izvedba istosmjernog stroja

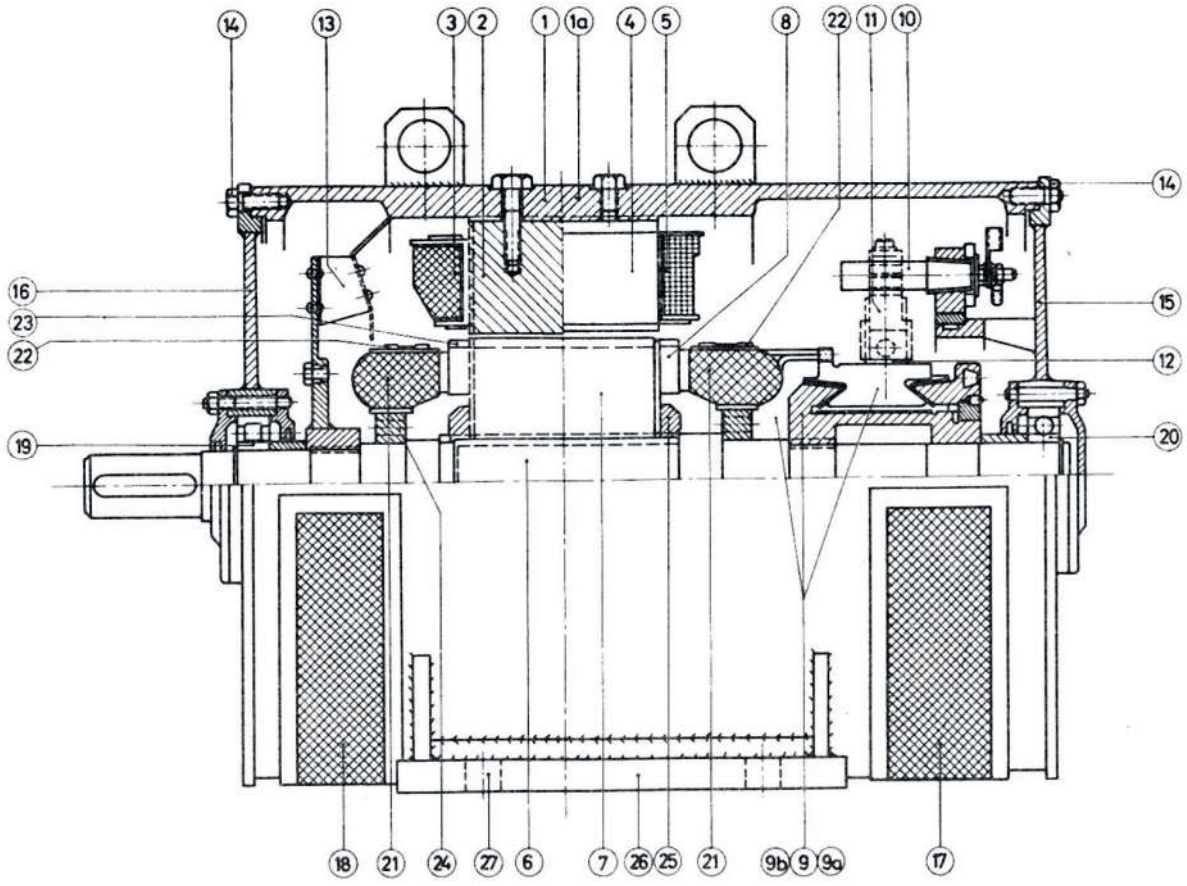
Primar istosmjernog stroja (polovi s uzbudnim namotom) smješten je uvijek na statoru. Na rotoru se nalazi sekundar u obliku armaturnog namota, glavnog namota u procesu pretvorbe električne energije u mehaničku, ili obrnuto. Zbog toga je na rotoru redovno i kolektor, uvijek spojen na armaturni namot.

Na slikama 1. i 2. prikazani su normalni presjeci istosmjernog stroja manje snage (cca 6 kW uz brzinu vrtnje od 1 500 okretaja u minuti). Slika 1. predočuje uzdužni presjek, i to u lijevoj polovici kroz glavni, a u desnoj kroz pomoćni pol. Na slici 2. poprečni je presjek statora istog stroja. Kućište statora (1), kojeg su sastavni dijelovi uz jaram statora (1a) i noge stroja (26), izvedeno je kao zavarena konstrukcija (kao na sl. 1. i 2, ali se izvodi i od lijevanog čelika). Na unutrašnjoj strani jarma učvršćeni su glavni polovi (2) s uzbudnim namotima (3) i podložnim limovima (2a), te pomoćni polovi (4) s namotima pomoćnih polova (5) i podložnim limom (4a).

Na osovini rotora (6) učvršćen je rotorski paket limova (7), sastavljen od dinamo-limova, a u utorima je tog paketa namot armature (8) sastavljen od svitaka, kojih su krajevi priključeni na pojedine kolektorske lamele (9). Rotorski paket s pripadnim namotom nazivamo *armatura*. Glave su namota rotora (21),

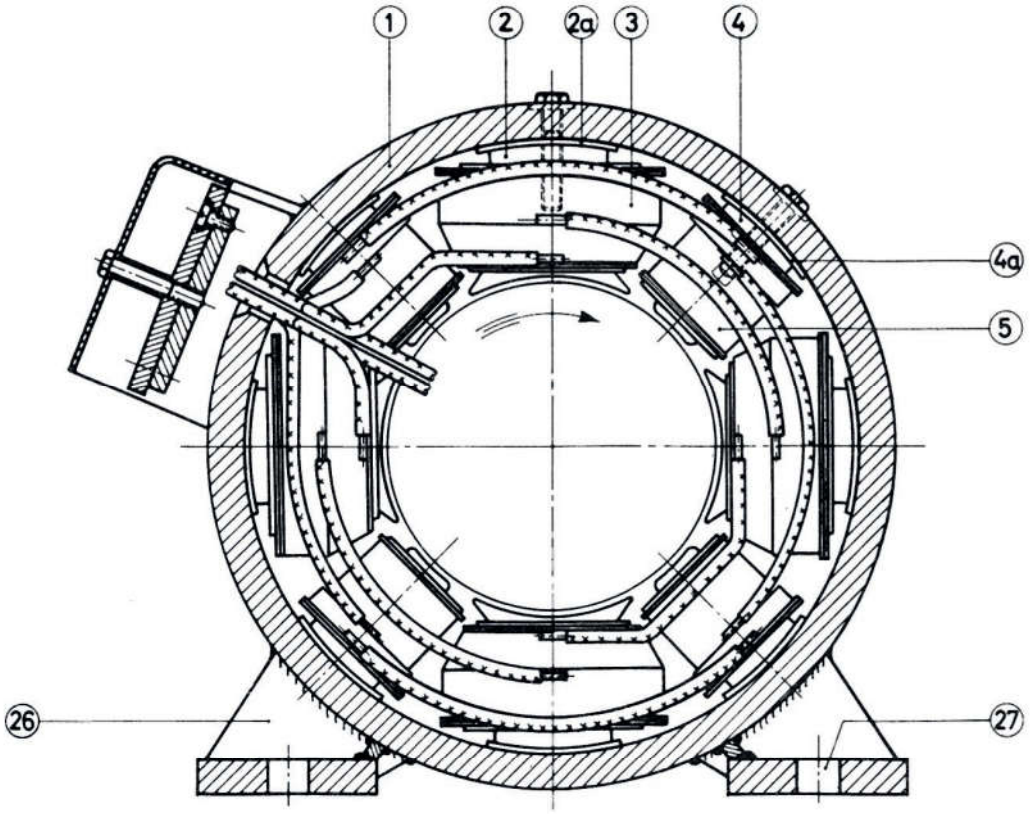
zbog centrifugalnih sila, učvršćene bandažama (22) od nemagnetske čelične žice. Strane svitaka u utorima drže klinovi (23) na vrhu utora ili bandaže mjestimično postavljene na obodu rotora. Glave su namota s donje strane oslonjene na potporne prstene (24). Paket rotora stegnut je tlačnim prstenima (25). U nekim izvedbama potporni su prsteni tako izvedeni da ujedno stežu i paket rotora. Na ležajnom štitu učvršćeni su svornjaci za držače četkica (10), ali su izolirani od ležajnog štita. Na njih su postavljeni držači četkica (11). Četkice (12) kližu po kolektoru i dovode rotorskom namotu istosmjernu struju ili je iz njega odvode. I ventilator (13) učvršćen je na osovinu rotora, te u vrtnji protjeruje strojem rashladni zrak.

Kolektor (9) sastavljen je od pojedinih, međusobno izoliranih lamela. Izolacija među lamelama izrađena je od posebnoga kolektorskog mikanita. Kolektorske lamele izolirane su i od kolektorske glavine (9a), u koju su učvršćene konstrukcijom nazvanom *lastin rep* (9b). Izolacija između kolektorskih lamela i glavine također je od mikanita (tinjca). Ležajni štitovi (15, 16) postavljeni su s obje strane statora na centriranim rubovima i učvršćeni su vijcima (14). Desna strana kućišta statora ima odozdo otvore (17) s mrežicom za ulazak rashladnog zraka, a odozgo sa svake strane po jedan otvor s poklopcem, kroz koji se može obavljati izmjena četkica. Lijeva strana kućišta statora ima samo s donje strane



Sl. 1. Uzdužni presjek manjega istosmjernog stroja sa sastavnim elementima

otvore s mrežicom (18) za izlazak toplog zraka. U oba ležajna štita postavljeni su ležaji (19, 20), u kojima se vrti osovina rotora. Sa strane ležajâ su ležajni poklopci koji ih zaštićuju od ulaska prašine.

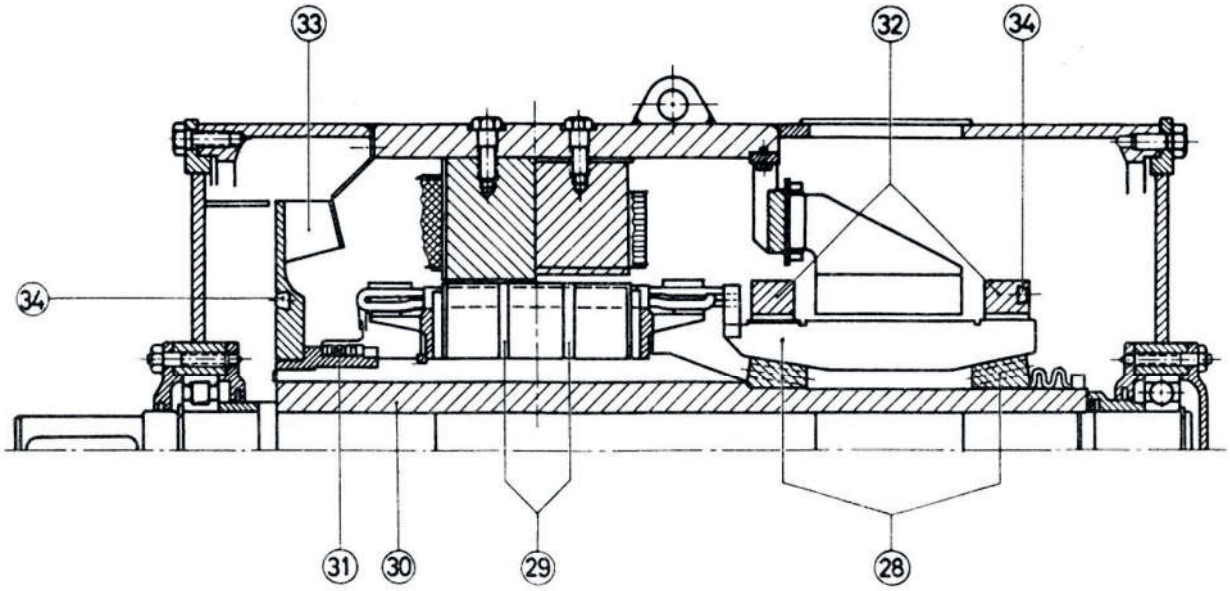


Sl. 2. Poprečni presjek statora manjega istosmjernog stroja iz slike 1.

1 – kućište statora, 1a – jaram statora, 2 – glavni pol, 2a – podložni lim glavnog pola, 3 – namot glavnog pola, 4 – pomoćni pol, 4a – podložni lim pomoćnog pola, 5 – namot pomoćnog pola, 6 – osovina rotora, 7 – rotorski paket limova, 8 – namot armature, 9 – kolektor, 9a – glavina kolektora, 9b – lastin rep, 10 – svornjaci za držače četkica, 11 – držači četkica, 12 – četkice, 13 – ventilator, 14 – vijci za učvršćenje ležajnih štitova, 15, 16 – ležajni štitovi, 17 – otvor za ulazak zraka, 18 – otvor za izlazak zraka, 19, 20 – ležaji, 21 – glave namota, 22 – bandaža namota rotora, 23 – utorski klinovi, 24 – nosač glave namota, 25 – tlačni prsten, 26 – noge stroja, 27 – rupe za pričvrsne vijke

Za strojeve veće snage pri brzinama vrtnje većima od 2 500 min^{-1} opisana izvedba kolektora ne može izdržati centrifugalna naprezanja, pa se kolektor mora mehanički drukčije graditi. Na slici 3. uzdužni je presjek jednoga takvog stroja snage od cca 150 kW uz brzinu vrtnje od 3 000 okretaja na minutu. Na slici se vidi (28) izvedba kolektora nazvana turbokolektor. Taj je naziv nastao zbog toga što su se takvi strojevi prvo počeli upotrebljavati kao uzbudnici sinhronih turbogeneratora u termoelektranama, i još se danas nalaze u mnogim izgrađenim elektranama. Radi boljeg hlađenja rotorski je paket limova na slici 3. razdijeljen rashladnim kanalima (29) u tri dijela. Cijev (30), koja je navučena na osovinu, ima rebra, na kojima leži paket rotora, i naziva se u ovakvoj konstrukciji glavina rotora. Na lijevoj strani rotora su ekvipotencijalne spojke (31), koje, kod većih strojeva, povezuju točke jednakog potencijala rotorskog namota. Zbog velike brzine vrtnje i velikih centrifugalnih sila konstrukcija kolektora (28) izvedena je s

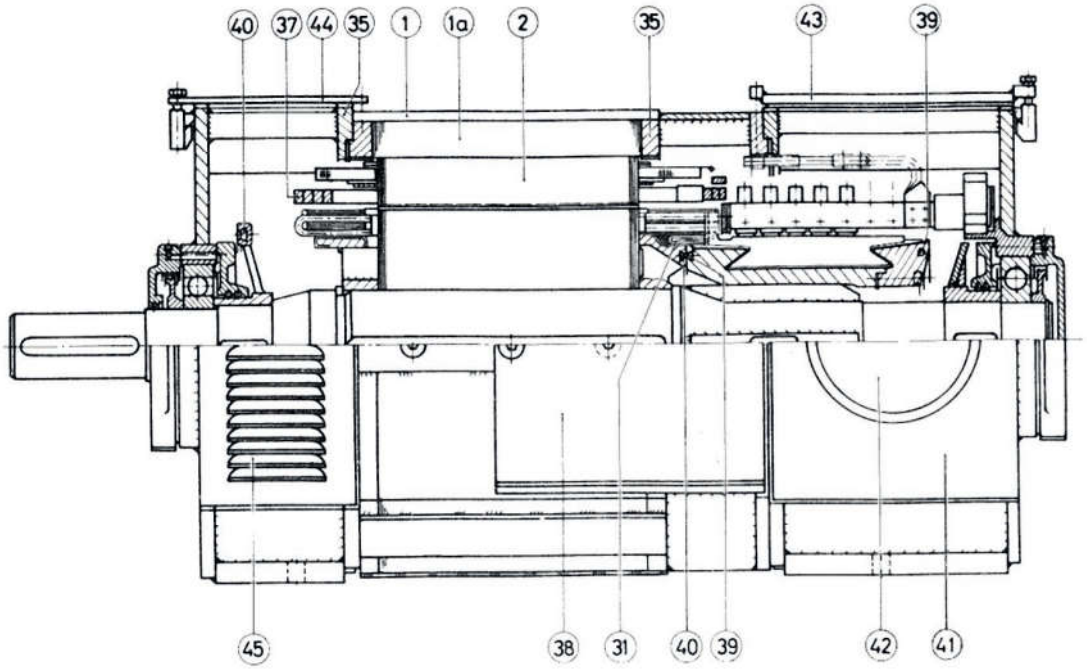
jakim steznim prstenima (32) i bez lastina repa. S desne strane na steznom prstenu kolektora (32), a s lijeve strane na ventilatoru (33), nalaze se utori (34) u koje se ulažu utezi za balansiranje rotora.



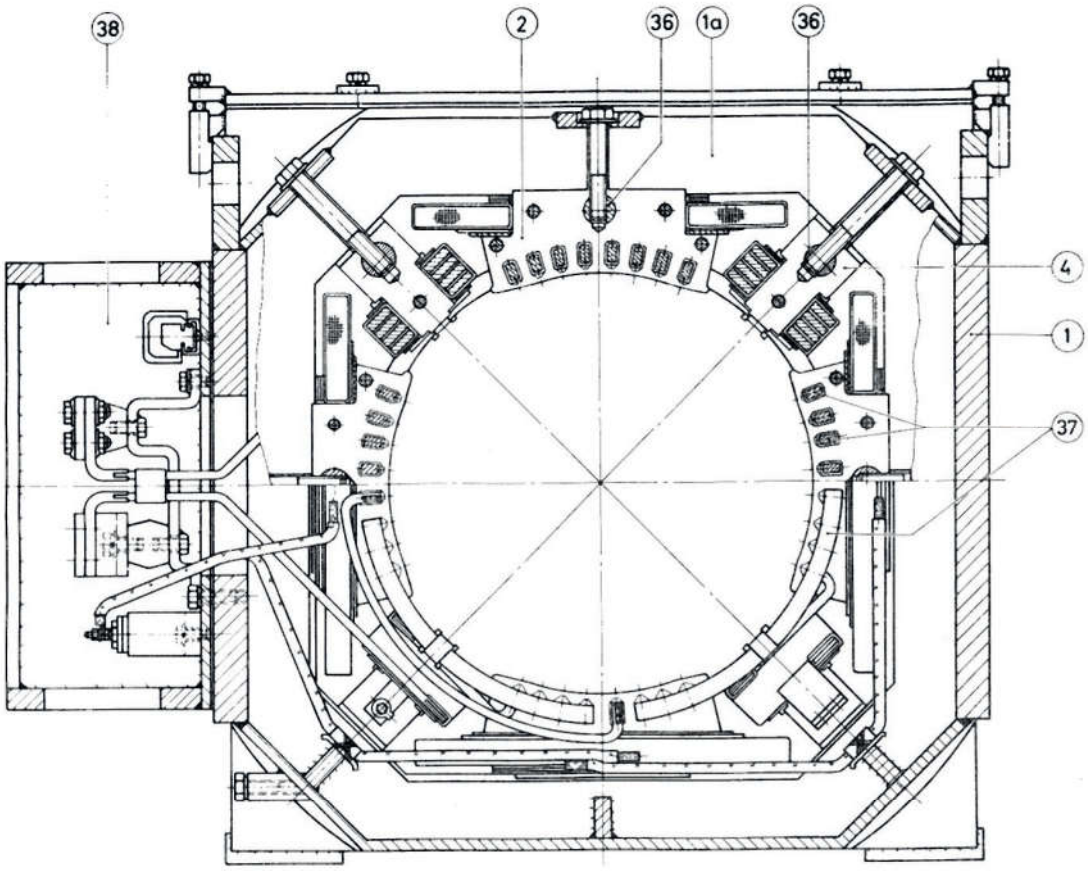
Sl. 3. Uzdužni presjek istosmjernoga brzohodnog stroja srednje snage

28–turbokolektor, 29–rashladni kanali, 30–glavina rotora, 31–ekvipotencijalne spojke, 32–stezni prsteni turbokolektora, 33–ventilator, 34–utori za balansiranje

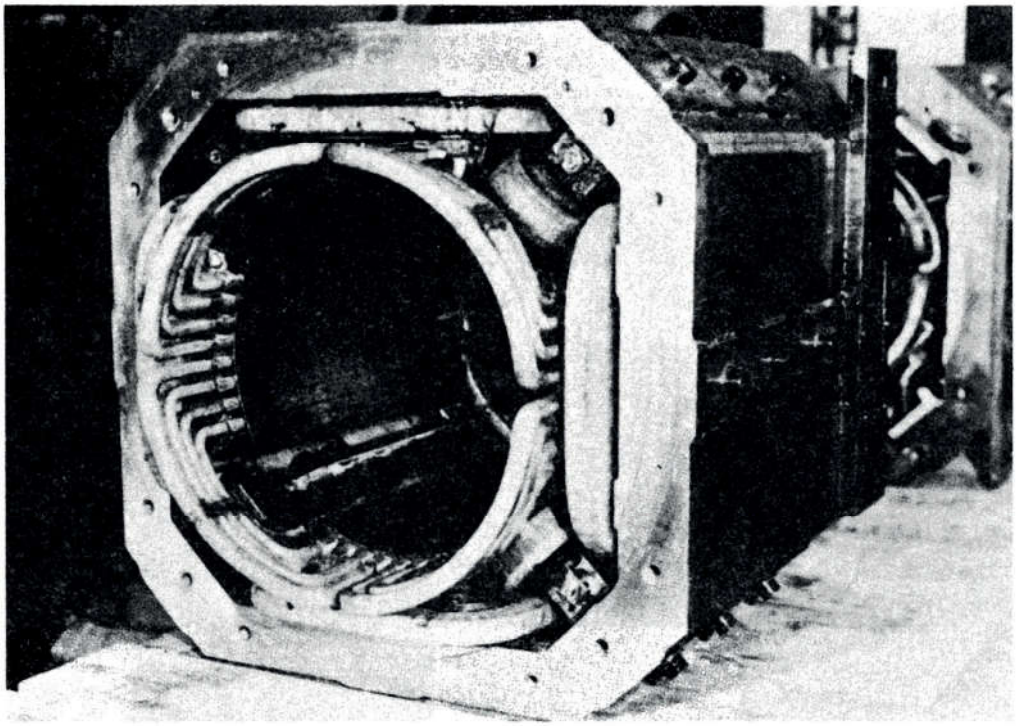
Slike 4. i 5. sadrže uzdužni i poprečni presjek moderne konstrukcije stroja srednjih i većih snaga od cca 150 do 2500 kW, proizvedene u »Radi Končaru«. Mnogokutni oblik statora daje mogućnost boljeg iskorištenja prostora i materijala, posebno u lameliranoj izvedbi cijeloga magnetskog kruga, što omogućuje valovito napajanje motora iz izmjenične mreže djelovanjem ispravljačkog pretvarača. Zbog toga su kućište stroja (1) i jaram statora (1a) različito izvedeni. Kućište (1) je u zavarenoj konstrukciji, a jaram (1a) napravljen je od magnetskih limova stegnutih tlačnim pločama (35) na slici 4. Učvršćenjem lameliranih glavnih polova (2) i pomoćnih polova (4) svornjacima (36) na slici 5, postiže se potrebna mehanička čvrstoća konstrukcije. Kompenzacijski namot (37), izvođenje kojega omogućuje lamelirana konstrukcija glavnih polova, i način njegova spajanja prikazani su na slikama 4. i 5. Na toj su konstrukciji ekvipotencijalne spojke (31) na slici 4. smještene ispod armaturnog namota, čime se smanjuje dužina stroja. Na slici 5. vidi se priključna kutija (38) s priključcima za uzbudni i armaturni namot te razne mjerne i signalne strujne krugove. Balansiranje (uravnoteženje) rotora provodi u dijelovima i za cjelinu. Utore za zasebno balansiranje kolektora (39) i utore za zasebno balansiranje samog paketa limova (40) vide se na slici 4. Balansiranje kompletnog stroja obavlja se na slobodnim utorima za balansiranje (39) i (40). Osim velikog otvora s poklopcem za pristup kolektoru (41) na slici 4. je i mali providni otvor (42) za kontrolu kolektora u pogonu. Otvori za vođenje rashladnog zraka (43), (44) i (45) omogućuju da se stroj hladi na razne načine. Na primjer, zatvaranjem otvora (44) i dovodom zraka na otvor (43) ostvaruje se propuhivanje stroja u



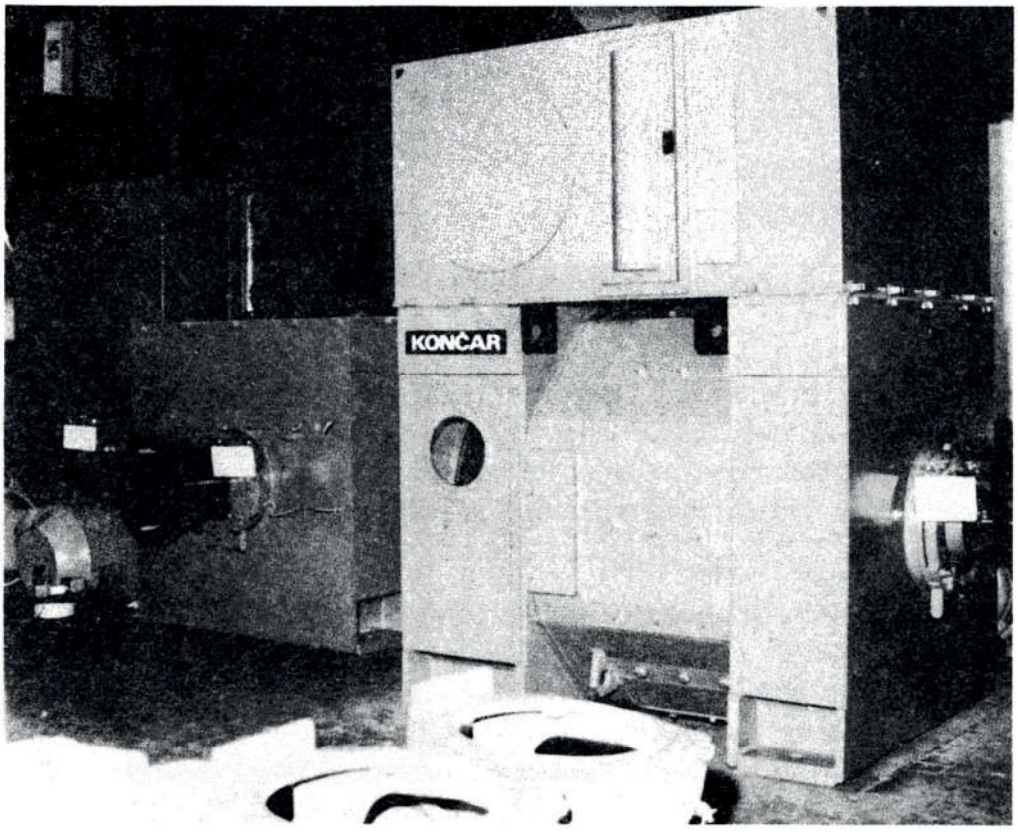
Sl. 4. Uzdužni presjek istosmjernog stroja srednje snage suvremene izvedbe



Sl. 5. Poprečni presjek statora istosmjernog stroja sa slike 4.

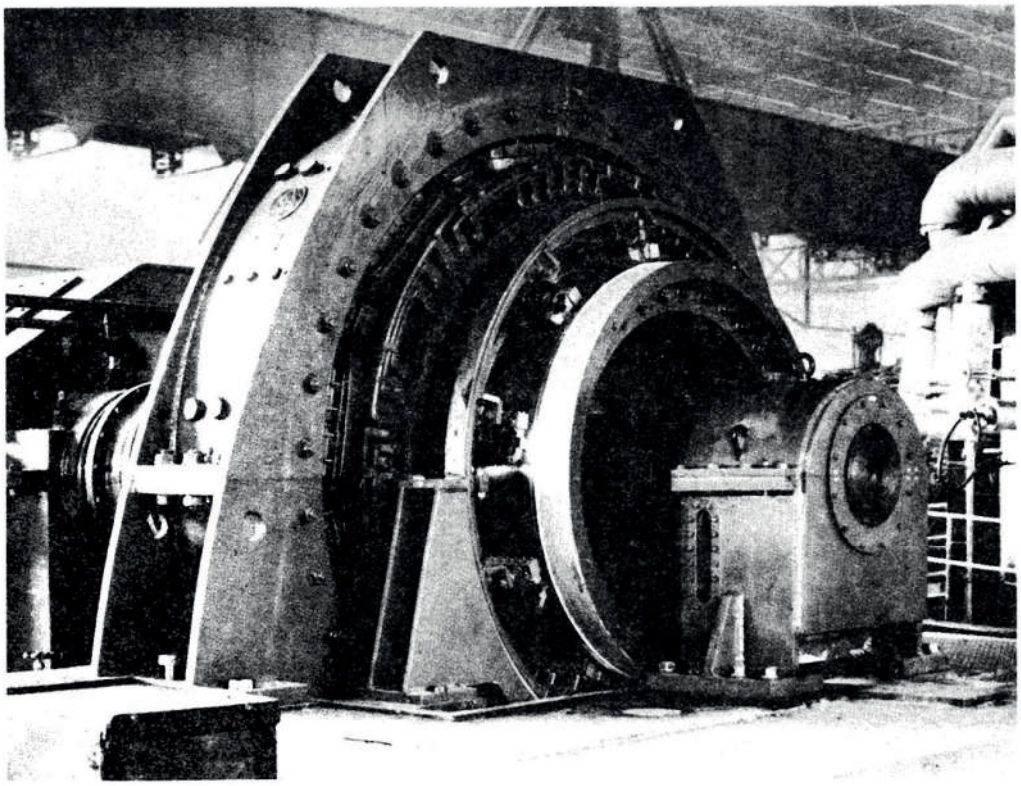


Sl. 6. Slika namotanog statora istosmjernog stroja suvremene izvedbe proizvodnje »Rade Končara«



Sl. 7. Slika kompletnog stroja suvremene izvedbe proizvodnje »Rade Končara«

prostor gdje on radi, kroz otvor (45). Dalje, zatvaranjem otvora (45) mogu otvori (43) i (44) poslužiti za ulazak i izlazak rashladnog zraka izvan radne prostorije ili, u drugoj kombinaciji, kao ulaz i izlaz hladnjaka (izmjenjivači topline zrak-zrak ili zrak-voda). Druga je mogućnost montaža vlastitoga rashladnog ventilatora na mjestu balansnog prstena, pri čemu otvor (45) služi za izlazak, a otvor (43) za ulazak zraka. Opisani stroj u fazi izrade, još bez kućišta, prikazuje fotografija na slici 6, a kompletan je, s rashladnim uređajem (hladnjakom), na slici 7.



Sl. 8. Moderni veliki valjački istosmjerni stroj proizvodnje »Rade Končara«

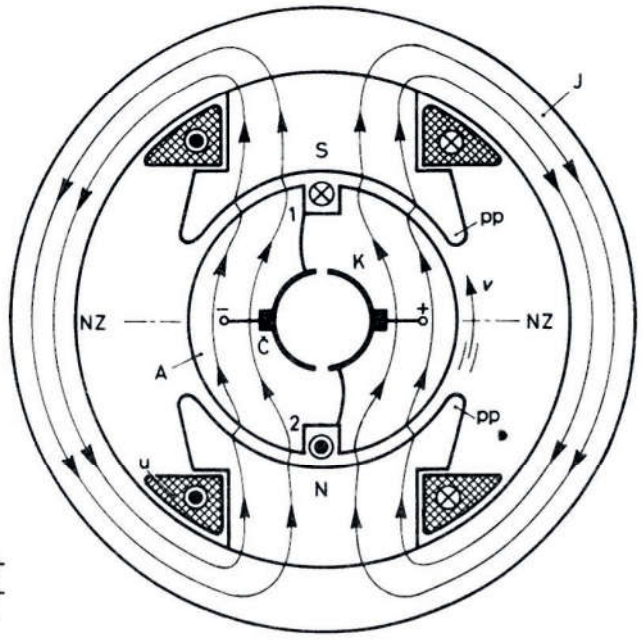
Konstrukcija vrlo velikih strojeva različita je za razne namjene. Jedan primjer prikazuje fotografija na slici 8. To je veliki valjački motor proizvodnje »Rade Končara« s nazivnim momentom od 100 000 Nm, snimljen u fazi montaže, kako bi se dobro vidjeli njegovi detalji i razni dijelovi opisani već za manje strojeve.

2. OSNOVNA FIZIKALNA SLIKA

2.1. Osnovni princip djelovanja istosmjernog stroja

Istosmjerni električki stroj u biti je pretvarač energije. Pretvara li mehaničku energiju u električnu istosmjernog napona, naziva se istosmjerni generator. Pretvara li električnu energiju istosmjernog napona u mehaničku, odnosno u mehanički rad, zove se istosmjerni motor.

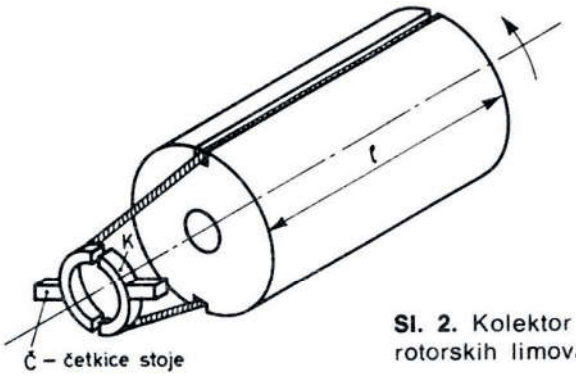
Kao i drugi električki strojevi, istosmjerni stroj ima dijelove konstrukcije sposobne da proizvode i provode relativno velike magnetske tokove i dijelove konstrukcije sposobne da provode relativno velike struje. Dijelovi koji provode magnetske tokove su od željeza, čelika ili dinamo-limova, a vodiči struja su namoti od bakra. Magnetsko polje gotovo redovno uzbuđuju uzbudni namoti (izuzetno permanentni magneti), a *inducirani* se napon inducira u namotu armature, tako da su ovdje, kao i kod ostalih električkih strojeva, zapravo dva električna strujna kruga međusobno ulančena jednim magnetskim tokom.



Sl. 1. Skica presjeka pojednostavnjenoga dvopolnog istosmjernog stroja (oznake odgovaraju generatorskom radu)

Na slici 1. prikazan je presjek potpuno pojednostavnjenoga dvopolnog istosmjernog stroja. Na uzbudnom namotu označenome slovom(u) naznačen je smjer uzbudne struje. Amperzavoji uzbudnog namota uzbuđuju magnetski tok Φ, koji se rasprostire polovima (N, S) s pripadnim polnim papučama (pp), jarmom (J), željezom armature (A) i zračnim rasporom između armature rotora i polnih papuča. Na slici je magnetski tok predočen s nekoliko *silnica* koje slijede spomenuti put. Na armaturi (rotoru) su, radi jednostavnosti, izvedena samo dva dijametralno suprotna utora (1, 2), u koje su uložene odgovarajuće strane jedinog

svitka namota armature. Stvarnome istosmjernom stroju broj utora i svitaka mnogo je veći. I broj svitaka u utoru (zavoja po utoru) gotovo je uvijek veći od jedan. Pojednostavnjenja na slici 1. učinjena su namjerno, radi postupnosti ulaženja u problematiku. Na slikama 1. i 2. krajevi su namota spojeni na kolektor (K), koji u našem primjeru čine dva poluprstena izolirana međusobno i prema masi. Na kolektor naliježu četkice (Č), koje su izvodima spojene na stezaljke namota armature stroja, označene na slici 1. sa + i −. Četkice leže na simetrali među polovima, u *neutralnoj zoni* označenoj s (NZ). Kolektor je mehanički učvršćen na rotor, pa se s njim zajednički vrti, a četkice su mehanički učvršćene na stator, te ostaju stalno nepomične. Kad se rotor vrti, stalno mijenja svoj položaj prema četkicama, pa kažemo da četkice klize po kolektoru. Radi lakše predodžbe na slici 2. aksonometrijski je nacrtan detalj kolektor-armatura sa slike 1, pri čemu armaturom nazivamo namot i željezo rotora. Tu je s l označena dužina željeza – paketa rotorskih limova.



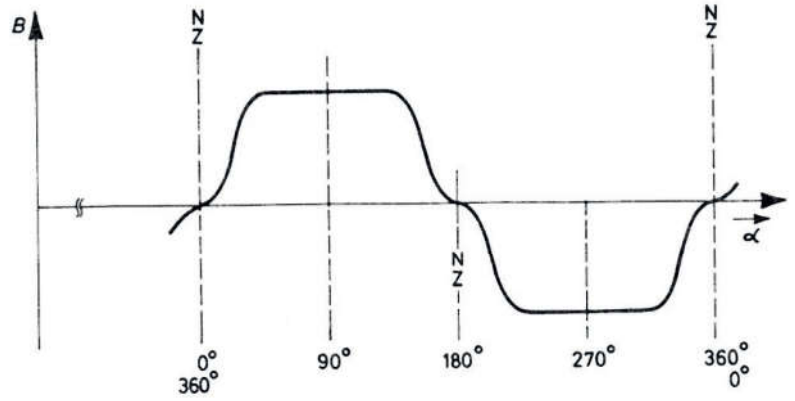
Sl. 2. Kolektor i armatura (svitak i paket rotorskih limova) – crtano aksonometrijski

Razmotri li se magnetsko polje prema slici 1, odmah se uočava da indukcija B u zračnom rasporu tik uz obod rotora neće biti konstantna, nego će se prostorno mijenjati u skladu s promjenom magnetske vodljivosti. Pod polovima, gdje je magnetska vodljivost velika zbog maloga zračnog raspora, relativno je velika i indukcija. U međupolnom prostoru opada magnetska vodljivost zbog povećanoga zračnog raspora (udio zraka prema željezu) na putu kojim se rasprostire magnetsko polje, a u skladu s time opada i indukcija B u rasporu na obodu rotora. Očito je da će se jedan dio magnetskog toka stvorenoga uzbudnim namotom rasprostirati i zrakom, ne ulazeći pri tome u rotor, već će silnice (koje reprezentiraju taj dio magnetskog toka) prelaziti izravno iz polnih papuča i samog pola N u polne papuče i pol S. Taj dio magnetskog toka nazivamo rasipnim magnetskim tokom Φ_s, za razliku od onog dijela magnetskog toka što ulazi u rotor i koji zovemo glavnim magnetskim tokom Φ_{gl}. Od ukupnoga magnetskog toka Φ;

$$\Phi = \Phi_{gl} + \Phi_s \tag{1}$$

samo njegov glavni dio Φ_{gl} posreduje u pretvorbi mehaničke energije u električnu i obrnuto, jer samo on ulančuje namote primara i sekundara (uzbude i armature). Iz toga je lako zaključiti, uzme li se u obzir smjer magnetskog polja i geometrijski oblik stroja, da je u ravnini neutralne zone iznos indukcije B jednak nuli. Prostorni raspored indukcije B u zračnom rasporu tik uz obod rotora prikazan je

na slici 3, gdje smo kružnicu na kojoj promatramo magnetsko polje, uz sam obod rotora, zamislili prostorno razvijenom u ravnini. Rezultat je magnetsko polje nepomično u prostoru. Uz zadane geometrijske odnose određene konstrukcijom stroja i uz određena svojstva materijala, intenzitet tog polja ovisi samo o iznosu uzbude. Za daljnje razmatranje pretpostavimo da je stroj prema slici uzbuđen tolikom uzbudnom strujom da je rezultat baš magnetsko polje na slici 3.

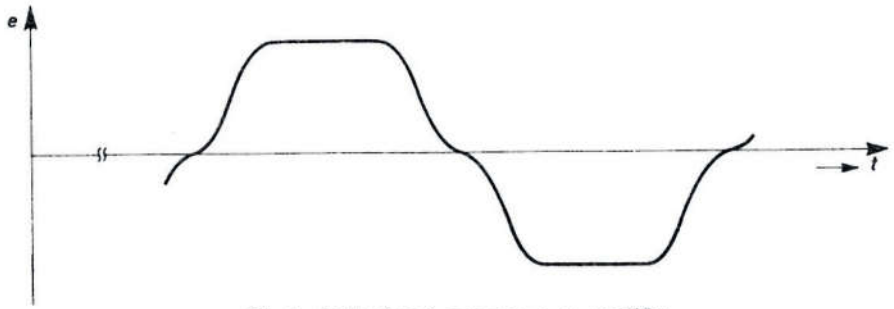


Sl. 3. Raspored indukcije B u zračnom rasporu

Zamislimo da se rotor vrti pod utjecajem nekoga vanjskog pogonskog stroja konstantnom obodnom brzinom v u smjeru strelice na slici 1. Promatrajmo zasad samo jednu stranu svitka, dakle samo jedan štap. Budući da smjer magnetskog polja i promatrani štap međusobno zatvaraju pravi kut, a kutovi vektora brzine v i prema štapu i prema magnetskom polju jednako su tako pravi kutovi, za inducirani će napon vrijediti poznata relacija [L 50]:

$$e = Blv. \tag{2}$$

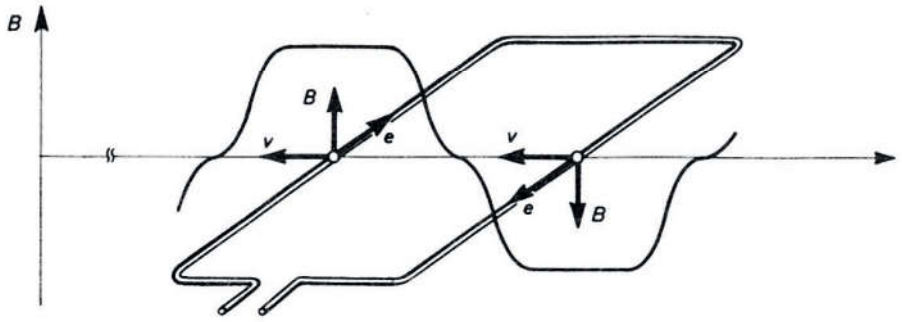
Tu je dužina l (aksijalna dužina željeznog paketa stroja) okomita na ravninu slike 1. Produkt lv je konstantan, pa je inducirani napon proporcionalan indukciji, kako se to vidi na slici 4. U vodičima armaturnog namota istosmjernog stroja inducira se, dakle, izmjenični napon.



Sl. 4. Inducirani napon e u vodiču

Proširimo razmatranje na cijeli svitak, koji se vrti konstantnom obodnom brzinom kao i u prethodnom primjeru. Promatranje provodimo sa strane rotora, tako da naše točke promatranja, tj. strane svitka s kojih promatramo, putuju kroz

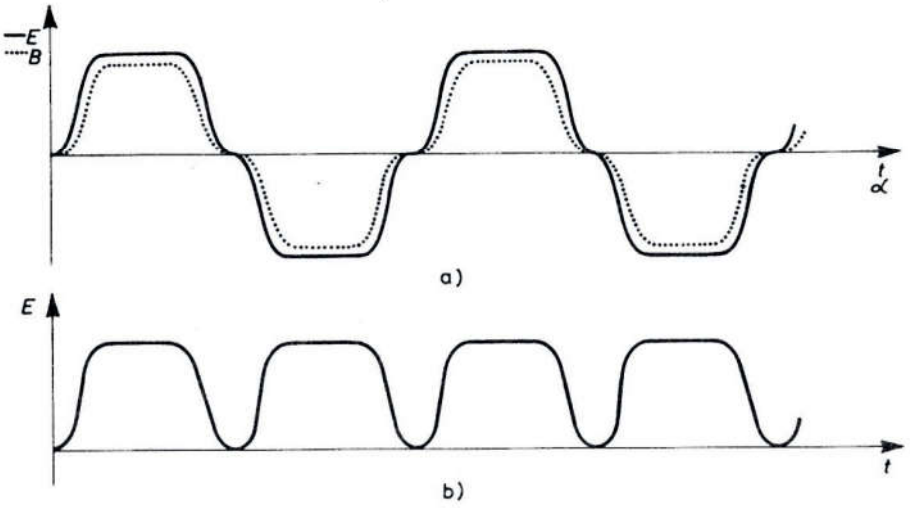
magnetsko polje koje miruje. Stanje je predočeno slikom 5, gdje smo opet razvili sliku magnetskog polja u ravninu i shematski ucrtali svitak. U odlaznom i povratnom štapu induciraju se naponi e, međusobno suprotnog smisla, jer su u magnetskim poljima jednakog iznosa, ali protivnog smjera. No, budući da su štapovi u svitku serijski povezani, to geometrijski zbroj induciranih napona štapova daje inducirani napon svitka dvostruko veći od induciranog napona jednog štapa e. Rezultat superpozicije induciranih napona strana svitaka je inducirani napon svitka, koji je dvostrukog iznosa, a vremenski je istog oblika kao inducirani napon jednog štapa. Prema tome je i inducirani napon svitka izmjeničnog karaktera.



Sl. 5. Induciranje napona u svitku

Učinimo daljnji korak pa cijelu pojavu promotrimo sa strane četkica. Tad točka s koje promatramo stoji jer četkica stoji, a kolektorska lamela klizi po njoj kako se rotor vrti. Dok ispod četkice klizi jedna lamela (poluprsten u našem primjeru), rezultat je našeg razmatranja jednak onome u prethodnom slučaju, jer četkica točno snima stanje koje odgovara položaju one strane svitka koja je povezana s lamelom. Kad svitak dođe u neutralnu zonu, promatrana lamela napušta promatranu četkicu, a nailazi druga lamela, na koju je spojena druga strana svitka. Tad četkica, tokom daljnje vrtnje, snima točno stanje druge strane svitka, koja se, međutim, nalazi u istom polju kroz koje je neposredno prije toga prolazila prva strana svitka. To znači da se ponavlja ista slika induciranog napona u drugoj strani svitka kakva je bila prethodno u prvoj. Tokom vrtnje smjenjuju se neprekidno strane svitka pod četkicom, ali se vremenska slika napona na četkici stalno ponavlja, kako se to vidi na slici 6.b. Na stezaljkama četkica + i − na slici 1. vlada u promatranom slučaju napon istog smjera, ali još uvijek pulsirajući. Priključi li se na te stezaljke otpor, poteći će struja slična oblika kao i napon na četkicama, dakle istog smjera, ali s iznosom određenim ukupnim otporom strujnog kruga. Ta je struja, jednaka kao i napon, izmjeničnog karaktera u svitku armature, a istosmjernog je karaktera na četkicama i u potrošaču. Dakle, sistem kolektor-četkica na prikazani način pretvara izmjenične veličine (napon i struju) u istosmjerne. Način rada istosmjernog stroja koji je upravo opisan je generatorski, pa je, prema tome, u promatranom primjeru istosmjerni stroj generator.

Da shvatimo motorski rad istosmjernog stroja, poslužimo se istim pojednostavnjenim modelom istosmjernog stroja kakav je na slici 1. Pretpostavimo da je



Sl. 6. a) Inducirani napon u svitku i prostorna raspodjela indukcije b) Napon na četkicama

uzbuda ista kao i prije i da rotor potpuno miruje. Prostorni raspored indukcije magnetskog polja uzduž oboda rotora jednak je kao na slici 3. Narinemo li na četkice, tj. na stezaljke + i −, istosmjerni napon odgovarajućeg iznosa, u svitku će armature poteći struja u smjeru obratnome onomu na slici 1. Novonastalu situaciju prikazuje slika 7. Budući da je vodič u polju indukcije B protjecan strujom I, pojavit će se sila F koja ga nastoji izbaciti iz polja. Provede li se razmatranje o smjeru sile F, na sličan način kako je to učinjeno za inducirani napon, dobiva se iznos sile na vodič [L 50]:

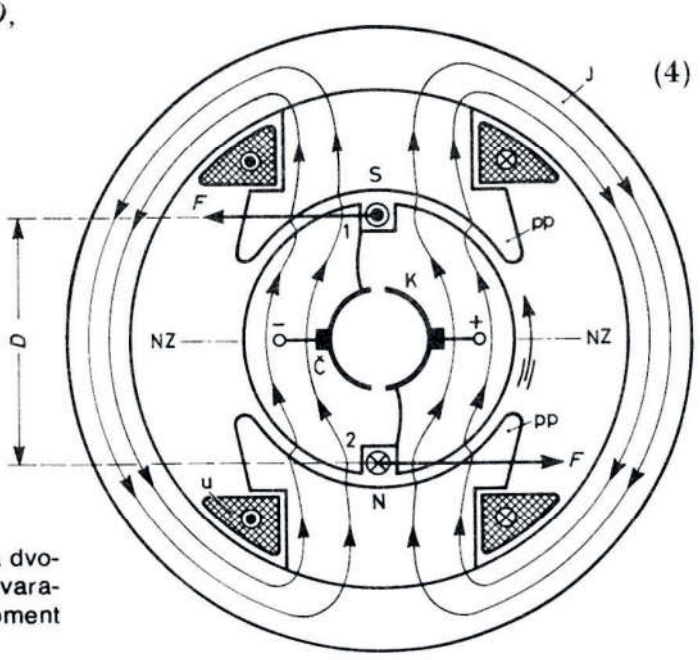
$$F = BIl \text{ [N]}, \tag{3}$$

a smjer će sila na pojedine vodiče biti kao na slici 7. Tako nastali par sila stvara okretni moment:

$$M = F\frac{D}{2} + F\frac{D}{2} = FD,$$

odnosno:

$$M = BIlD\text{[Nm]}. \tag{4}$$

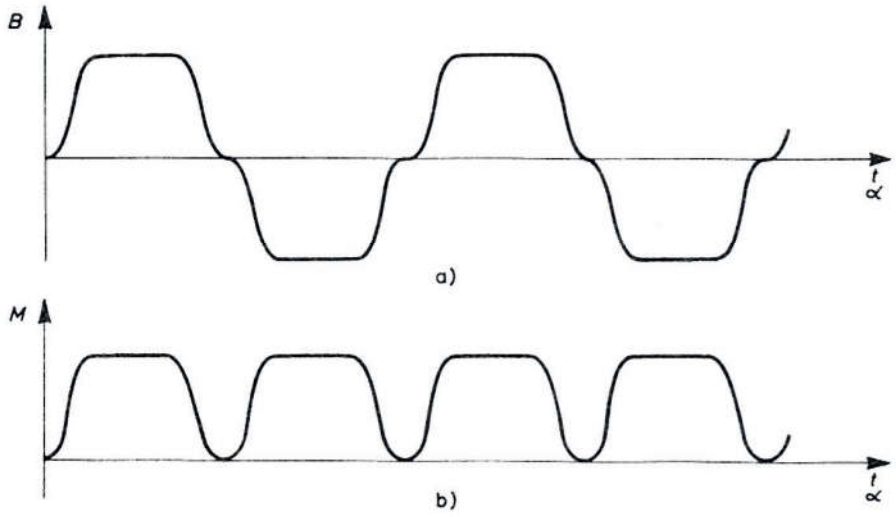


Sl. 7. Skica presjeka pojednostavnjenoga dvopolnog istosmjernog stroja (oznake odgovaraju motorskom radu): sile na vodiče; moment istosmjernog stroja

Pri tome je D promjer, kojem je polumjer $D/2$ polumjer hvatišta sila i djeluje na obodu rotora. Rotor će se, dakle, pokrenuti u vrtnju nalijevo. Kako se štapovi približavaju neutralnoj zoni, iznos se okretnog momenta smanjuje jer opada iznos indukcije B. Kad se štapovi nađu u samoj neutralnoj zoni, okretni će moment biti jednak nuli, ali pretpostavimo da će rotor dalje pokretati njegova kinetička energija jer se u tom trenu on već giba, tako da će vodiči proći kroz neutralnu zonu. Čim štapovi prođu neutralnu zonu, dospijevaju u magnetsko polje protivnog smjera, ali se istodobno mijenja i smjer struje u svitku, jer su istovremeno pod četkice došle druge lamele. Za obodnu silu promatranog štapa vrijedi u novim uvjetima:

$$F = (-B)l(-I) = BIl,$$

tj. obodna sila zadržava isti smjer. Zbog toga će i moment zadržati isti smjer, pa stroj ostaje u vrtnji! Na taj se način djelovanjem kolektora iz izmjeničnoga magnetskog polja (gledano sa strane rotora) dobiva moment istog smjera (vidi sl. 8), pri čemu je opet posredovao kolektor. Tako nastaje motor istosmjerne struje.



Sl. 8. a) Raspodjela indukcija
b) Pripadni moment istosmjernog motora prema slici 7.

Pažljivijem čitaocu vjerojatno nije izmaknula činjenica da bi tako jednostavan motor kao na slici 7. ostao stajati, tj. ne bi se ni pokrenuo nakon uključenja napona na četkice, kad bi se u stanju mirovanja svitak nalazio baš u neutralnoj zoni. To je nedostatak tako pojednostavnjenog modela motora, i u realnom primjeru motora s više utora po polu ne bi se moglo nešto takvo dogoditi. Ostaje da se to obrazloži u daljnjem izlaganju.

2.2. Razmatranje posljedica osnovne fizikalne slike

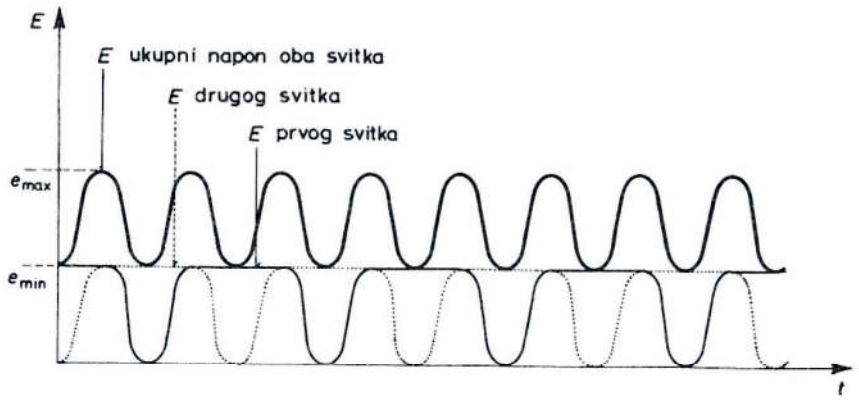
Dosadašnja izlaganja u ovom poglavlju prikazala su osnovni princip djelovanja istosmjernog stroja. Već i te najjednostavnije predodžbe daju nam mogućnost da zaključujemo o cijelom mnoštvu daljnjih važnih činjenica o

istosmjernom stroju. Zadatak je tehnike gradnje bilo kojeg stroja, pa i istosmjernoga, da se sa što manje materijala izgradi stroj što veće snage. Odatle potječe težnja da s odabranim dimenzijama stroja postignemo što veći magnetski tok uz što manju uzbudu. Pri određenoj uzbudi bit će magnetski tok to veći što je manji magnetski otpor magnetskog kruga, pa je poželjno da se magnetski tok rasprostire što više kroz željezo, a što manje zrakom. Zbog toga je i razumljiva težnja da se zračni raspor δ između polne papuče i oboda rotora napravi što manjim, toliko malim koliko dopuštaju ostali tehnički uvjeti.

Minimalni zračni raspor ograničen mogućnošću sigurnoga mehaničkog rada kakav se izvodi izmjeničnim, posebno asinhronim strojevima, ne može se, na žalost, graditi u istosmjernim strojevima, zbog komutacijskih teškoća, što će se razumjeti tek nakon odjeljka o komutaciji. Taj zračni raspor nužno mora biti nekoliko puta širi od onoga u asinhronog stroja, praktički širi za red veličine. Za postizanje što većega glavnog magnetskog toka Φ_{gl} poželjno je da i površina zračnog raspora, kojom prolazi glavni magnetski tok, bude što veća. Zbog toga se polna papuča izrađuje vrlo široka, tako da prekriva veliki dio polnog koraka τ_p. No, i tu ima ograničenje. Polne papuče ne smiju prekrivati cijeli obod stroja, pa ni njegov preveliki dio. Ako je, naime, razmak među polnim papučama premalen, znatno se povećava rasipni magnetski tok Φ_s, koji se zatvara izravno među papučama i ne ide preko željeza armature, pa i ne sudjeluje u stvaranju induciranog napona E. Taj razlog, kao i još neki, koji će biti poslije obrazloženi, ograničavaju širinu polne papuče, koja se nikad, ni na najvećim strojevima, ne može postići širom od 3/4 polnog koraka.

Iz iznijetoga o osnovnoj fizikalnoj slici istosmjernog motora i generatora vidi se da se motor i generator jednako grade. Drukčije rečeno, svaki istosmjerni stroj može raditi i kao motor i kao generator. Uz taj zaključak odmah se vezuje pitanje što je s razvijanjem momenta generatora, odnosno s razvijanjem induciranog napona motora. Razmotrimo najprije generator. Opteretimo li ga, u njegovoj armaturi teče struja, koja s magnetskim tokom stvara okretni moment na potpuno jednak način kao u motora. Taj se moment protivi vanjskom momentu koji pokreće generator, zbog suprotnih smjerova struje motora i generatora, i uvijek je manji od njega. Jednako je i s naponom U na stezaljkama generatora, koji je pod teretom manji od induciranog napona E, jer mu se dio izgubi kao pad napona pri prolasku struje kroz otpor armature, pa je $U \leqslant E$, gdje znak jednakosti vrijedi za prazni hod. Razmotre li se prilike u primjeru motora, odmah se vidi da se i u motorskom radu stvara inducirani napon E u armaturi motora, i to na sasvim jednak način kao u generatoru. Taj se inducirani napon protivi naponu koji je narinut na motor, i uvijek je manji od njega zbog pada napona na otporu armature. Motorski rad karakterizira, dakle, odnos $E < U$. Zaključak je jednostavan. Motorski i generatorski rad istosmjernog stroja fizikalno su identični. Razlika je u ovome: ako napon na stezaljkama nadvladava inducirani napon, struja teče u stroj i on radi kao motor; ako inducirani napon nadvladava napon na stezaljkama, struja teče iz stroja i on radi kao generator. Granični slučaj je prazni hod generatora. Tad se postiže ravnoteža između induciranog napona i napona na stezaljkama stroja, tj. $E = U$.

Iz naše osnovne predodžbe o radu istosmjernog stroja prema slici 2.1 – 1, vidi se dosta jasno i uloga kolektora ili komutatora, koji je u ovom pojednostavnjenom primjeru sveden na dva poluprstena. Već i dvostruko ime govori o dvostrukoj funkciji. *Kolektor*, što bi se prema latinskom korijenu moglo shvatiti kao *skupljač*, na neki način »skuplja« napon ili struju iz stroja i vodi je na stezaljke i obratno. On je neka vrsta priključka stroja na mrežu. Naziv *komutator*, što prema latinskom korijenu znači *izmjenjivač*, objašnjava funkciju tog dijela stroja pri promjeni, odnosno komutaciji struje u svitku u trenutku kad se pod četkicom smjenjuju lamele. Dok funkcija provođenja struje zahtijeva samo određeno dimenzioniranje kolektora i četkica i ne uzrokuje nekih teškoća, funkcija promjene struje u svitku, odnosno komutacija, ima dalekosežne posljedice na cijeli stroj, čak i na osnovno dimenzioniranje. Teorija komutacije bit će dalje u tekstu posebno obrađena, s najvažnijim posljedicama koje iz nje proistječu.



Sl. 1. Superponiranje napona dvaju svitaka – primjer valovitosti napona dvopolnoga istosmjernog stroja s dva svitka i četiri utora

Prilikom osnovnog prikaza generatorskog i motorskog rada prešli smo dosta lako preko činjenice da su dobiveni napon i moment bili zapravo pulsirajući (vidi sl. 2.1 – 6. i 2.1 – 8) i da je od tog rezultata do pravih istosmjernih veličina još daleko. Kojim se putem do njih dolazi, pokažimo na primjeru napona. Pretpostavimo da su na slici 2.1 – 1. četiri umjesto dva utora i dva umjesto jednog sistema kolektor – četkica – stezaljke. Neka svici budu postavljeni pod kutom od 90° u presjeku, tako da je jedan u neutralnoj zoni kad drugi bude pod sredinom polova. Neka su sistemi unutar stroja odvojeni, a na stezaljkama neka budu spojeni u seriju, kao, primjerice, dvije akumulatorske ćelije. U generatorskom radu daje svaki sistem svoj pulsirajući napon, a minimumi su napona pomaknuti jedan prema drugome za 90 električkih stupnjeva. Njihov serijski spoj daje ukupni napon, koji je također pulsirajući, ali su mu pulsacije i apsolutno i postotno znatno manje. Na slici 1. to se dobro vidi. Kad bismo broj takvih sistema (elemenata, svitaka) *spojenih u seriju* povećavali, smanjivala bi se *valovitost* napona na četkicama prema općem izrazu za valovitost (vidi sl. 1):

$$\Delta E[\%] = \frac{e_{max} - e_{min}}{e_{max} + e_{min}} \cdot 100[\%] \qquad (1)$$

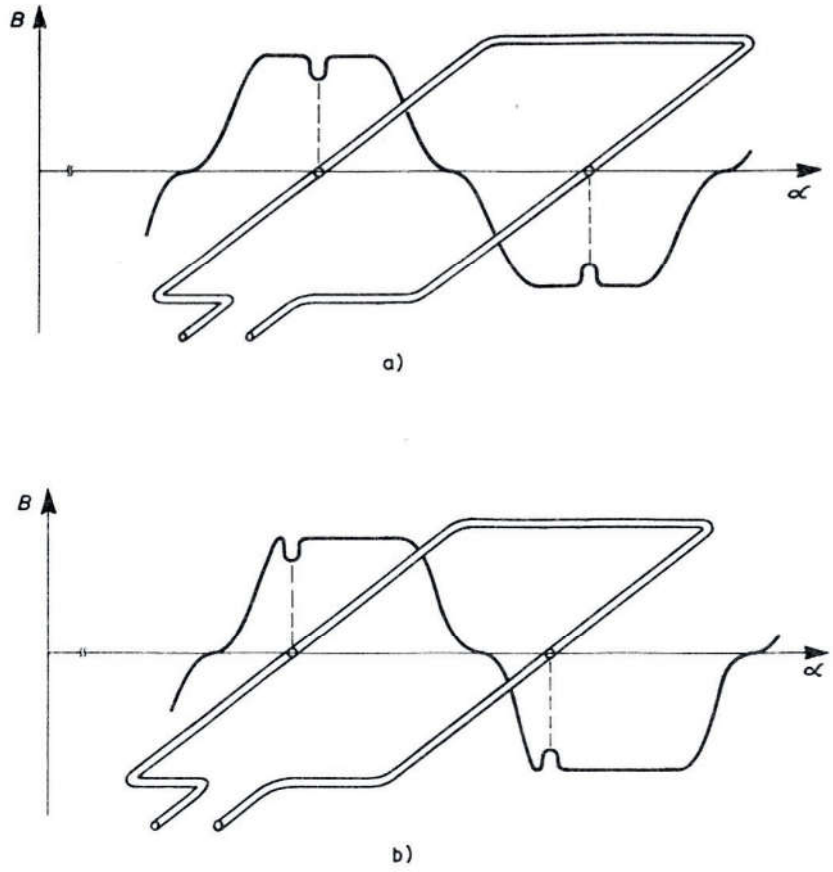
jer bi se stalno smanjivala razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti napona. Dakle, uz serijsko vezivanje većeg broja svitaka istosmjernog stroja (položenih u razne utore) postigli bismo istosmjerni napon manje valovitosti (s manjom veličinom pulsacija). Izlazi da bi za idealni (glatki) istosmjerni napon trebalo graditi stroj s beskonačno mnogo utora $N = \infty$, što je, dakako, nemoguće izvesti. Ali i dovoljno velik, a još uvijek izvediv broj utora po polu daje napon kojem su odstupanja od istosmjernoga (valovitost) zanemariva ili su unutar nekih dopuštenih granica. Spajajući svitke u seriju može se takav spoj ostvariti u jednom kolektoru sastavljenome od niza međusobno izoliranih lamela. Dopuštena valovitost napona za strojeve opće namjene iznosi neki manji postotni iznos nazivnog napona. Za gradnju strojeva (izuzevši strojeve male snage) vrijedi iskustveno pravilo da broj utora po polu mora biti veći od deset ili, izuzetno, osam:

$$\frac{N}{2p} \geq 10. \tag{2}$$

Ali kad su u pitanju strojevi male snage, onda se iz tehnološko-izvedbenih razloga često ne da odabrati više od četiri do šest utora po polu. Tad se mora ili dopustiti veća valovitost ili se pitanje rješava na drugi način, npr. gradnjom utora skošenih uzduž željeza rotora l za približno jedan korak utora.

Ostvarivanje potrebnog broja utora, dovoljno fino raspodijeljenih po obodu stroja i ispunjenih svicima, rješava tehnika namatanja istosmjernog stroja. U idućem poglavlju bit će obrađena osnovna problematika namota istosmjernih strojeva. No, prije nego što prijeđemo na namote, zadržimo se još časak na problematici pulsacija istosmjernog stroja. Pažljivom promatraču vjerojatno nije izmaklo iz vida da povećan magnetski otpor između polnih papuča nije jedini uzrok pulsacijama induciranog napona istosmjernog stroja. I sami utori u armaturi povećavaju magnetski otpor u magnetskom krugu stroja na mjestu utora, pogotovo zbog toga što se svim istosmjernim strojevima, osim onima male snage, grade otvoreni utori armature. Razlozi upotrebe otvorenih utora bit će naknadno obrazloženi. Na slici 2.a realna je slika magnetskog polja za pojednostavnjeni stroj sa slike 2.1 – 1, i to u položaju (kutu) svitka kakav je točno na toj slici. Na slici 2.b ista je magnetska slika, ali za položaj svitka koji je, uslijed vrtnje, nastupio nešto poslije. Važan je zaključak da deformacija polja izazvana postojanjem utora armature i prostora mijenja položaj na krivulji $B(x)$. No u ovom primjeru ne mijenja se ukupni magnetski otpor u magnetskom krugu glavnoga magnetskog toka, pa to ne izaziva neke dodatne pulsacije napona (pobliže vidi L 50). Za realni stroj s više utora po polu, mjestimično povećanje magnetskog otpora u zoni zračnog raspora po obodu armature dovodi do ozubljenja krivulje raspodjele magnetskog toka (vidi sl. 3), dakle do sličnih posljedica koje izaziva i već opisani princip sumiranja napona svitaka serijskim spajanjem, ali on u principu ne pridonosi povećanju pulsacija napona sve dok je ukupni otpor magnetskog kruga vremenski nepromjenjiv. Nezgodna kombinacija broja utora u zračnom rasporu pod samom polnom papučom (na dužini b_p) može uzrokovati da je u zoni najvećeg iznosa magnetske indukcije čas n utora i $(n + 1)$ zubi, čas $(n + 1)$ utora i n zubi, pa se mijenja ukupni otpor magnetskog kruga

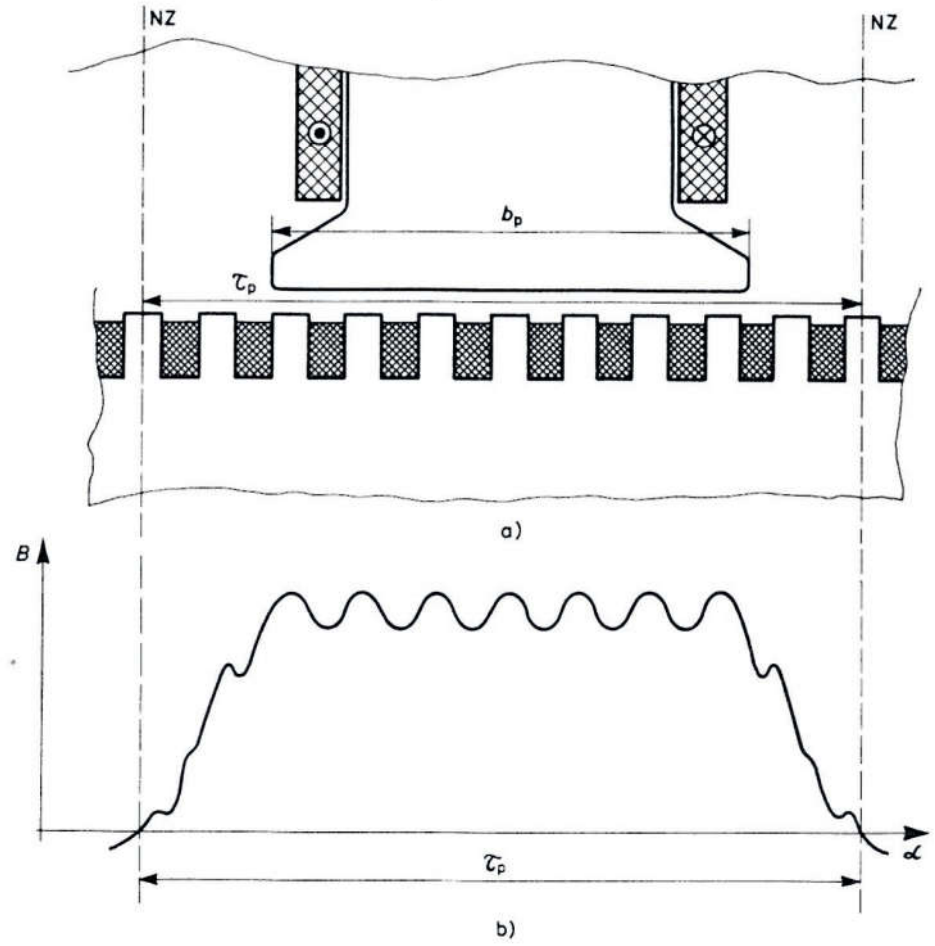
kako se rotor pomiče pod statorom. Primjerice, na slici 3. nacrtan je trenutak kad se pod polom nalazi sedam zubi i šest utora, pa kad se rotor u vrtnji pomakne za približno pola koraka utora τ_u, bit će šest zubi i sedam utora. U takvom slučaju pojavit će se dodatne vremenske pulsacije napona, koje se superponiraju onima



Sl. 2. a) Točnija slika rasporeda glavnoga magnetskog toka stroja prema slici 2.1–1. za položaj svitka pod sredinom pola

b) Ista slika nakon određenog pomaka svitka u vrtnji

prije opisanima. Te dodatne pulsacije mogu se izbjeći prilikom zasnivanja i konstruiranja stroja, i to prije svega ispravnim odabiranjem namota. Inače se i te dodatne pulsacije dadu suzbijati istom mjerom kao i prethodne. Promjena magnetskog otpora zbog utora jako ovisi o širini njegova otvora, što je poznato iz osnova strojeva [L 50] (Carterov faktor). Zbog toga se za posve male istosmjerne strojeve, koji se grade s poluzatvorenim utorima i gdje je dopuštena nešto veća valovitost napona, tehnika gradnje ne zadržava strogo na iskustvenom pravilu prema relaciji (2), već se uzima kao dopušteno i manje od deset (osam) utora po polu.



Sl. 3. a) Raspored utora na jednome polnom koraku stroja s deset utora po polu, i to u trenutku kad su neutralne zone na sredini zubi
b) Pripadni načelni raspored indukcije na obodu rotora

2.3. Zadaci i problemi

2.3.1. Zadaci

1. Istosmjerni stroj prema slici 2.1 – 1. ima obodnu brzinu armature $v = 20$ ms^{-1}, indukciju u zračnom rasporu glavnih polova $B = 0{,}8$ T, dužinu željeza armature $l = 400$ mm i dva utora s po jednim vodičem u svakome. Raspodjela indukcije $B(\alpha)$ prikazana je na slici 1.a. Prikažite grafički trenutne vrijednosti induciranog napona $e(t)$ na četkicama, te izračunajte minimalne i maksimalne vrijednosti napona, ako geometrijski kut između utora iznosi:
   a) $\alpha = 180°$;
   b) $\alpha = 120°$.

2. Dvopolni istosmjerni stroj ima obodnu brzinu armature $v = 30$ ms^{-1}, indukciju u zračnom rasporu glavnih polova $B = 0{,}9$ T, dužinu željeza armature $l = 300$ mm i $N = 8$ utora s jednim vodičem u utoru. Korak zavoja je dijametralan.

Izračunajte:

a) minimalnu i maksimalnu vrijednost induciranog napona vodiča;

b) minimalnu i maksimalnu vrijednost induciranog napona na četkicama;

c) valovitost induciranog napona Δe na četkicama.

3. Istosmjerni stroj s podacima prema 2. zadatku ima struju od 100 A u dovodu na četkice i vodiče armature smještene na promjeru $D = 400$ mm. Odredite:

a) silu F kod vodiča u utoru;

b) minimalnu i maksimalnu vrijednost momenta armature;

c) valovitost ΔM momenta armature;

d) koliku približnu srednju snagu P treba mehanički dovesti na armaturu ako stroj radi kao generator, a zanemarujemo gubitke.

4. Istosmjerni stroj ima promjer armature $D_a = 350$ mm, 42 otvorena utora širine 12 mm i jednoliki zračni raspor glavnog pola $\delta = 4$ mm. Odredite porast magnetskog otpora zračnog raspora nastao zbog ozubljenja armature uz glatku (bez ozubljenja) papuču glavnog pola.

2.3.2. Rješenja

1. a) [Trenutne vrijednosti $e(t)$ prikazane su na sl. 1.b. Minimalni inducirani napon vodiča i zavoja iznosi 0 V. Maksimalni napon vodiča je 6,4 V, a zavoja 12,8 V.]

b) [Trenutne vrijednosti $e(t)$ prikazane su na sl. 1.c. Minimalni inducirani napon vodiča je 0, a zavoja $-6{,}4$ V. Maksimalni napon vodiča iznosi 6,4 V, a zavoja 12,8 V.]

2. a) [Minimalni je napon vodiča 0 V, a maksimalni 8,1 V.]

b) [Pri smještaju jednog vodiča u utoru, minimalna vrijednost induciranog napona na četkicama iznosi:

$$e = Blv\left(\frac{N}{2} - 1\right) = 24{,}3 \text{ V},$$

a maksimalna vrijednost:

$$e = Blv\,\frac{N}{2} = 32{,}4 \text{ V.}]$$

c) [$\Delta e = 14{,}29\%$]

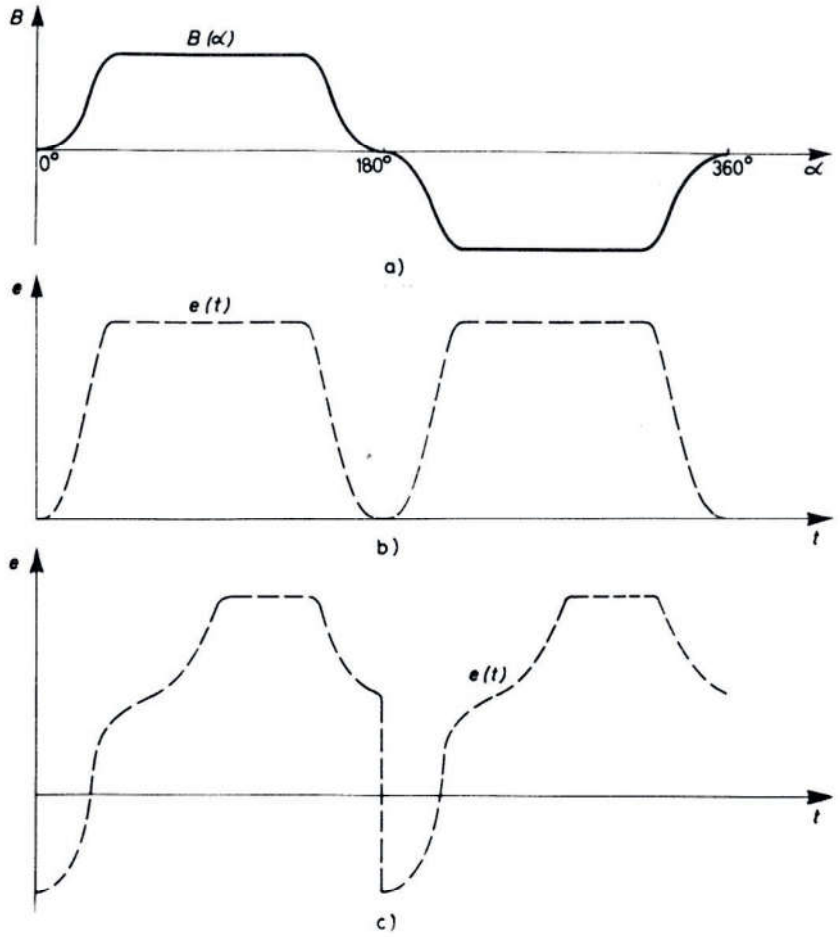
3. Struja vodiča iznosi 50 A.

a) [$F = 13{,}5$ N]

b) [Minimalna vrijednost momenta armature je 16,2 Nm, a maksimalna vrijednost 21,6 Nm.]

c) [$\Delta M = 14{,}29\,\%$]

d) [$P = UI_a = \Sigma Fv = 2\,835$ W]



Sl. 1.

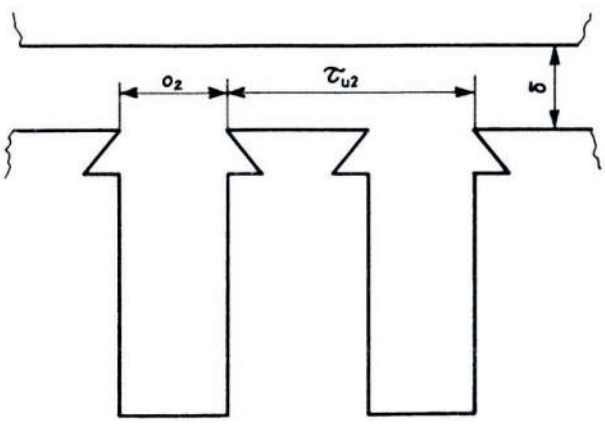
4. Korak će utora biti:

$$\tau_{u2} = \frac{D_a \pi}{N} = 26{,}18 \text{ mm}.$$

Povećanje magnetskog otpora zračnog raspora, zbog ozubljenja armature uz glatki stator, uzima se u obzir Carterovim koeficijentom, koji uz oznake na slici 2. [L50] iznosi:

$$k_c = \frac{o_2 + 5\delta}{o_2 \dfrac{\tau_{u2} - o_2}{\tau_{u2}} + 5\delta} = 1{,}208.$$

[Povećanje je magnetskog otpora zračnog raspora 20,8%.]



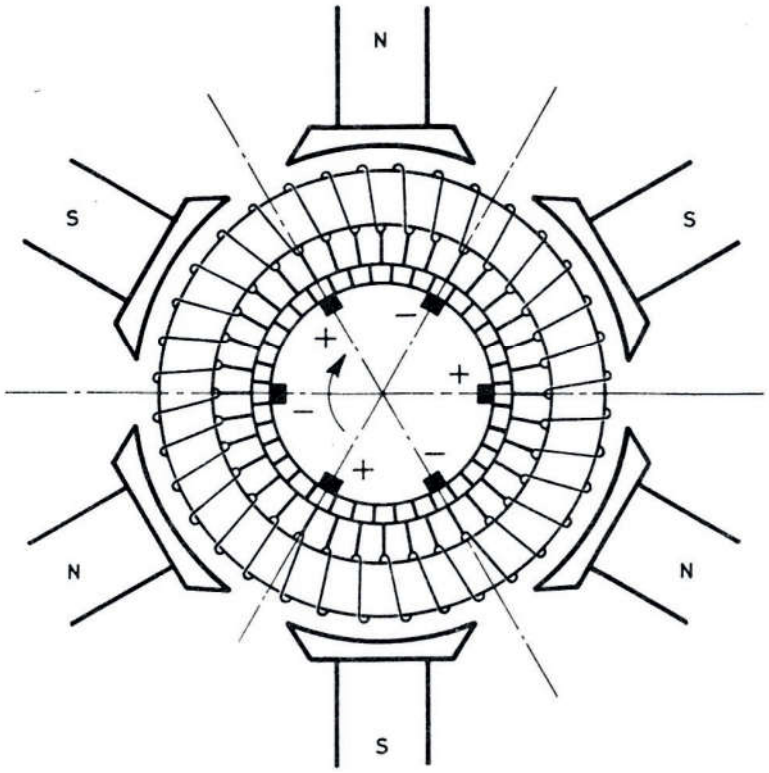
Sl. 2.

3. NAMOTI ISTOSMJERNIH STROJEVA

3.1. Izvedbe namota. Osnovni pojmovi

Prema načinu ugradnje namota u armaturu razlikujemo dvije osnovne izvedbe: *prstenastu* i *bubnjastu* izvedbu namota.

Prstenastom namotu armatura je građena kao šuplji valjak (prsten). Na taj prsten namotani su svici namota, a njihovi su krajevi spojeni na kolektorske lamele. Presjek jednoga takvog šestopolnog stroja prikazan je na slici 1. Na slici su samo dijelovi potrebni za razumijevanje, pa se može lijepo zaključiti da magnetski

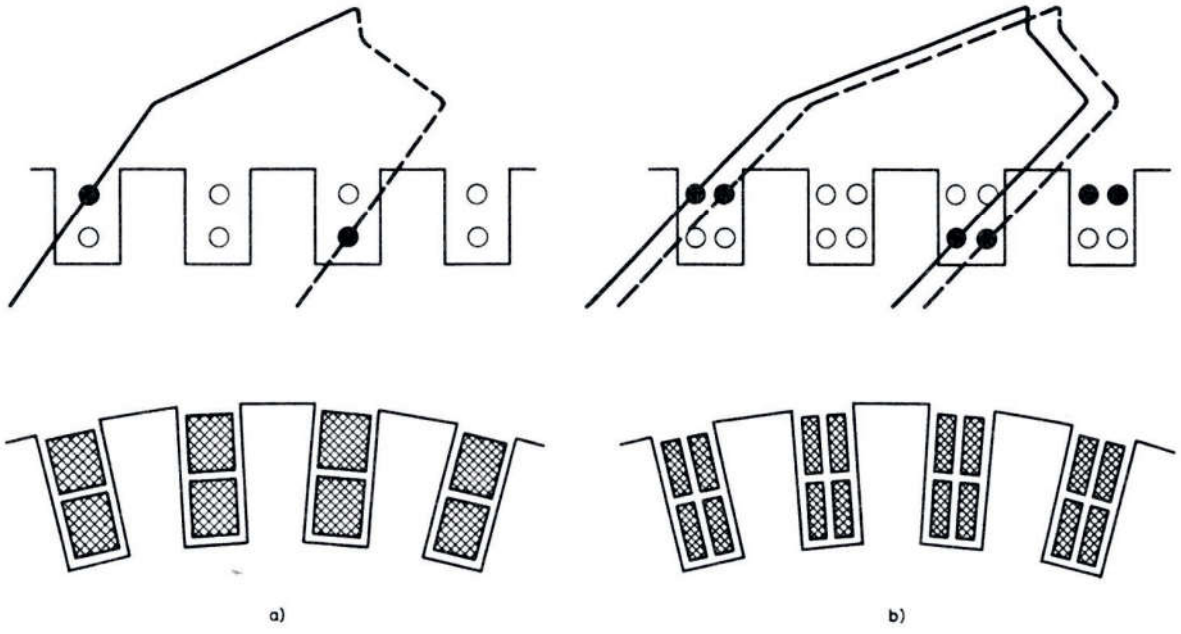


Sl. 1. Skica presjeka šesteropolnoga istosmjernog stroja s prstenastim armaturnim namotom

tok prelazi prstenom ulazeći pod N-polovima, a izlazeći pod S-polovima. Dalje, svi su vodiči i svici međusobno serijski spojeni, a svaki je svitak posebice priključen na jednu kolektorsku lamelu. Kad se stroj vrti, u pojedinim se vodičima inducira napon, a vektorski zbroj napona svitaka daje napon na četkicama. Zavoji na prstenastom namotu mogu se po volji rasporediti, a može ih, u granicama mogućnosti izvedbe, biti mnogo ili malo. Na taj se način dobro iskorištava magnetski tok, odnosno dade se postići mnogostruko ulančenje toka. Kombinirajući broj zavoja i debljinu vodiča u svitku te serijskim spajanjem svitaka, postižu

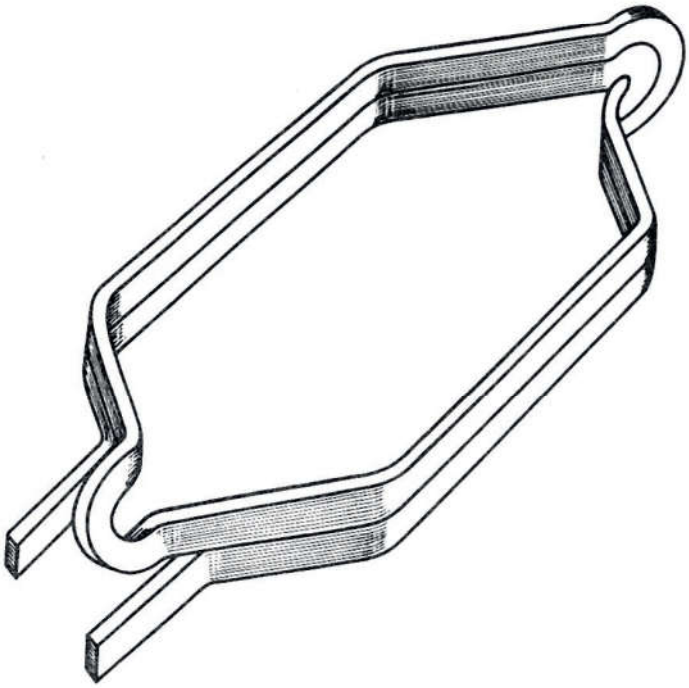
se različiti naponi i struje stroja, tj. mogu se dobiti relativno visoki naponi uz male struje, ili obrnuto – velike struje uz niže napone. Napon jedne grane takva namota složen je od vektorske sume napona svitaka jedne grane namota. Kako je iz slike očito da jednu granu namota čine svi serijski spojeni svici između jedne plus i jedne minus-četkice, to takav namot ima onoliko paralelnih grana (u našem primjeru 6) koliko ima i polova. Pa ipak, usprkos svim dobrim mogućnostima spajanja svitaka, prstenasti su namoti već davno sasvim napušteni, a ovdje su spomenuti samo zbog njihove pedagoške vrijednosti, zbog očiglednosti kako se namatanjem cijele armature postiže mnogo veće iskorištenje materijala stroja, prije svega željeza, uz odgovarajuće spajanje pojedinačnih svitaka u namot.

Razlog napuštanju prstenastih namota je preveliki utrošak bakra za njihovu izradu, bolje rečeno: u prstenastih namota suviše je neaktivnog bakra u stroju. Na slici 1. jasno se vidi da se napon inducira samo u onoj strani svitka koja je u zračnom rasporu, a to je svega oko 30 % bakra u namotu. U onoj strani svitka koja je s unutrašnje strane prstena, pa i u glavama koje spajaju strane svitaka, ne inducira se nikakav napon. Bakar u vodičima na tim mjestima samo vodi struju, te time povećava Jouleove gubitke snage i padove napona, pa bi ga zgodnijom izvedbom trebalo smanjiti na minimum, koji se, zbog funkcije međusobnog povezivanja svitaka namota, ne može izbjeći. Ta zgodnija izvedba je bubnjasti namot, kojem obje strane svitka leže tik uz zračni raspor, pa je bakar otprilike dva puta bolje iskorišten nego u prstenastom namotu. Već je i naš školski stroj prema slici 2.1 – 2. imao takav jedan jednostavan bubnjasti namot koji se sastojao samo od jednog svitka. Suvremeni istosmjerni stroj sadrži veći broj utora po obodu armature ispunjenih svicima bubnjastog namota. Ponajviše se upotrebljavaju dvoslojni bubnjasti namoti, pa ćemo njih detaljnije razraditi.



Sl. 2. Raspored strana svitaka bubnjastog namota: a) jedan svitak po utoru, $u = 1$; b) dva svitka po utoru, $u = 2$

Dvoslojnom bubnjastom namotu svaki se svitak nalazi jednom svojom stranom u gornjem sloju, a drugom u donjem sloju u utoru. Utori u koje je smješten svitak, zapravo strane svitka, razmaknuti su po obodu armature za korak svitka. Slike 2.a i 2.b prikazuju u principu taj raspored. Izborom ispravnog koraka svitka dobivamo pri određenoj gustoći magnetskog polja najveći napon svitka. Budući da je napon svitka vektorski zbroj dvaju napona strana svitaka, to se najveći napon postiže korakom koji odgovara 180 električkih stupnjeva. Dvopolnom stroju (vidi sl. 2.1 – 1) utori, koji su razmaknuti za 180 električkih stupnjeva, leže na dijametru rotora, pa se zbog toga korak od 180 električkih stupnjeva zove dijametralni korak, bez obzira na broj polova stroja. Geometrijski raspored polova, utora i svitaka ne dopušta uvijek izvedbu dijametralnog koraka. Tad se izvodi tetivni korak, koji ima manje ili više od 180 električkih stupnjeva.



Sl. 3. Jedna izvedba svitka (petljasti namot)

Radije se bira korak s manje od 180 stupnjeva jer se time štedi bakar. Slika 3. predočuje jednu od izvedbi svitka. Svaki svitak ima dva kraja, početak i završetak. Krajevi se svitaka spajaju na lamele. Na svaku lamelu dolazi završetak jednoga i početak drugog svitka, pa se tako armaturni namot zatvara sam u sebe, povezujući određeni broj svitaka, ili čak sve svitke. O tome hoće li povezati međusobno sve svitke, ili samo dio njih, ovisi o raznim okolnostima i o tome će biti više riječi. No, već sad je iz upravo razloženoga očito da je u dvoslojnome bubnjastom namotu broj lamela, koji označujemo s k, jednak broju svitaka. Nalazi li se u donjih strana svitaka u donjem sloju utora, a u gornjih strana svitaka u gornjem sloju utora, tad numerički na jedan utor otpada u svitaka, pa govorimo o u svitaka po utoru. U N utora ćemo, prema tome, imati:

$$k = uN \tag{1}$$

svitaka. Ako jedan svitak ima w_s zavoja, cijeli će namot imati $w_s k$ zavoja, a ukupan broj vodiča u jednom namotu je:

$$z = 2kw_s. \tag{2}$$

U dosadašnjim razmatranjima o namotu istosmjernih strojeva već smo se prešutno koristili saznanjima stečenima u proučavanju namota strojeva za izmjeničnu struju. Sad iskoristimo već tamo obrazloženu pretpostavku da je prostorni raspored magnetskog polja sinusan, iako su, zapravo, u većine strojeva odstupanja od te pretpostavke znatna. Moramo pri tome uzeti da promatramo samo osnovni harmonički član magnetskog polja. Sjetimo li se da je i sinhronim strojevima s izraženim polovima oblik polja jednak onome u istosmjernima, možemo očekivati potpuno zadovoljavajuće predodžbe o istosmjernom namotu. Dakle, uz prihvaćenu pretpostavku sinusnog rasporeda magnetskog polja dopušteno je napon svakog vodiča namota predočiti jednim vektorom (fazorom). Svi vodiči koji leže u istom utoru imaju *vektor napona* istog smjera i veličine. Fazni pomak među vektorima susjednih utora jednak je električkom kutu među susjednim utorima:

$$\alpha_{el} = \frac{360\ p}{N}. \tag{3}$$

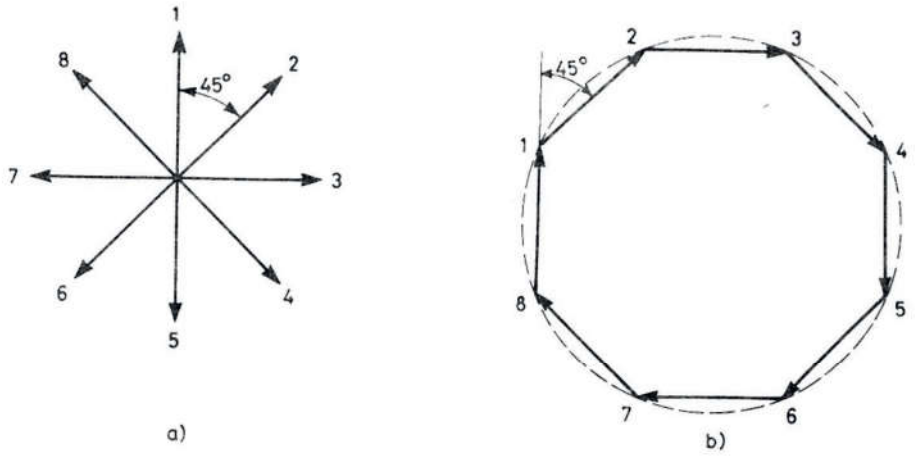
Neka npr. četveropolni istosmjerni stroj ($p = 2$) ima 23 utora. Tad će biti:

$$\alpha_{el} = \frac{360 \cdot 2}{23} = 31{,}3°.$$

Ista relacija (3) vrijedi i za vektore napona susjednih svitaka kad je samo jedan svitak po utoru, $u = 1$. Vektor napona jednog svitka formira se jednako svim svicima, i to zbrajanjem vektora svih vodiča svitka, što znači i zbrajanjem vektora strana svitaka (gornje i donje), jer su u jednoj strani svitka svi vodiči istofazni.

Rezultat spajanja svitaka u namot daje novu vektorsku sliku. Poslužimo se u prikazivanju *vektorskom zvijezdom* i *vektorskim mnogokutom*. Za dvopolni stroj ($p = 1$) sa samo osam utora ($N = 8$) i jednim svitkom po utoru ($u = 1$) vrijedi:

$$\alpha_{el} = \frac{360}{8} = 45°, \tag{4.a}$$



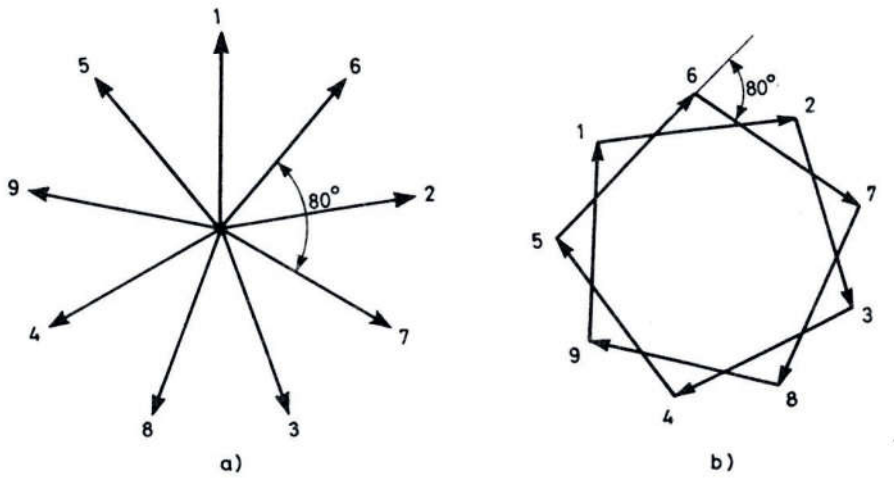
Sl. 4. Vektorska zvijezda i vektorski mnogokut za stroj s: $p = 1$, $N = 8$, $u = 1$

što daje vektorsku zvijezdu svitaka na slici 4.a, bez obzira na to je li svitak dijametralan ili ne. Spoji li se svršetak svitka 1 s početkom svitka 2, što se izvodi u jednoj lameli, pa se tako dalje nastavi, nastaje vektorski mnogokut prikazan na slici 4.b. Obilaskom svih vektora dolazi se do točke istog potencijala, što je posljedica činjenice da iz armature izlazi upravo onoliki magnetski tok koliki u nju ulazi. Postave li se četkice na bilo koja dva mjesta na kolektoru, namot se raspada u dvije paralelne grane. S obzirom na to da smo promatrali namot dvopolnog stroja, ostaje zaključak da namot bilo kojega istosmjernog stroja ima najmanje dvije paralelne grane. Uvedemo li oznaku $2a$ za broj paralelnih grana, gdje a znači broj *pari paralelnih grana*, vrijedit će:

$$a_{\min} = 1.$$

Pri razmatranju primjera uzeli smo svega osam utora u dvopolnom stroju. To sigurno nije ispravno za praksu prema relaciji (2.2–2). Međutim, za načelna promatranja zgodnije je uzeti manji broj utora jer naše slike i skice postaju preglednije i jasnije. Zato ćemo za sve primjere o namotima uzimati manji broj utora nego što se to u praksi izvodi. Takvim postupkom moći ćemo u cijelosti steći uvid u sva svojstva namota, a nećemo biti prisiljeni crtati nepregledne sheme namota. Jedno, međutim, ne smijemo smetnuti s uma. Vektorski mnogokuti stvarnih namota, koji imaju mnogo vektora (stranica), mnogo su sličniji kružnici od ovih naših mnogokuta »školskih« namota, a što je mnogokut sličniji kružnici, to mu je inducirani namot (promjer kružnice) manje valovit.

Uzmimo zatim idući primjer: četveropolni stroj s $p = 2$, $u = 1$, $N = 9$, $k = 1 \cdot 9 = 9$ i $\alpha_{el} = \dfrac{2 \cdot 360}{9} = 80°$. Vektorsku zvijezdu i mnogokut prikazuje slika 5. Mnogokut je dvostruk zbog $p = 2$, pa nam se pri obilasku oboda armature magnetska slika prostorno dva puta ponavlja. Vektori dobiveni u prvom obilasku ne poklapaju se s vektorima u drugom obilasku jer se određeni utori ne nalaze u jednakom položaju prema magnetskom polju. Taj uvjet jednakosti položaja prema polju izražavamo numerički zahtjevom da N i p imaju zajedničku mjeru.

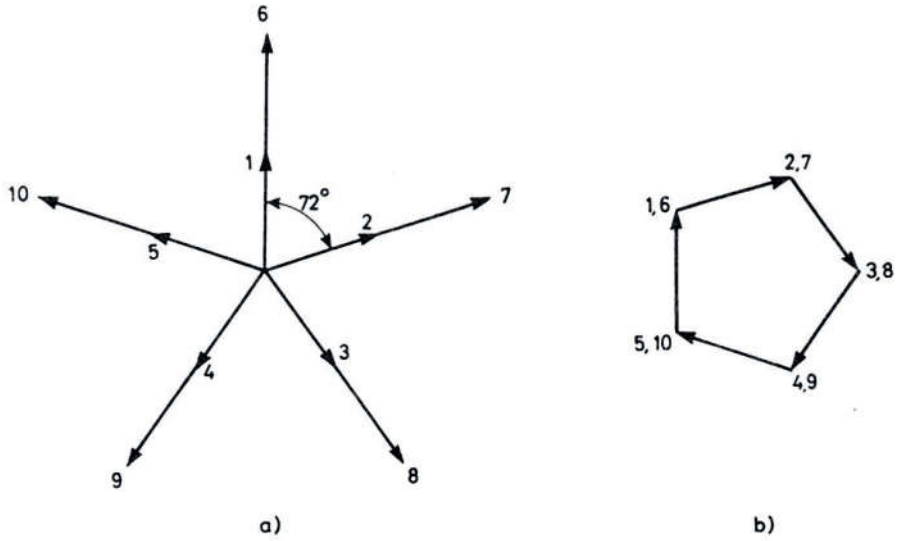


Sl. 5. Vektorska zvijezda i vektorski mnogokut za stroj s: $p = 2$, $u = 1$, $N = 9$, $k = 9$, $t = 1$

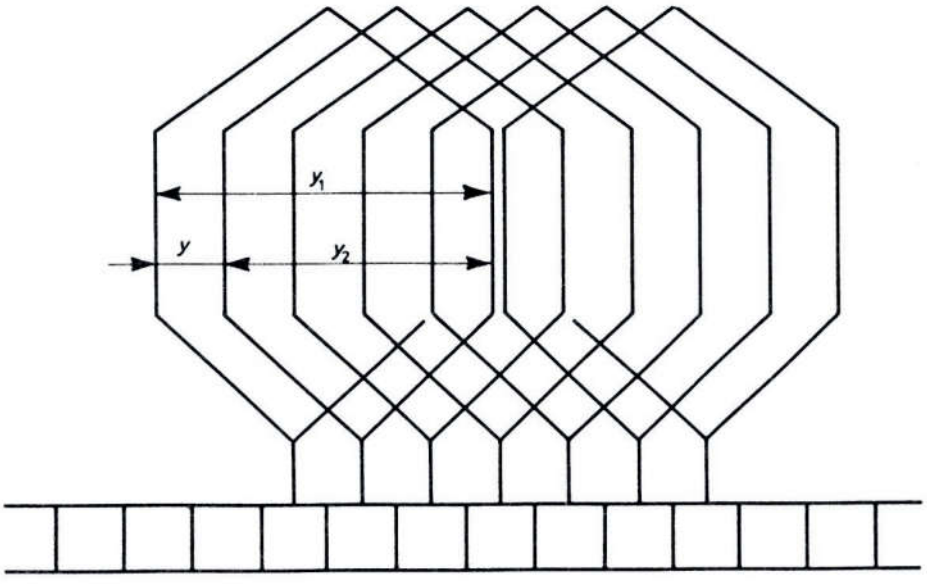
Kolika je najveća zajednička mjera t između N i p, toliko ima utora s istim smjerom vektora induciranog napona. Za primjer uzmimo četveropolni stroj s $p = 2$, $N = 10$, $u = 1$, $k = 10$, $t = 2$:

$$\alpha_{el} = \frac{2 \cdot 360}{10} = 72°.$$

Na slici 6. s nacrtanom zvijezdom i mnogokutom napona svitaka poklapaju se po dva vektora zbog $t = 2$, a na slici 5. nema nikakva poklapanja vektora zbog $t = 1$. O tome će biti još više riječi.

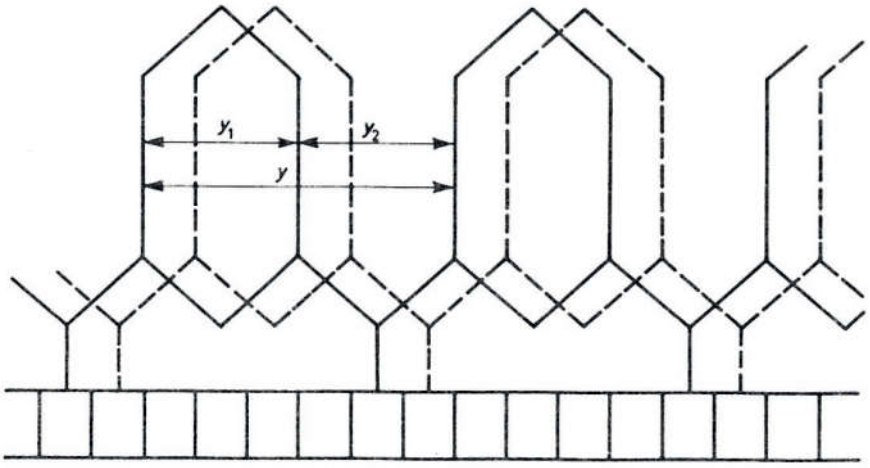


Sl. 6. Vektorska zvijezda i vektorski mnogokut za stroj s: $p = 2$, $u = 1$, $N = 10$, $k = 10$, $t = 2$



Sl. 7. Princip sheme vezivanja svitaka petljastog namota

Dosad je samo u principu razmotreno kako iz svitaka nastaje bubnjasti namot. U konkretnom spajanju različite su mogućnosti raznolikog povezivanja svitaka. Spajaju li se susjedni svici, nastat će *petljasti namoti* kojih je princip kretanja predočen na slici 7. *Valoviti namot* prema slici 8. nastaje kad se svršetak svitka ne vraća na početak jednoga od susjednih svitaka, nego napreduje dalje u smjeru koraka svitka.



Sl. 8. Princip sheme vezivanja svitaka valovitog namota

Sad je pravi trenutak da raščistimo s pojmom *koraka svitka* pri namatanju. Svitaka u nekom namotu ima k, jednako kao i lamela. Zato korake brojimo u lamelama. Korak svitka je deset ($y_1 = 10$) kad mu se jedna strana nalazi u prvome, a druga u jedanaestom položaju, tj. ako je svitak svojim korakom *prekoračio* deset položaja određenih za iste strane drugih svitaka. *Spojni korak* y_2 pokazuje koliko ćemo položaja strana svitaka prekoračiti kad svršetak prvoga spajamo s početkom drugog svitka. Mjesto brojanja položaja strana svitka radije brojimo lamele jer svaki svitak i počinje i svršava u nekoj kolektorskoj lameli. *Korak namota* je ukupni korak što nastaje uzimanjem u obzir *koraka svitka* i *spojnog koraka*, koji se zbrajaju ili oduzimaju, već prema tome produžavamo li spojnim korakom smjer kretanja započet korakom svitka ili se vraćamo u suprotnom smjeru. Kad crtamo shemu namota razvijenih u ravnini, okomite crte nam shematski prikazuju strane svitaka. Gornji spoj označava korak svitka, dakle širinu izvedenog svitka, a donji prikazuje kako smo svitke spojili međusobno, dakle spojni korak. To se jasno uočava na slikama 7. i 8. Dalje, odmah se vidi da je petljastom namotu spojni korak nasuprot koraku svitka, pa za njegov korak namota vrijedi:

$$y = y_1 - y_2. \tag{4}$$

Za valoviti namot bit će:

$$y = y_1 + y_2 \tag{5}$$

jer se smjer kretanja koraka svitka i spojnog koraka podudaraju.

3.1.1. Načelno o simetričnosti namota

Prije nego prijeđemo na razmatranje svojstava namota po njihovim vrstama, recimo još nešto što će nam olakšati taj posao. Uvijek ćemo težiti tome da struje u paralelnim granama namota budu jednake. Tu ćemo težnju ostvarivati i tako da za dva i više pari paralelnih grana namota ($a \geqslant 2$) galvanski spojimo grane i izvan namota, takozvanim *spojkama izjednačenja*, o kojima će biti više riječi. Da se po dvije ili više točaka raznih paralelnih grana namota uopće mogu kratko spojiti, prijeko je potrebno da potencijali tih točaka u idealnom slučaju budu jednaki. Usporedimo li namote na slikama 5. i 6, vidimo da bismo bez ikakvih posljedica mogli kratko spojiti točke (vrhove vektora) 1 i 6, 2 i 7, 3 i 8 itd. na slici 6. To se točno vidi iz mnogokuta vektora tog namota gdje spomenute točke imaju isti potencijal. Međutim, na slici 5. nema ni jedne točke vrhova vektora napona u vektorskome mnogokutu napona koju bismo mogli spojiti jer nema ni jednog para vektora napona svitaka u dva para paralelnih grana koji bi imao jednake potencijale. Dakle, namotu na slici 6. mogli bismo u principu postaviti spojke izjednačenja (kako, o tome poslije), a namotu sa slike 5. to ne možemo nikako. To je osnova za pojam *simetričnost namota*. Namot je na slici 6. po tome *simetričan*, a namot na slici 5. je *nesimetričan*. Fizikalna razlika između simetričnih i nesimetričnih namota je u tome što strojevi sa simetričnim namotima pokazuju u pogonu bolja svojstva od onih s nesimetričnim namotima (i o tome će biti više riječi), posebno u svladavanju komutacijskih teškoća. Rado bismo zaključili: gradimo samo strojeve sa simetričnim namotima, no zbog raznih uzroka to nije uvijek moguće. Naime, pojavljuju se problemi povezani s veličinom strojeva i s raznim vrstama namota, koji nas tjeraju da gradimo strojeve i s nesimetričnim namotima. Zbog toga moramo proučiti svojstva svih vrsta namota, i simetričnih i nesimetričnih. Vratimo se načas pojmu simetričnosti. Primjer sa slika 5. i 6. bio je jednostavan, četveropolni stroj sa samo dva para paralelnih grana, $a = 2$. Općenito za strojeve s mnogo (više od 2) pari paralelnih grana i mnogo pari polova možemo doći u nedoumicu moraju li *svi* ili samo *neki od svih* pari paralelnih grana imati mogućnost galvanskog spajanja izvan namota (postavljanje spojki izjednačenja). Za pravi simetrični namot treba da ta mogućnost postoji za sve parove paralelnih grana. Ima dakako određenih *uvjeta simetrije* za dvoslojne bubnjaste namote. Oni se nešto razlikuju za razne vrste namota (petljasti ili valoviti), ali postoje *nužni uvjeti* za sve vrste namota. Da ih navedemo. Trebalo bi da budu:

$$\frac{N}{a} = \text{cijeli broj;} \tag{6}$$

$$\frac{k}{a} = \text{cijeli broj;} \tag{7}$$

$$\frac{p}{a} = \text{cijeli broj.} \tag{8}$$

Uvjet iz jednadžbe (7) razumljiv je sam po sebi jer u svim parovim paralelnih grana mora prije svega biti jednak broj svitaka, a to je samo onda kad je broj svitaka namota (= broj kolektorskih lamela) k djeljiv bez ostatka brojem pari

paralelnih grana a. Budući da je $k = Nu$, to je $\frac{k}{a} = \frac{Nu}{a}$ i $\frac{k}{au} = \frac{N}{a}$, iz čega je razumljiv nužni uvjet simetrije (6). Dalje, mora biti toliko istofaznih napona svitaka ili, bolje, grupa od u napona svitaka, kolikostruk je mnogokut vektora napona, dakle a. To je moguće kad stroj ima barem toliko pari polova koliko ima pari paralelnih grana ($p = a$), ili je broj pari polova višekratnik broja pari paralelnih grana namota. To dovodi do nužnog uvjeta simetrije (8).

3.2. Petljasti namoti

Teorijski se sa svakim brojem utora N, s bilo kojim brojem svitaka u po utoru i uz svaki broj pari polova stroja p, može izvesti nekakav petljasti namot. Pitanje je samo hoće li svojstva stroja s bilo kakvim namotom odgovarati zahtjevima i da li će rad stroja biti ispravan. Prilagodbom zadanim uvjetima i izbjegavanjem loših režima rada razvilo se više vrsta petljastog namota i više pojmova s time u vezi. Tako uz simetrične i nesimetrične još razlikujemo i *križane* od *nekrižanih*, *jednovojne* od *dvovojnih* i *viševojnih* petljastih namota. Također su tu i *stepeničasti* za razliku od običnih ili *nestepeničastih* namota.

Ako za petljasti namot kažemo da je simetričan, kad su mu geometrijske i magnetske slike rasporeda svitaka pod svim parovima polova identične, to vodi do dodatnih uvjeta simetrije za petljasti namot osim onih nužnih prikazanih relacijama (3.1–6), (3.1–7) i (3.1–8). Budući da su svici grupirani pa se oni jedne grane naleze pod jednim parom polova, to mora dodatno broj svitaka biti djeljiv bez ostatka brojem pari polova. To odmah vrijedi i za broj utora, dakle:

$$\frac{N}{p} = \text{cijeli broj;} \tag{1}$$

$$\frac{K}{p} = \text{cijeli broj.} \tag{2}$$

3.2.1. Jednovojni *nekrižani* petljasti namot

Pojedine osobitosti petljastih namota razmotrimo na primjerima. Za četveropolni stroj imamo podatke: $p = 2$, $N = 18$, $u = 1$ i $k = N \cdot u = 18$. Odmah se vidi da su ispunjeni uvjeti simetrije. Dijametralni korak bi iznosio:

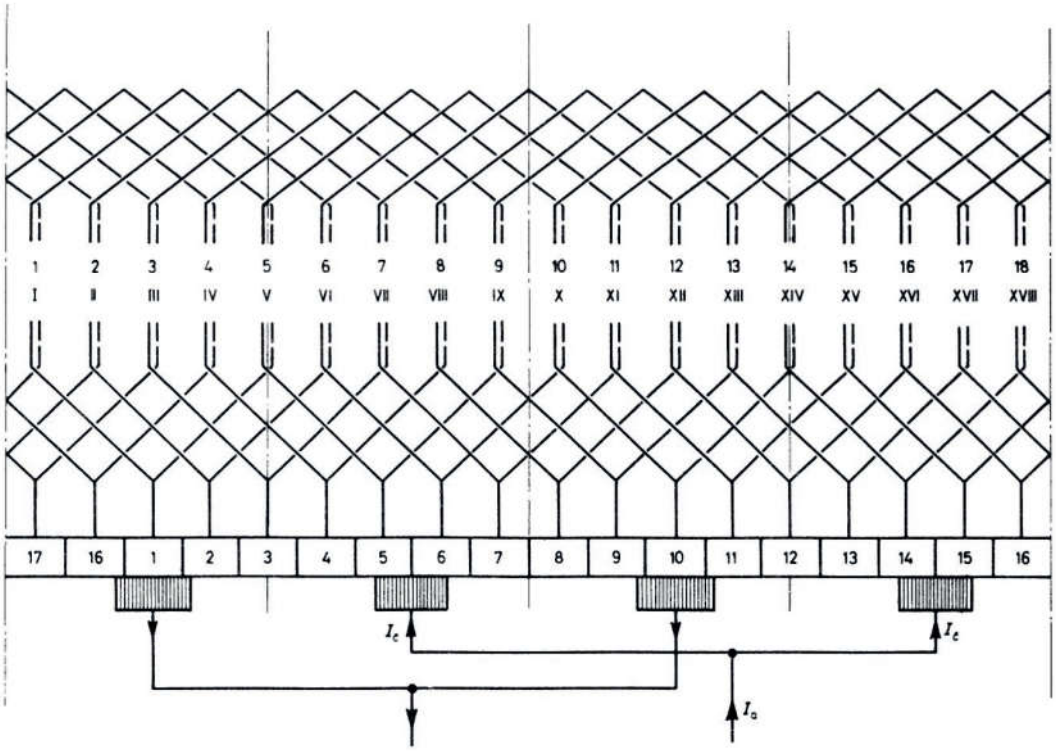
$$Y_1' = \frac{k}{2p} = \frac{18}{4} = 4{,}5,$$

što nije moguće izvesti jer korak svitka mora biti cijeli broj (zato smo ga i označili s Y_1', a ne Y_1). Dakle biramo:

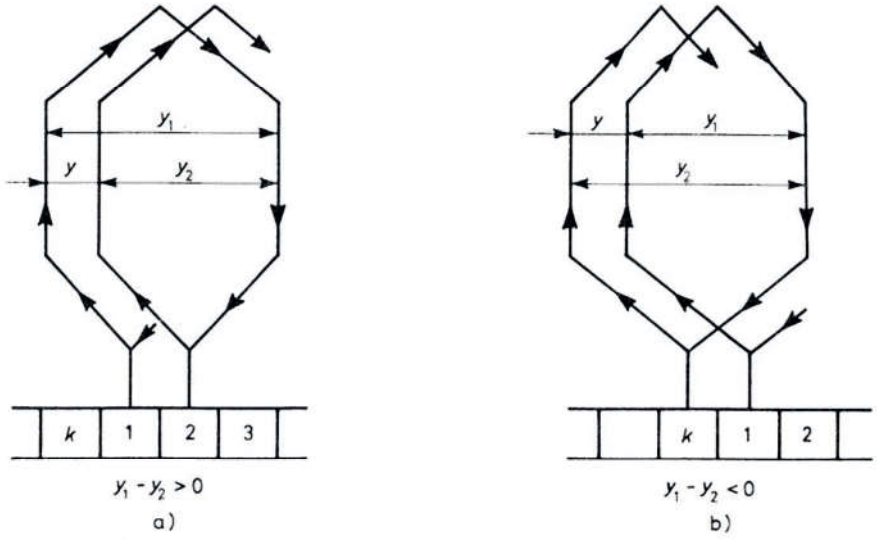
$$Y_1 = 5, \qquad Y_2 = 4, \qquad Y = Y_1 - Y_2 = 1.$$

Pomoću tih koraka nacrtamo namot i spojimo s kolektorskim lamelama prema slici 1. Ispratimo li namot putem kojim je motan, ili spojen, odmah vidimo da je on jednovojan jer smo samo jednom obišli rotor dok se namot sam u sebe

zatvorio. Osim toga on je i nekrižan jer pri vraćanju sa spojnim korakom na početak novog svitka ne prelazimo nigdje (ne križamo) glavu svitka koju smo upravo prošli. Kratko razmišljanje pokazuje da je za oba svojstva odlučujući korak namota y. Odmah uviđamo da bismo više puta morali s namotom obilaziti rotor kad bi korak namota bio veći od 1, jer bi nam ostajali nepopunjeni utori i



Sl. 1. Jednovojni nekrižani petljasti namot s: $p = 2$, $N = 18$, $u = 1$, $y_1 = 5$, $y_2 = 4$, $y = 1$



Sl. 2. Uz tumačenje o koraku nekrižanoga i križanog petljastog namota

lamele u prvom obilasku. Zato je svaki petljasti namot y-vojan. Dalje, glavu svitka ne ukrštavamo s povratnim vodom kad god je korak svitka veći od spojenog koraka, a uvijek dolazi do ukrštavanja kad je korak svitka manji od spojnog koraka. Nekrižan petljasti namot dobiva se, dakle, onda kad korak namota po relaciji (3.1–4) ima pozitivan predznak, a križan kad ima negativan predznak (vidi sl. 2).

Promatrajmo stroj u radu u jednome određenom trenutku. Neka položaj četkica za taj trenutak odgovara onome na slici 1, gdje su ucrtane i neutralne zone. Slijedimo li tok označenih struja, vidimo da četkice rastavljaju namot u četiri paralelne grane. Razmislimo li malo o geometriji našeg namota, postaje nam jasan odnos koji vrijedi za jednovojne petljaste namote:

$$2a = 2p, \tag{3}$$

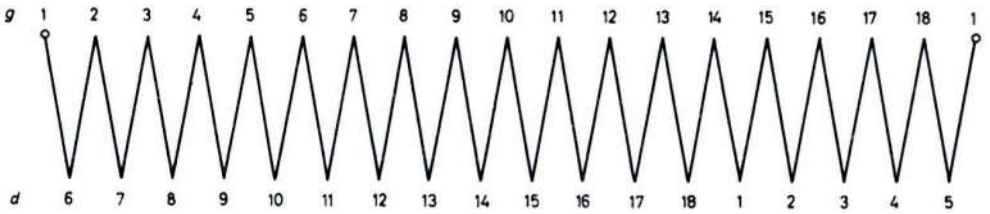
tj. da je broj paralelnih grana namota jednak broju polova. To dolazi odatle što armaturu višepolnog stroja s petljastim simetričnim namotom možemo zamišljati sastavljenom od p armatura dvopolnog namota, koje se razvijene nastavljaju jedna na drugu. Pod svakim je polom jedna grana namota, a četkica dijeli granu od grane. Zbog toga je prijeko potrebno da stroju s petljastim namotom četkice budu položene u svaku neutralnu zonu. Time postaju jasniji i uvjeti simetrije prema relacijama (1) i (2). Odmah je logična i raspodjela struja u stroju s petljastim namotom. Za struju koja prolazi četkicom vrijedi:

$$I_{\check{c}} = \frac{I_{uk}}{p}, \tag{4}$$

a struja u grani namota, odnosno u vodiču grane, bit će:

$$I_v = \frac{I_{uk}}{2a}. \tag{5}$$

Razmotrimo još malo sam način prikazivanja namota crtežom. Način po slici 1. vrlo je točan, a koristi se njime gotovo sva literatura. No, može se ići dalje prema jednostavnijem i vrlo preglednom prikazivanju. Na slici 3. dajemo odmah i rezultat za primjer iz slike 1. S g je označen gornji sloj, a s d donji strana svitaka.



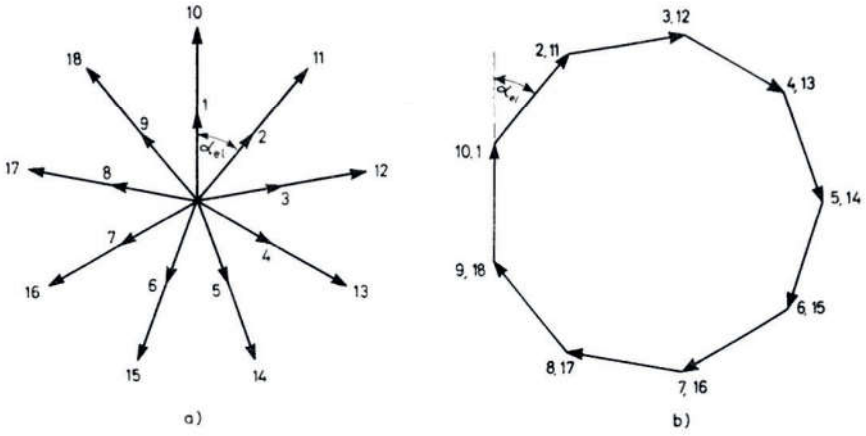
Sl. 3. Pojednostavnjeni način prikazivanja shema namota:
namot: $p = 2$, $N = 18$, $u = 1$, $y_1 = 5$, $y_2 = 4$, $y = 1$; oznake: (točke) g–strane svitaka u gornjem sloju utora, (točke) d–strane svitaka u donjem sloju utora, silazne crte – korak svitka y_1, uzlazne crte – spojni korak y_2

Brojevima su označeni položaji strana svitaka ili lamela. Crtom desno dolje (u našem primjeru crta 1–6, 2–7 itd.) označen je korak svitka, a desno gore (crta

6–2, 7–3 itd.) spojni korak. U daljnjem prikazu služit ćemo se obično tako pojednostavnjenom slikom. Konačno, prikažimo i vektorsku zvijezdu i vektorski mnogokut napona svitaka (vidi sl. 4). Električki kut izračunavamo:

$$\alpha_{el} = \frac{p \cdot 360}{N} = 40^\circ$$

i za njega su razmaknuti vektori napona svitaka u zvijezdi, i to za svaki četveropolni stroj s 18 utora i jednim svitkom po utoru (vidi sl. 4.a). Vektorski mnogokut za konkretni namot u primjeni nacrtan je na slici 4.b, i to spajanjem



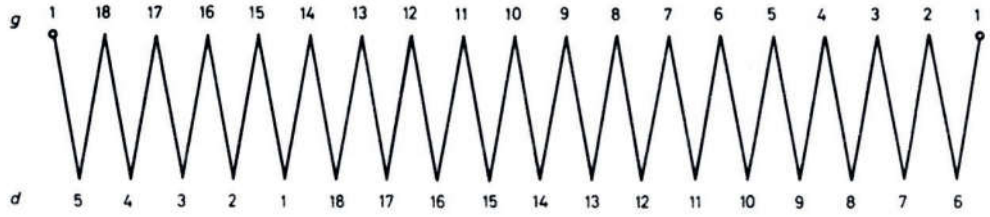
Sl. 4. a) Vektorska zvijezda namota četveropolnog stroja ($p = 2$) s 18 utora ($N = 18$) i jednim svitkom po utoru ($u = 1$) b) Vektorski mnogokut napona za namot s: $p = 2$, $N = 18$, $u = 1$, petljasti jednovojni i nekrižani s podacima: $k = 18$, $a = 2$, $y_1 = 5$, $y_2 = 4$, $y = 1$

napona *svitaka* vektorske zvijezde prema redoslijedu na slici 3: svitak 1 sa svitkom 2, 2 s 3, ..., 18 s 1, čime se zatvorio dvostruki mnogokut. Slika 4. potvrđuje simetričnost namota prema prethodnim izlaganjima. Svaki od vektora prvog mnogokuta (strana 1–9) ima teorijski jednak potencijal kao i jedan od vektora drugog mnogokuta (strane 10–18), pa se mogu izjednačiti potencijali (izvan spoja namota) na po volji mnogo točaka, dakako najviše do devet jer mnogokuti imaju po devet stranica.

3.2.2. Jednovojni *križani* petljasti namot

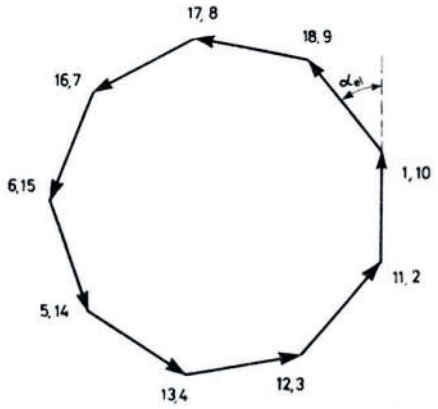
Razmotrimo isti stroj kao u prvom primjeru s $p = 2$, $N = 18$, $u = 1$, ali s korakom $y_1 = 4$, $y_2 = 5$. Slijedi $y_1 - y_2 = -1$. Zbog minus-predznaka koraka namota dobivamo za rezultat križani, jednovojni petljasti namot. Prikažimo ga shematski na slici 5. Usporedimo li (sl. 3) hod nekrižanoga i (sl. 5) hod križanog namota, pa slijedimo put namota, uočavamo da se po obodu rotora gibamo u suprotnim smjerovima. Posljedice su: suprotni smjerovi induciranih napona i suprotni smjerovi momenata vrtnje obaju strojeva, uz inače jednake ostale uvjete. Ta suprotnost križanog i nekrižanog namota vrijedi za sve vrste namota.

Vektorsku zvijezdu napona ne treba crtati, ona je kao na slici 4.a. Međutim, vektorski je mnogokut drukčiji i nacrtan je na slici 6, spajanjem napona svitaka vektorske zvijezde sa slike 4.a, redoslijedom sa slike 5: svitak 1 sa svitkom 18, 18 sa 17, ..., 2 s 1, čime se i zatvorio vektorski mnogokut. Što se tiče simetričnosti, vrijedi u principu sve ono rečeno o jednovojnome nekrižanom petljastom namotu.



Sl. 5. Jednovojni križani petljasti namot: $p = 2$, $N = 18$, $u = 1$, $k = 18$, $a = 2$, $y_1 = 4$, $y_2 = 5$, $y = -1$

Usporede li se slike 4.b i 6, vidi se da su dva mnogokuta identična, s jedinom razlikom što se jedan kreće u smislu kazaljke na satu (onaj sa sl. 4.b), a drugi, onaj sa slike 6, obrnuto. Na jednak način kreću se i svici prilikom ulaganja namota u utore rotora (usporedi sl. 3. i 5). Budući da nema neke, za inducirani napon ili uopće za pogon, bitne razlike među pokazanim nekrižanim i križanim namotima, pa je izbor u načelu slobodan, odabrat ćemo u ovom primjeru križani namot. Zbog manjeg koraka svitka ($y_1 = 4$ prema $y_1 = 5$) utrošit ćemo za izradu svitaka, i uopće izradu namota, manje bakra, pa će nam u toj izvedbi biti i manji Jouleovi gubici u namotu, a i manji pad napona na otporu armature u pogonu.



Sl. 6. Vektorski mnogokut napona svitaka za petljasti jednovojni i križani namot s: $p = 2$, $N = 18$, $u = 1$, $k = 18$, $a = 2$, $y_1 = 4$, $y_2 = 5$, $y = -1$

Vratimo se sad, samo nakratko, pitanju valovitosti napona iz odjeljka 2.2, a u vezi s izborom broja utora petljastog namota. Za simetrični namot iz uvjeta (1), tj. da N/p mora biti cijeli broj, zanimljivo je odrediti da li *cijeli parni* ili *cijeli neparni* broj. Pri cijelome *parnom* broju N/p pod svakim će polom biti isti geometrijski raspored utora, pa budući da se jedan svitak nalazi pod dva susjedna pola, i kako se jedna od paralelnih grana namota nalazi pod samo dva susjedna pola (jednim parom polova), stvoreni su uvjeti da dođe do vremenskih pulsacija magnetskog

toka, kako je opisano u odjeljku 1.2. To se uglavnom događa zbog toga što je pri tome i broj utora po polu $N/(2p)$ cijeli broj. Pri cijelome *neparnom* broju N/p, pod jednim polom nije cijeli broj utora, nego razlomljeni broj (neki cijeli broj $+0{,}5$) utora, i zato se pod polom s ulaznim magnetskim tokom utori (strane svitaka) nalaze u drukčijemu geometrijskom položaju od utora (svitaka) pod polom s izlaznim magnetskim tokom. Time se uvjeti za stvaranje pulsacija smanjuju ili sasvim eliminiraju. Prema tome treba težiti da za petljaste simetrične namote bude:

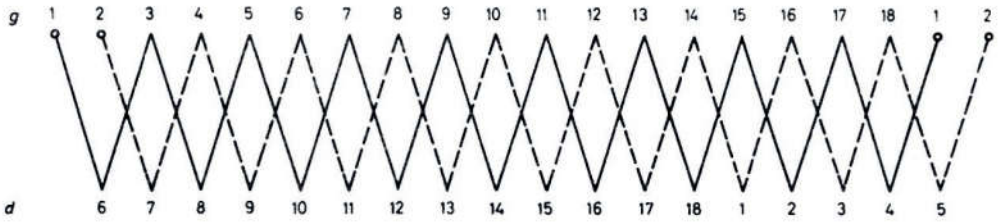
$$\frac{N}{p} = \text{cijeli neparni broj.} \tag{6}$$

3.2.3. Dvovojni petljasti namot

Neka opet bude riječ o sličnome četveropolnom stroju s $p = 2$, $N = 18$ i $u = 1$, neka korak svitka bude $y_1 = 5$, a spojni korak $y_2 = 3$. Korak namota bit će tad:

$$y = y_1 - y_2 = 5 - 3 = 2.$$

Krenemo li svitkom od položaja ($1 + y_1 = 6$, $6 - y_2 = 3$, $3 + y_1 = 8$, $8 - y_2 = 5$ itd.), vidimo da u gornjem sloju prelazimo samo položaje svitaka neparnoga rednog broja, a u donjem sloju samo parnoga rednog broja. Nakon obilaska armature zatvara se namot sam u sebe ispunivši svega polovicu raspoloživih položaja za namot. Na slici 7. odgovara to puno izvučenom namotu.



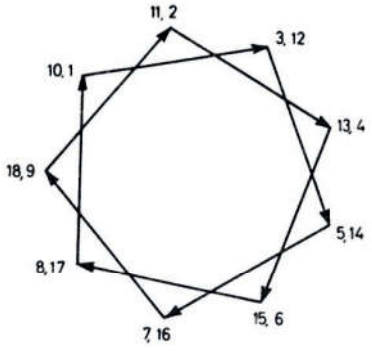
Sl. 7. Dvovojni nekrižani petljasti namot: $p = 2$, $a = 4$, $N = 18$, $u = 1$, $y_1 = 5$, $y_2 = 3$, $y = 2$ (nesimetrično)

Jasno je da u preostali slobodni prostor možemo položiti još jedan namot, i tako još jednom obići rotor, što je na slici 7. učinjeno crtkano nacrcrtanim namotom. Taj je namot dvovojan, što je već bilo jasno zbog $y = 2$. Kod položenih četkica ima taj namot osam paralelnih grana, što je evidentno ako ga zamislimo kao dva međusobno paralelna jednovojna namota s po četiri paralelne grane. Daljnjom dedukcijom nalazimo da bi trovojni namot imao 12 paralelnih grana, odnosno općenito y-vojni namot će imati:

$$2a = 2p|y| \tag{7}$$

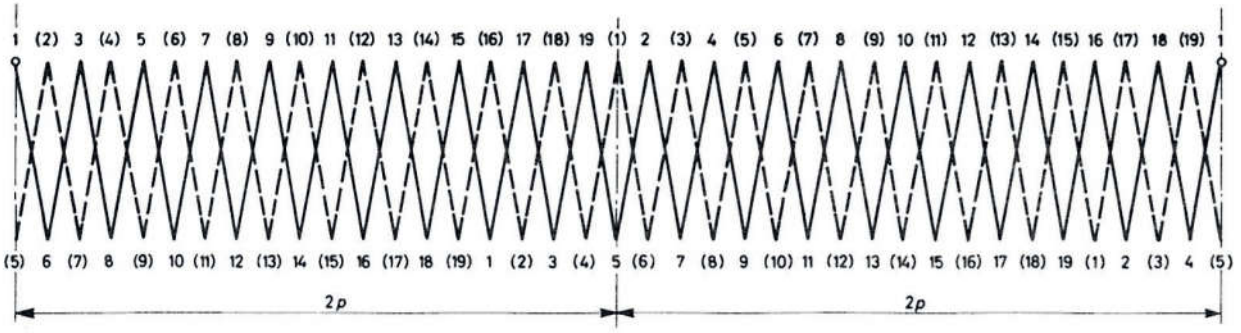
paralelnih grana. Tako je relacija (3), koja vrijedi za jednovojni petljasti namot, samo specijalni slučaj relacije (7), koja općenito vrijedi za bilo kakav petljasti namot. Radi daljnje analize nacrtajmo vektorski mnogokut napona svitaka jer je

vektorska zvijezda već predočena na slici 4.a. Slika 8. prikazuje vektorski mnogokut napona nacrtan spajanjem napona svitaka prema slici 7. Sa slike se vide četiri mnogokuta, od kojih su dva i dva sukladna. Međutim, taj je namot nesimetričan, iako ispunjava uvjete (1) i (2) za petljasti namot i općenite uvjete simetričnosti (3.1 – 6) i (3.1 – 7) jer ne ispunjava uvjet (3.1 – 8). Naime, iako postoje



Sl. 8. Vektorski mnogokut napona svitaka za petljasti, dvovojni i nekrižani namot s: $p = 2$, $a = 4$, $N = 18$, $u = 1$, $k = 18$, $y_1 = 5$, $y_2 = 3$, $y = 2$

točke teorijski jednakog potencijala raznih mnogokuta, nema točaka jednakog potencijala *svih* mnogokuta što daje pravi simetrični namot. Za taj namot bi se moglo, u najboljem slučaju, reći da ima dijelom simetrični karakter. To možemo i dublje analizirati. Pogledaju se točke jednakih potencijala na slici i usporedi pripadnost svitaka raznim ovojima te se vidi da točke jednakog potencijala pripadaju uvijek raznim ovojima koji međusobno nemaju galvanske veze. Ta se situacija može iskoristiti eventualnim takvim spajanjem da se u prostoru fiksiraju međusobni potencijali grana namota raznih ovoja (što će dobro doći u rješavanju nekih problema strojeva najveće snage), ali ne može besprijekorno poslužiti za izjednačenje struja raznih grana namota istog ovoja. Međutim, jasno je da ni jedan *dvovojni* petljasti namot ne ispunjava osnovni (nužni) uvjet simetrije (3.1 – 8), tj. p/a = cijeli broj. Ali se ipak razlikuju nesimetrični dvovojni petljasti namoti kojima je jedan dio vektora svitaka raznih ovoja (mogli bismo reći, djelomično simetričnih namota) od namota gdje uopće nema ni dijela vektora istog potencijala. Za primjer uzmimo četveropolni stroj s podacima za namot: $p = 2$, $a = 4$, $N = 19$, $u = 1$, $k = 19$, $y_1 = 5$, $y_2 = 3$ i $y = 2$. Spoj svitaka prikazuje slika 9, s koje se vidi kako namot poslije jednog obilaska prirodno prelazi u

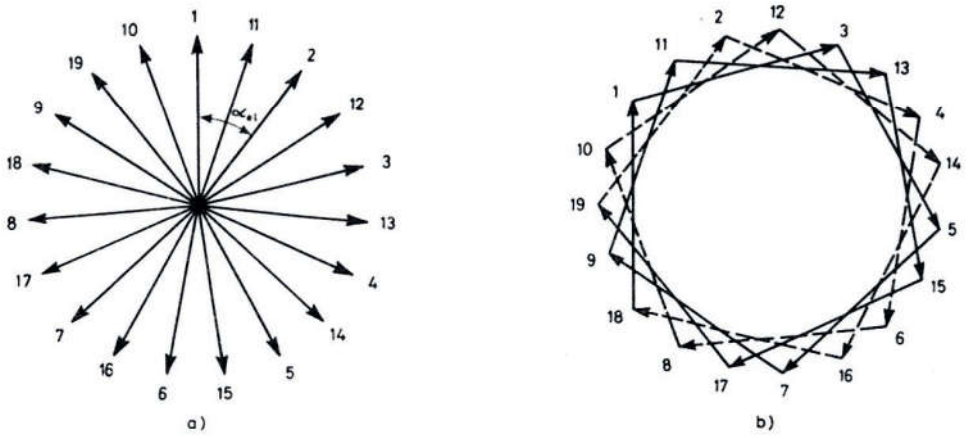


Sl. 9. Shema vezivanja svitaka petljastoga dvovojnog, nesimetričnog namota: $p = 2$, $a = 4$, $N = 19$, $u = 1$, $k = 18$, $y_1 = 5$, $y_2 = 3$, $y = 2$

neispunjeni prostor u drugom obilasku. Radi jasnijeg prikaza dva puta je razvijen rotor u ravninu, pa je u lijevoj polovici prikazan hod u prvom, a u desnoj polovici u drugom obilasku. Električki kut između utorskih vektora bit će:

$$\alpha_{el} = \frac{p \cdot 360}{N} = 37{,}89°.$$

Nacrtani namot ne ispunjava ni jedan uvjet simetrije, u što ćemo se lako uvjeriti provjerom prema relacijama (3.1–6), (3,1–7), (3.1–8), (1) i (2). Nacrtamo li utorsku vektorsku zvijezdu napona (sl. 10.a) i mnogokut napona vektora svitaka



Sl. 10. a) Vektorska zvijezda namota četveropolnog stroja ($p = 2$) s 19 utora ($N = 19$) i jednim svitkom po utoru ($u = 1$) b) Vektorski mnogokut napona svitaka za petljasti, dvovojni, nesimetrični namot s: $p = 2$, $a = 4$, $N = 19$, $u = 1$, $k = 19$, $y_1 = 5$, $y_2 = 3$, $y = 2$

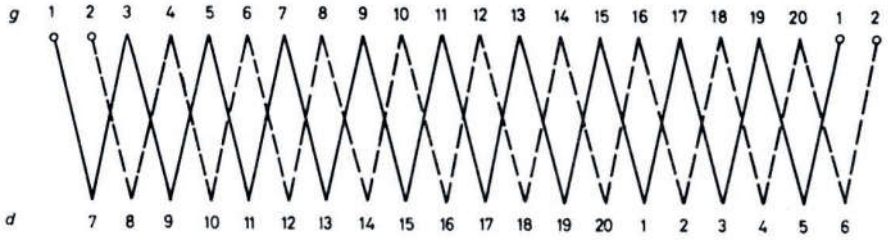
(sl. 10.b), odmah uočavamo da nema ni jednog para vektora istog potencijala. Dakle, taj potpuno nesimetrični namot ne omogućuje uopće galvansko spajanje nekih točaka ovog namota na kolektoru.

Ako se časak vratimo na namot sa slike 7, zapažamo da se on zatvara dva puta sam u sebe, tj. svaki ovoj u sebe nakon obilaska rotora. Nasuprot tome očito je da namot na slici 9. poslije jednog obilaska (jednog ovoja) prirodno prelazi u neispunjeni prostor u svome drugom obilasku, zatvarajući se sam u sebe samo jedanput. Tu je važno reći da je to svojstvo namota samo geometrijsko, tj. nema utjecaja ni na kakve fizikalne osobine stroja. O tome će biti više riječi.

Namot na slici 7. ispunjavao je uvjet (6), tj. odgovorio je zahtjevu za optimalnim magnetskim rasporedom utora na jednom polnom koraku armature. Provjerimo, radi cjelovitosti slike, i namot koji će imati parni broj utora po polu, dakle lošiji u pogledu izazivanja pulsacije magnetskog toka. Neka bude zadano: $p = 2$, $a = 4$, $N = 20$, $u = 1$, $k = 20$, $y_1 = 6$, $y_2 = 4$, $y = 2$, pa će biti $N/p = 10$ = cijeli parni broj. Namot je nacrtan na slici 11, a električki kut među utorima iznosi:

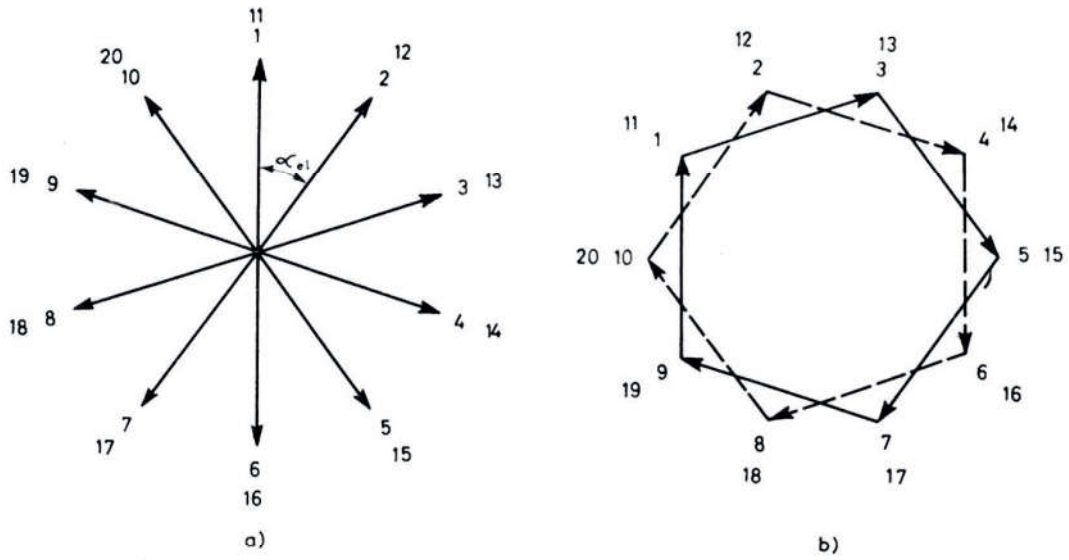
$$\alpha_{el} = \frac{p \cdot 360}{N} = 36.$$

Na osnovi toga nacrtana je vektorska zvijezda utora i vektorski mnogokut napona svitaka na slici 12. Odmah se vidi iz vektorskog mnogokuta napona svitaka da opet postoji samo dio vektora istog potencijala, što je u skladu s uvjetom (3.1 – 8), tj. namot nije pravi simetrični, iako ima mogućnost djelomičnog izjednačavanja potencijala. Značajno je uočiti da sad točke istog potencijala pripadaju uvijek



Sl. 11. Shema vezivanja svitaka petljastoga dvovojnog, nesimetričnog namota: $p = 2$, $a = 4$, $N = 20$, $u = 1$, $k = 20$, $y_1 = 6$, $y_2 = 4$, $y = 2$

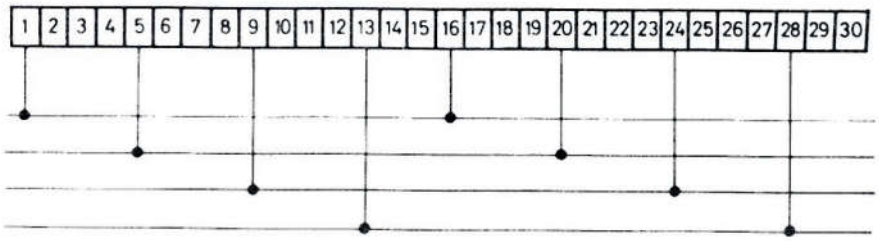
istom ovoju, i uopće nema onih koje bi pripadale raznim ovojima namota. To je upravo suprotno primjeru iz namota sa slika 7. i 8, gdje su sve točke istog potencijala pripadale raznim ovojima, a nije ih bilo u istom ovoju. S malo razmišljanja lako je uvidjeti da su ta različita svojstva posljedica broja utora po polu namota. Kad je $\frac{N}{p}$ cijeli parni broj, uvijek točke istog potencijala u vektorskome mnogokutu napona svitaka pripadaju istom ovoju, a kad je $\frac{N}{p}$ neparan, one pripadaju samo raznim ovojima. Ta će činjenica znatno utjecati na izbor namota za strojeve najvećih snaga, što će biti posebno razloženo u devetom poglavlju.



Sl. 12. a) Vektorska zvijezda namota četveropolnog stroja ($p = 2$), s 20 utora ($N = 20$) i jednim svitkom po utoru ($u = 1$) b) Vektorski mnogokut napona svitaka za petljasti, dvovojni, nesimetrični namot s: $p = 2$, $a = 4$, $N = 20$, $u = 1$, $k = 20$, $y_1 = 6$, $y_2 = 4$, $y = 2$

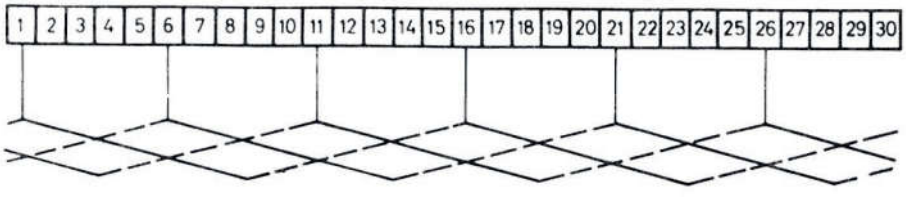
3.2.4. Spojke izjednačenja

Općenito. Kad istosmjerni stroj ima više od jednog para paralelnih grana namota ($a > 1$), zna se dogoditi da inducirani napon u raznim granama bude različit. Te razlike potjeraju kroz vodiče, pa preko četkica struje izjednačenja, koje su trostruko štetne. Prvo, povećavaju padove napona; drugo, smanjuju snagu stroja jer beskorisno teku namotima pa ih griju; treće i najvažnije, otežavaju situaciju u komutiranju, tj. mogu izazvati iskrenje. Da se to spriječi, postavljaju se *spojke izjednačenja* (drugi je naziv *ekvipotencijalne spojke)* u točke teorijski istog potencijala raznih paralelnih grana namota. Budući da te točke nalazimo samo kod simetričnih namota, ili onih koji su barem djelomično simetrični, jasna je težnja da se grade strojevi sa simetričnim namotima kad god je to moguće. Za idealno izrađen simetrični stroj mogli bismo računati da se u svim paralelnim granama induciraju jednaki naponi. U tehnički izrađenim strojevima nastupaju razlike u veličini zračnog raspora u granicama tolerancija propisa. Vjerojatna je mogućnost i razlika u permeabilitetu željeznih dijelova, u ispunjenju prostora limovima itd. Posljedica svih takvih utjecaja je moguća pojava nejednakoga magnetskog toka pod raznim polovima. To su razlozi nesimetrija elektromagnetske prirode. Daljnji su razlozi nejednolikost vodiča namota: presjek, tolerancija vodljivosti materijala i nejednolika izrada svitaka. To su uglavnom tehnološki razlozi. Nesimetričnost namota treća je skupina razloga za nejednakost induciranih napona raznih paralelnih grana, no nju ne možemo spriječiti jer se ne daju postaviti spojke izjednačenja.



Sl. 13. Primjer izvedbe spojki izjednačenja u obliku prstena

Dakle, princip postavljanja spojki izjednačenja je da se paralelne grane na točkama jednakog potencijala međusobno spoje vodljivom vezom, tako da struje izjednačenja ne teku preko četkica. U praksi se najčešće postavljaju spojke izjednačenja na kolektoru s njegove slobodne strane, a izuzetno na glave namota.



Sl. 14. Primjer izvedbe spojki izjednačenja u obliku dvoslojnog namota

Presjek bakra spojki izjednačenja odabire se obično u granicama između 50 i 100 % presjeka vodiča u namotu. Spojke se priključuju ili na glave namota ili na kolektor. Konstrukcijski se razlikuju dvije izvedbe. Prva je u obliku prstena s otcjepima koji vode na namot ili kolektor (vidi sl. 13), a druga u obliku dvoslojnog namota kao na slici 14. Korak spojki izjednačenja mora biti od 360 električkih stupnjeva. Odluka o tome koliko će se spojki izjednačenja postaviti na konkretni stroj, ovisi o predvidivoj težini komutacije. To je problem o kojem će biti više riječi. Osobito je teška situacija kod strojeva s često velikim preopterećenjima u obliku udaraca struje. Smatra se da i najteže slučajeve zadovoljava postavljanje po jedne spojke izjednačenja na svaki svitak ili lamelu u utoru stroja.

Petljasti namot

Postavljanjem četkica raspada se svaki petljasti namot prema jednadžbi (7) u $2yp$ paralelnih grana. Pri tome je karakteristično da se jedna grana nalazi uvijek samo pod jednim parom polova stroja (vidi npr. sl.1), što posebno ističe utjecaj magnetskih razloga za induciranje nejednakih napona u paralelnim granama namota. Zbog toga su spojke izjednačenja za strojeve s petljastim namotom posebno važne, i postavljaju se praktički svim jednovojnim četveropolnim i višepolnim petljastim namotima. Izuzeci su obično strojevi malih snaga, ako nisu posebno opterećeni. Maksimalni broj spojki izjednačenja koji se mogu postaviti jednak je broju strana svitaka u jednoj grani, dakle:

$$N_{\text{spmax}} = \frac{k}{p}, \tag{8}$$

na što se obično ne ide ni u najtežim okolnostima (često nema ni prostorne mogućnosti smještaja), već se smatra da u najtežim slučajevima treba tako postupiti da jedan svitak po utoru bude priključen na spojku izjednačenja. Korak će spojke izjednačenja biti:

$$y_{\text{sp}} = \frac{k}{p}. \tag{9}$$

Tako spojke izjednačenja na slikama 13. i 14. pripadaju četveropolnom stroju ($p = 2$) s 30 kolektorskih lamela k, pa im korak spojki iznosi $y_{\text{sp}} = 15$.

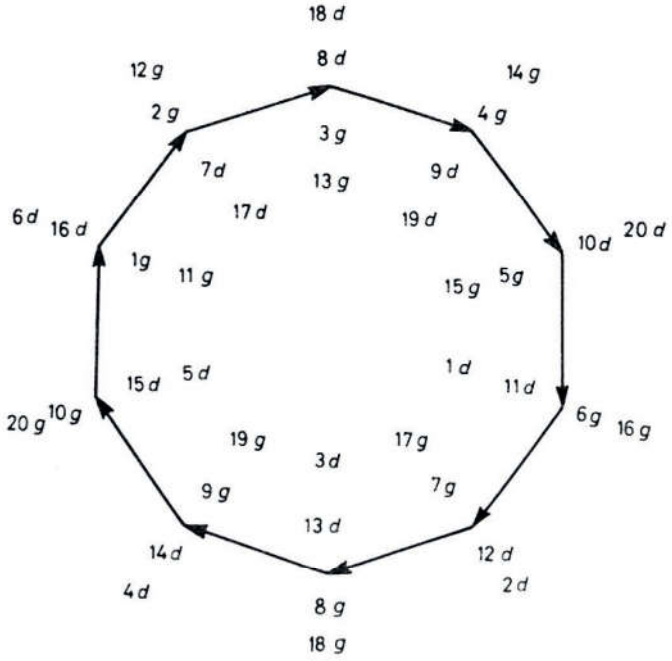
Strojevi s *dvovojnim* petljastim namotom trebaju spojke izjednačenja već i u dvopolnoj izvedbi, a pogotovo kad su višepolni. Iako svi klasificirani kao nesimetrični, jer ni jedan ne ispunjava uvjet (3.1–8), pa po tome ne bi mogli imati nikakve spojke izjednačenja, vidjeli smo da u nekim verzijama ti namoti imaju točke zajedničkog potencijala vektora napona svitaka raznih paralelnih grana. To bismo prema dosadašnjem izlaganju mogli ovako sistematizirati:

1. Namoti s $N/p \neq$ cijeli broj potpuno su nesimetrični, nemaju uopće točaka jednakog potencijala i ne mogu imati klasičnih spojki izjednačenja – vidi namot na slikama 9. i 10.
2. Namoti s $N/p =$ cijeli *parni* broj u biti su nesimetrični, ali su ipak dijelom simetrični. U pogledu točaka jednakog potencijala vidi npr. slike 11. i 12. Na

njima se klasičnim spojkama izjednačenja mogu spojiti samo razne paralelne grane, ali samo istog ovoja. Zbog $k = Nu$ dobivamo iz jednadžbe (9) da im je korak klasičnih spojki izjednačenja y_{sp} uvijek paran.

3. Namoti s N/p = cijeli *neparni* broj također su u biti nesimetrični, no također su dijelom simetrični. U pogledu točaka jednakog potencijala vidi slike 7. i 8. Ali i njima se klasičnim spojkama izjednačenja dadu spojiti samo razne paralelne grane, ali samo različitih ovoja. Zbog $k = Nu$ dobivamo iz jednadžbe (9) da im je korak klasičnih spojki y_{sp} uvijek neparan.

Strojevi s dvovojnim petljastim namotom uvijek su vrlo velike snage, a ti se gotovo uvijek grade sa štapnim namotom. To znači da im se svitak sastoji od jednog zavoja, a strana svitka od 1/2 zavoja, odnosno jednog štapa. To u principu omogućuje postavljanje *spojki izjednačenja druge vrste*, ili, kako ih još zovu, Punga-spojki, po čovjeku koji ih je prvi upotrijebio. Obrazložimo to na primjeru. Nacrtamo li za namot sa slike 11. na osnovi zvijezde utorskih vektora (sl. 12.a) vektorski mnogokut napona *strana* svitaka (a ne cijelih svitaka), dobivamo situaciju na slici 15. Uz to ide i mogućnost spajanja točaka istog potencijala i u



Sl. 15. Vektorski mnogokut napona *strana svitaka* za petljasti, dvoslojni namot s: $p = 2$, $a = 4$, $N = 20$, $u = 1$, $k = 20$, $y_1 = 6$, $y_2 = 4$, $y = 2$

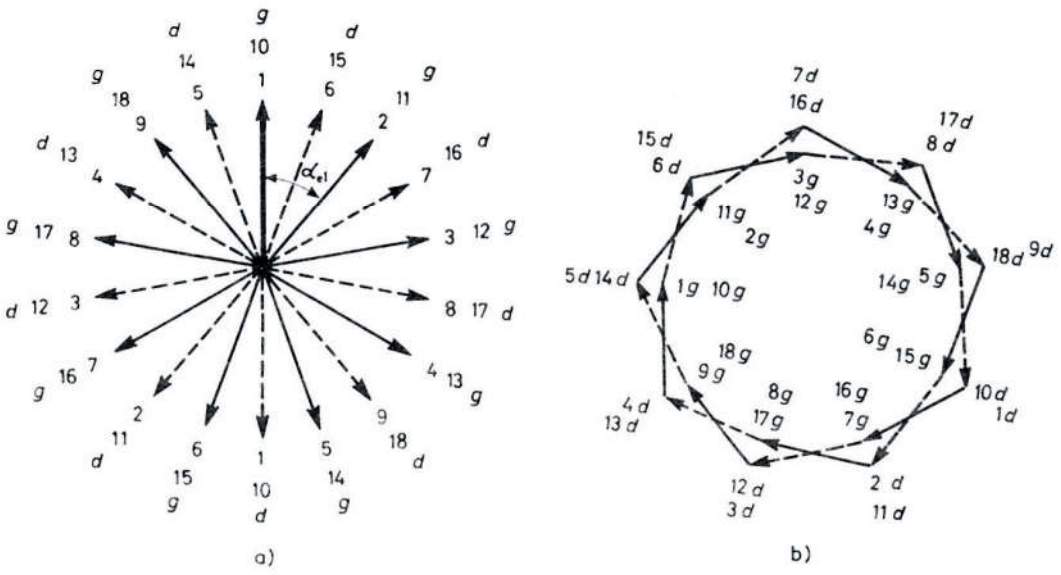
istom ovoju i među raznim ovojima, i to spajanje svih točaka potencijala, dakle kao da je riječ o pravome simetričnom namotu. Međutim, vidimo usporedbom sa slikom 12.b i kontrolom spoja po slici 11, da su klasičnim spojkama izjednačenja na jednoj strani rotora moguća samo spajanja istog ovoja, npr. spoj točaka 1*g* ili 11*g* s jedne strane rotora ili točaka 6*d* i 16*d* s druge strane rotora. Ali spoj svih tih četiriju točaka ili para 1*g*6*d* i 11*g*16*d* (moguće su još kombinacije 1*g*16*d* i 11*g*6*d*) može se izvršiti samo spojem s jedne na drugu stranu rotora. To je i definicija

spojki izjednačenja druge vrste. Osim mane u izuzetno kompliciranoj konstrukciji (izolirane i posebno učvršćene spojke provlače se kroz šupljine rotora između namota armature i glavine osovine, pa su potrebna dva odvojena sistema klasičnih spojki) eventualna struja izjednačenja koja njima protječe izaziva dodatno kružno magnetiziranje jarma armature. To, dalje, uzrokuje komplikaciju u magnetskoj nesimetriji, ležajnim strujama itd. Teško je reći je li prednost potpunog izjednačenja potencijala takvim spojkama drugog reda veća od negativnih posljedica koje one izazivaju. Pogotovo zbog toga što su to na kvarove vrlo ranjiva mjesta, a jedva pristupačna za izradu, kontrolu ili popravke. Ukratko, većina proizvođača velikih istosmjernih strojeva ih ne izvodi, ali ima ih koji to izuzetno ipak rade.

Spojke izjednačenja druge vrste ne mogu se postaviti svakome nesimetričnom namotu. Za dvovojne petljaste namote dadu se ostvariti uvjeti izvedivosti. Lako je uvidjeti da takvu namotu mora korak svitka y_1 biti toliko veći od 180 električkih stupnjeva (što je u koracima lamela $k/2p$) koliko je spojni korak y_2 manji od $k/2p$, a osim toga mora korak namota $y = y_1 - y_2$ biti ± 2 da namot bude dvovojni, pa se iz toga dobiva uvjet:

$$y_1 = \frac{k}{2p} \pm 1, \qquad y_2 = \frac{k}{2p} \mp 1. \tag{10}$$

Provjerimo za namot sa slike 7, koji očito ne ispunjava taj uvjet. Nacrtamo li na slici 16.a vektorsku zvijezdu napona *strana svitaka* i spojimo prema shemi na slici 7. napone *strana svitaka* u vektorski mnogokut napona *strana svitaka* na slici 16.b, uočavamo da nema točaka jednakog potencijala između vektora napona unutar istog ovoja. Dakle, mogućnost se postavljanja spojki izjednačenja nije promijenila prema onima u slici 8. Nema više pravog smisla dalje raspredati teorijske uvjete



Sl. 16. a) Vektorska zvijezda napona *strana svitaka* za dvoslojni petljasti namot ($p = 2$, $N = 18$, $u = 1$, $y_1 = 5$) sa slike 7.
b) Vektorski mnogokut napona strana svitaka za petljasti dvoslojni namot s: $p = 2$, $a = 4$, $N = 18$, $u = 1$, $k = 20$, $y_1 = 5$, $y_2 = 3$, $y = 2$

eventualne mogućnosti postavljanja spojki izjednačenja nesimetričnim namotima, jer je jedini siguran i razuman pristup analiza konstrukcijom vektorskih mnogokuta napona. U praktičkim problemima upotrebe nesimetričnih namota, mogućnost postavljanja spojki izjednačenja ima dominantnu ulogu pa ćemo se tom pristupu vratiti u devetom poglavlju.

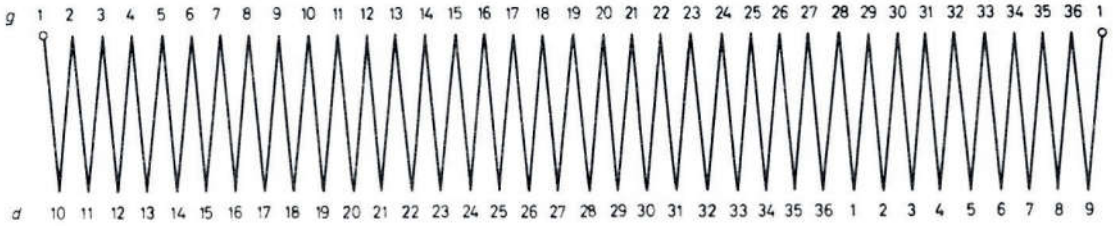
3.2.5. Stepeničasti namot

Ostaje još neriješeno pitanje stepeničastoga petljastog namota. Takav je namot moguć samo pri izvedbi stroja u kojem ima više od jednog svitka u utoru, tj. kad je:

$$u > 1 \text{ i posljedično } \frac{y_1}{u} \neq \text{cijeli broj.}$$

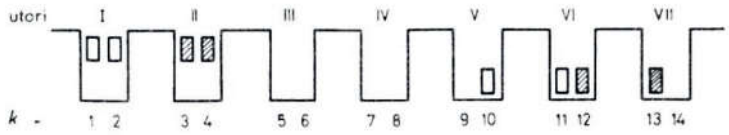
Kad ima više svitaka u utoru, moguća su u principu dva slučaja. Prvi je kad svi svici koji iziđu iz jednog utora završe opet u jednom utoru; to je primjer običnog namota. Drugi slučaj je kad se svici koji izlaze iz jednog utora podijele tako da završe u dva razna utora. Pokažimo to na primjeru. Podaci jednovojnoga petljastog namota neka budu $p = 2$, $N = 18$ i $u = 2$ pa je tada $k = uN = 36$. Izvedimo dijametralni korak jer se upravo on može izvesti:

$$y_1 = \frac{k}{2p} = \frac{36}{4} = 9.$$



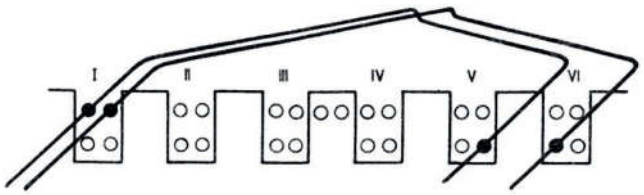
Sl. 17. Shema petljastoga stepeničastog namota s podacima: $p = 2$, $N = 18$, $u = 2$, $k = 36$, $y_1 = 9$, $y_2 = 8$, $y = 1$

Odaberimo $y_2 = 8$ i $y = 9 - 8 = 1$. Na slici 17. nacrtana je shema namota. Na slici 18. shematski je presjek kroz nekoliko prvih utora, a na slici 19. skiciran je prostorni put vodiča. Vidi se da od dva svitka koji izlaze iz prvog utora jedan prolazi petim, a drugi šestim utorom.



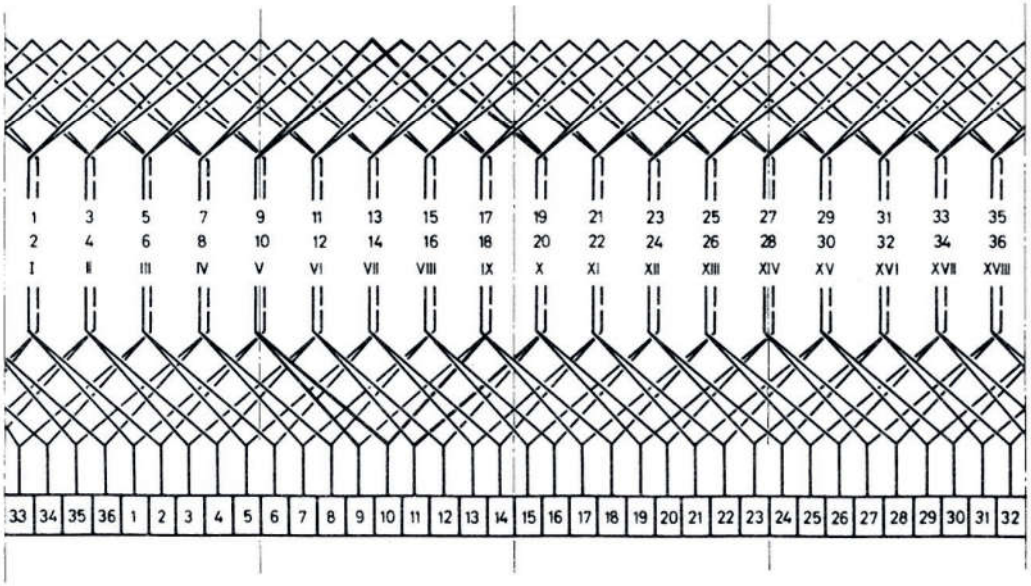
Sl. 18. Shematski presjek utora namota za stroj sa slike 17.

Stepeničasti namot ima stanovite prednosti za postizanje dobre komutacije, na što ćemo se još vratiti. No iz tehnoloških razloga izrade on je vrlo teško izvediv kad svitak ima više vodiča, pa se redovno izvodi samo kao štapni namot. Na slici 20. prikazana je kompletna razvijena shema namota koji obrađujemo. Razumljivo je kakve teškoće nastupaju prilikom izoliranja svitaka ako nije riječ o štapnom namotu, već o namotu s više vodiča, koji nije vezan u glavama namota.



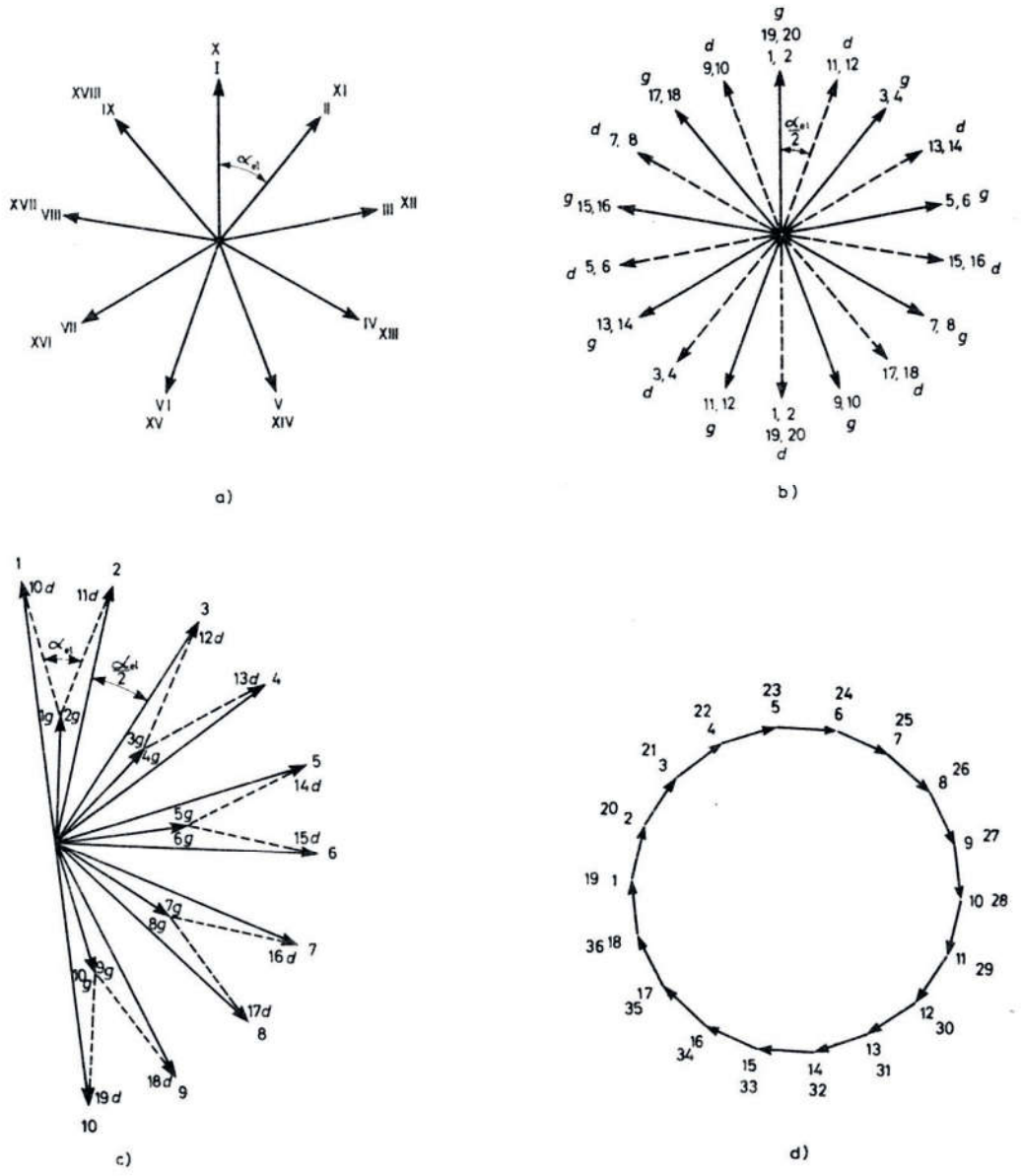
Sl. 19. Skica prostornog puta vodiča namota stroja sa slike 17.

Stroj sa stepeničastim namotom ima još i nekih drugih fizikalnih prednosti osim uvjeta za dobru komutaciju, kao što je (neznatno) bolje ulančenje magnetskog toka i manja valovitost istosmjernog napona. Razmotrimo to na primjeru namota sa slika 17. i 20. Pri analizi uz pomoć vektorske zvijezde i vektorskog mnogokuta napona potrebno je uzeti u obzir činjenicu da naponi svitaka koji počinju u jednom utoru nisu jednaki po kutu (a u općem slučaju ne moraju biti jednaki ni po iznosu, što ovdje nije tako). Na slici 21.a nacrtana je vektorska zvijezda napona utora stroja sa slika od 17. do 20. s električkim kutom $\alpha_{el} = 40°$. Na slici 21.b vektorska je zvijezda napona strana svitaka, na kojoj se vidi da su, zbog stepeničastog namota, vektori pojedinih strana svitaka pomaknuti za električki kut $\alpha/2 = 20°$. Na slici 20.c sabrani su naponi vektora *strana svitaka* (redoslijedom sa sl.17) u vektore *svitaka* koji oblikuju vektorsku zvijezdu napona svitaka, što je nacrtano za samo deset prvih svitaka da se dobije



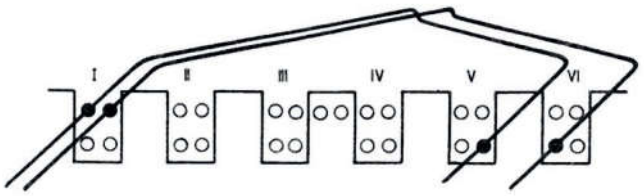
Sl. 20. Potpuna shema stepeničastog namota za stroj sa slike 17.

osnovni uvid. Bitno je da su i vektori napona strana svitaka razmaknuti samo za električki kut $\alpha/2$. Jer, kad se iz tih vektora svitaka sastavi vektorski mnogokut napona stroja, kako je i učinjeno na slici 21.d, ima taj mnogokut dvostruko veći broj stranica nego što bi ih imao da je stroj koji promatramo bio izveden s običnim, nestepeničastim namotom. Konkretno, da je stroj, kojeg je shema namota na slici 20, izveden s drukčijim spojnim korakom $y_2 = 8$ ili 10, tako da namot bude obični nestepeničasti, imao bi vektorski mnogokut napona svitaka devet stranica, a budući da je izveden (sa spojnim korakom $y_2 = 9$) kao stepeničast, ima 18 stranica. To je razlog manjoj valovitosti napona strojeva sa



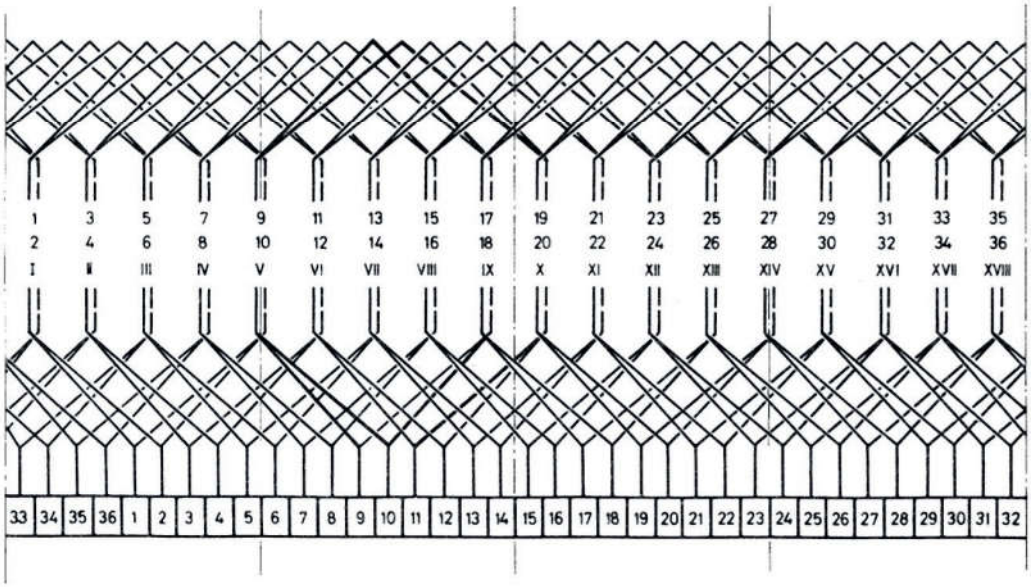
Sl. 21. a) Vektorska zvijezda utorskih napona za četveropolni stroj s 18 utora b) vektorska zvijezda napona strana svitaka za stepeničasti namot prema slici 17, odnosno 20; označeni vektori napona (pod samo jednim parom polova) c) vektorska zvijezda napona svitaka za namot prema slici 17, odnosno 20; nacrtan dio vektorske zvijezde za samo deset prvih svitaka d) vektorski mnogokut napona namota sa slike 17, odnosno 20.

Stepeničasti namot ima stanovite prednosti za postizanje dobre komutacije, na što ćemo se još vratiti. No iz tehnoloških razloga izrade on je vrlo teško izvediv kad svitak ima više vodiča, pa se redovno izvodi samo kao štapni namot. Na slici 20. prikazana je kompletna razvijena shema namota koji obrađujemo. Razumljivo je kakve teškoće nastupaju prilikom izoliranja svitaka ako nije riječ o štapnom namotu, već o namotu s više vodiča, koji nije vezan u glavama namota.



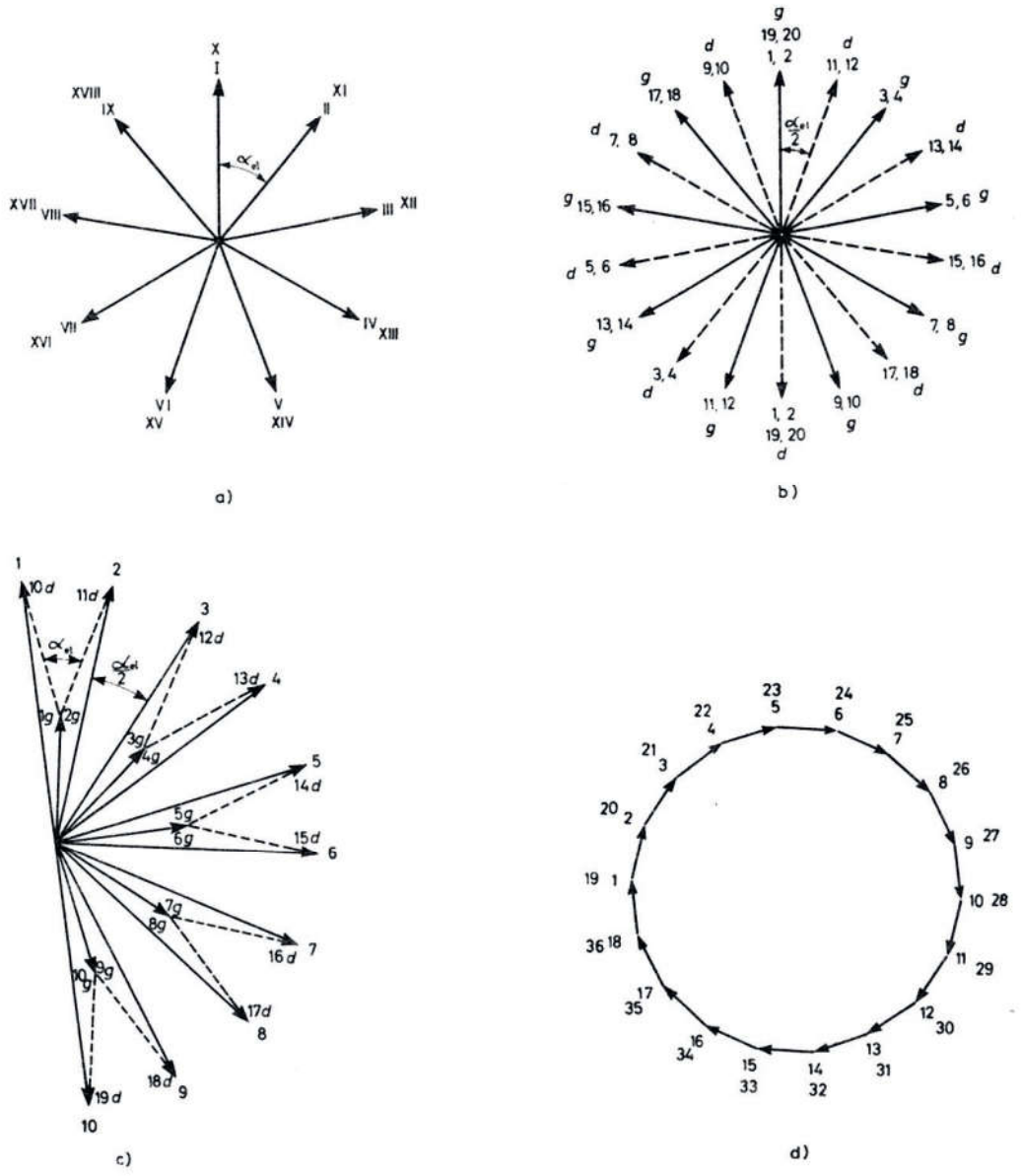
Sl. 19. Skica prostornog puta vodiča namota stroja sa slike 17.

Stroj sa stepeničastim namotom ima još i nekih drugih fizikalnih prednosti osim uvjeta za dobru komutaciju, kao što je (neznatno) bolje ulančenje magnetskog toka i manja valovitost istosmjernog napona. Razmotrimo to na primjeru namota sa slika 17. i 20. Pri analizi uz pomoć vektorske zvijezde i vektorskog mnogokuta napona potrebno je uzeti u obzir činjenicu da naponi svitaka koji počinju u jednom utoru nisu jednaki po kutu (a u općem slučaju ne moraju biti jednaki ni po iznosu, što ovdje nije tako). Na slici 21.a nacrtana je vektorska zvijezda napona utora stroja sa slika od 17. do 20. s električkim kutom $\alpha_{el} = 40°$. Na slici 21.b vektorska je zvijezda napona strana svitaka, na kojoj se vidi da su, zbog stepeničastog namota, vektori pojedinih strana svitaka pomaknuti za električki kut $\alpha/2 = 20°$. Na slici 20.c sabrani su naponi vektora *strana svitaka* (redoslijedom sa sl.17) u vektore *svitaka* koji oblikuju vektorsku zvijezdu napona svitaka, što je nacrtano za samo deset prvih svitaka da se dobije



Sl. 20. Potpuna shema stepeničastog namota za stroj sa slike 17.

osnovni uvid. Bitno je da su i vektori napona strana svitaka razmaknuti samo za električki kut $\alpha/2$. Jer, kad se iz tih vektora svitaka sastavi vektorski mnogokut napona stroja, kako je i učinjeno na slici 21.d, ima taj mnogokut dvostruko veći broj stranica nego što bi ih imao da je stroj koji promatramo bio izveden s običnim, nestepeničastim namotom. Konkretno, da je stroj, kojeg je shema namota na slici 20, izveden s drukčijim spojnim korakom $y_2 = 8$ ili 10, tako da namot bude obični nestepeničasti, imao bi vektorski mnogokut napona svitaka devet stranica, a budući da je izveden (sa spojnim korakom $y_2 = 9$) kao stepeničast, ima 18 stranica. To je razlog manjoj valovitosti napona strojeva sa



Sl. 21. a) Vektorska zvijezda utorskih napona za četveropolni stroj s 18 utora b) vektorska zvijezda napona strana svitaka za stepeničasti namot prema slici 17, odnosno 20; označeni vektori napona (pod samo jednim parom polova) c) vektorska zvijezda napona svitaka za namot prema slici 17, odnosno 20; nacrtan dio vektorske zvijezde za samo deset prvih svitaka d) vektorski mnogokut napona namota sa slike 17, odnosno 20.

stepeničastim namotom. Važno je napomenuti da se analitička ocjena stvarnih svojstava stepeničastog namota u konkretnom rješavanju nekog problema može provesti dovoljno pouzdano tek detaljnom razradom na osnovi slika vektorske zvijezde napona strana svitaka i, dalje, kako je učinjeno na slici 21. Za strojeve s običnim, nestepeničastim namotom zadovoljava i slika samo vektorske zvijezde napona utora iz koje se izravno dobiva (crta) vektorski mnogokut napona stroja.

3.3. Valoviti namoti

Princip valovitog namota prikazuje već slika 3.1–8. Bitna je razlika u namatanju valovitog namota prema petljastome u tome što se spojni korak ne vraća, nego produžava smjer kretanja koraka svitka. Električki to znači da se jedna grana valovitog namota ne nalazi geometrijski samo pod jednim parom polova, kako je to u petljastog namota, već se nalazi pod svim polovima, jer svakim novim korakom namota, prema relaciji (3.1–5), dolazi pod idući par polova. Prema tome se napon u svakoj grani valovitog namota inducira pod svim polovima, a ne samo pod jednim. To uzrokuje cijelo mnoštvo karakterističnih razlika u usporedbi s petljastim namotom.

Uvjeti simetrije valovitog namota su, zbog upravo iznijetoga, dijelom drukčiji nego kod petljastoga. Dok je tamo dodatno bila potrebna simetrija namota pod polovima, ovdje je samo simetrija među pojedinim granama namota, upravo zato što su sve grane pod svim polovima. To je glavni uzrok što su dovoljni osnovni uvjeti simetrije (3.1–6), (3.1–7) i (3.1–8), tj. omjeri $\frac{k}{a}$, $\frac{N}{a}$ i $\frac{p}{a}$ moraju biti cijeli brojevi. Razlog zbog kojega se tim uvjetima postiže dovoljno dobar odnos geometrijske raspodjele valovitog napona u magnetskom polju, uočit će se jasnije tokom daljnje razrade.

Uvodno smo o namotima rekli kako je, s gledišta induciranja što većega napona, povoljno da korak svitka y_1 bude 180 električkih stupnjeva. Uz isti spojni korak bio bi korak namota y na osnovi relacije (3.1–5) 360° ili, računato u broju lamela k:

$$y = \frac{k}{p} \quad \text{ili} \quad py = k. \tag{1}$$

Kad bismo namot izveli uz taj uvjet, zatvorio bi se on sam u sebe već nakon prvog obilaska armature, a to ne želimo. Iz toga izlazi da bi se namot *raspao* u velik broj paralelnih grana, od kojih većina uopće ne bi bila galvanski vezana na četkice. Da postignemo višestruko obilaženje armature prije nego se namot zatvori sam u sebe, potrebno je da on nakon prvog obilaska dođe u neki od početnoj strani svitka susjednih položaja, recimo u prvi položaj ispred početnoga ili iza njega. Naš upravo napisani uvjet za dijametralni korak moramo napustiti uz citirani uvjet susjedstva, tj. produkt py moramo povećati ili smanjiti za 1. Dobivamo $py = k \pm 1$ i odatle korak namota:

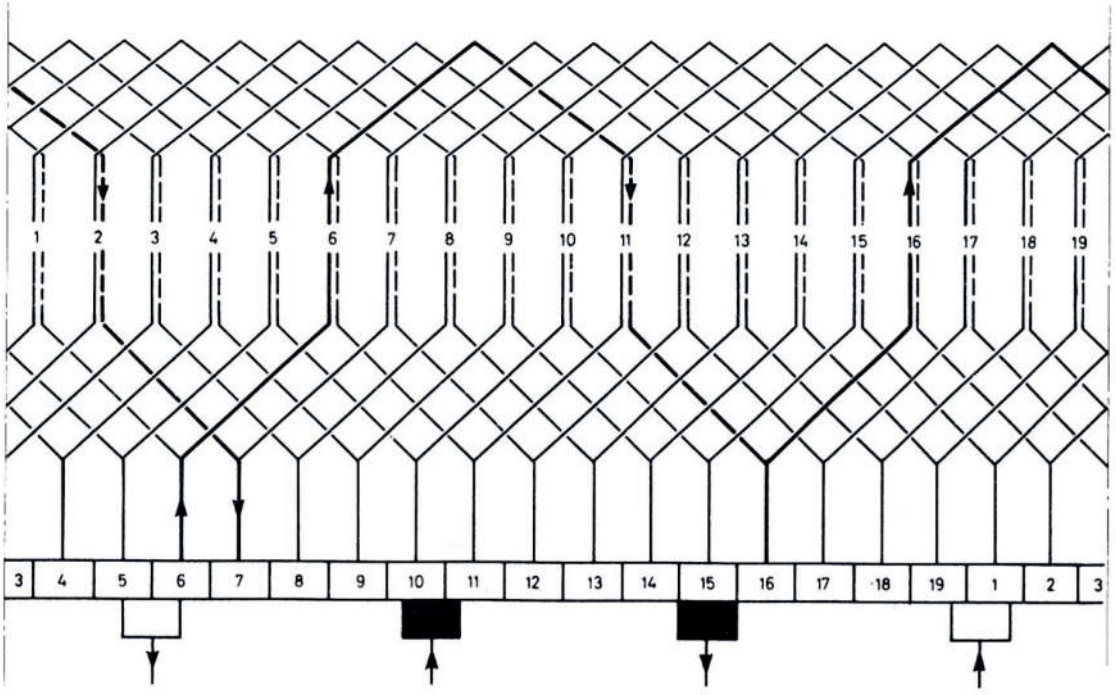
$$y = \frac{k \pm 1}{p}. \tag{2}$$

3.3.1. Valoviti križani namot

Razmotrimo primjer uz ispunjenje uvjeta (2), ali tako da unaprijed ne određujemo svojstva namota. Za četveropolni stroj podaci su $p = 2$, $N = 19$, $u = 1$ i $k = 19$, pa je:

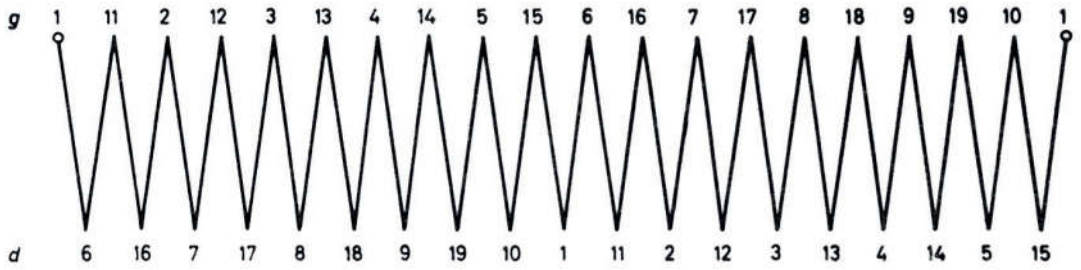
$$y = \frac{19 \pm 1}{2} = 10 \quad \text{ili} \quad 9,$$

što ovisi o upotrijebljenom predznaku. Odlučimo se za korak namota $y = 10$, što odgovara predznaku plus. S korakom namota $y_1 = 5$ i spojnim korakom $y_2 = 5$, prema jednadžbi (3.1–5) nacrtan je namot na slici 1. Po definiciji o *ukrštavanju* početne glave s vodičem spojnog koraka možemo odmah utvrditi da je to križani namot. Počevši namatanje iz lamele 6 na slici 1, preko strana svitaka 6*g*, 11*d*, 16*g* i 2*d* dolazimo spojnim korakom u lamelu 7, prekriživši pri tome glavu svitka 6. Razlika je prema petljastome križanom namotu u tome što se kretanje (pomicanje) susjednog svitka događa u suprotnom smislu. To je razumljivo jer vodič spojnog koraka dolazi iz smjera suprotnoga onome kod petljastog namota. Kao drugo, želimo zaključiti je li to jednovojni ili viševojni namot. Iako bi se po analogiji moglo zaključiti da je riječ o jednovojnom namotu, ovdje ćemo taj izraz izbjegavati da ne nastane pomutnja, jer smo više puta obilazili armaturu dok se nisu svi položaji svitaka popunili i namot se sam u sebe zatvorio. To bi prema pojmovima o petljastom namotu upućivalo na višević nost. Zato za početak radije govorimo o jedanput u sebe zatvorenom namotu, koji po svojim svojstvima među valovitim namotima odgovara jednovojnom među petljastim namotima. Kao treće, zanimljivo je pitanje koliko ima paralelnih grana. Položimo četkice na



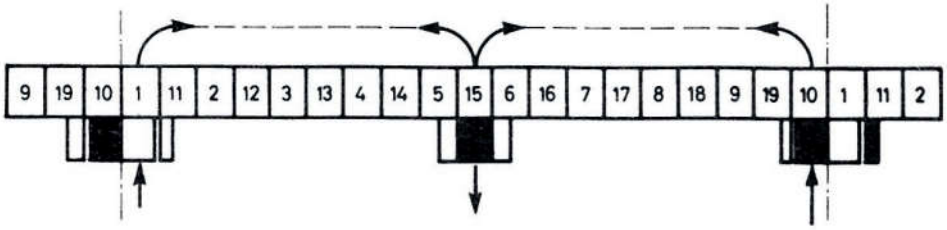
Sl. 1. Shema valovitoga križanog namota s podacima: $p = 2$, $N = 19$, $u = 1$, $k = 19$, $y_1 = 5$, $y_2 = 5$, $y = 10$

kolektor u nekome po volji odabranom trenutku vrtnje, kako je to označeno na slici 1, i označimo ulaz i izlaz struje. Prati li se namot tokom struje, izgleda da ima samo jedan par paralelnih grana! Da se u to još zornije uvjerimo, nacrtana je na slici 2. pojednostavnjena shema namota, koja točno prikazuje galvansku vezu i redoslijed svitaka u namotu. Po tom redoslijedu i lamele su poredane na slici 3. jer



Sl. 2. Pojednostavnjena shema namota sa slike 1.

one tim galvanskim redoslijedom upravo nailaze, iako su prostorno drukčije poredane (kao na sl. 1). Prenesemo li sasvim vjerno taj raspored četkica sa slike 1, postaje sasvim očito da namot ima samo dvije paralelne grane, dakle $a = 1$. Štoviše, mogli bismo čak ukloniti jedan par četkica, pa da se na električnom spoju ništa ne dogodi. Kratkim razmišljanjem dolazimo do zaključka da se ni kod namota za šestopolne, osmopolne i višepolne strojeve takva slika ne bi u principu promijenila, već bi se samo daljnje četkice gomilale na točkama istog potencijala.



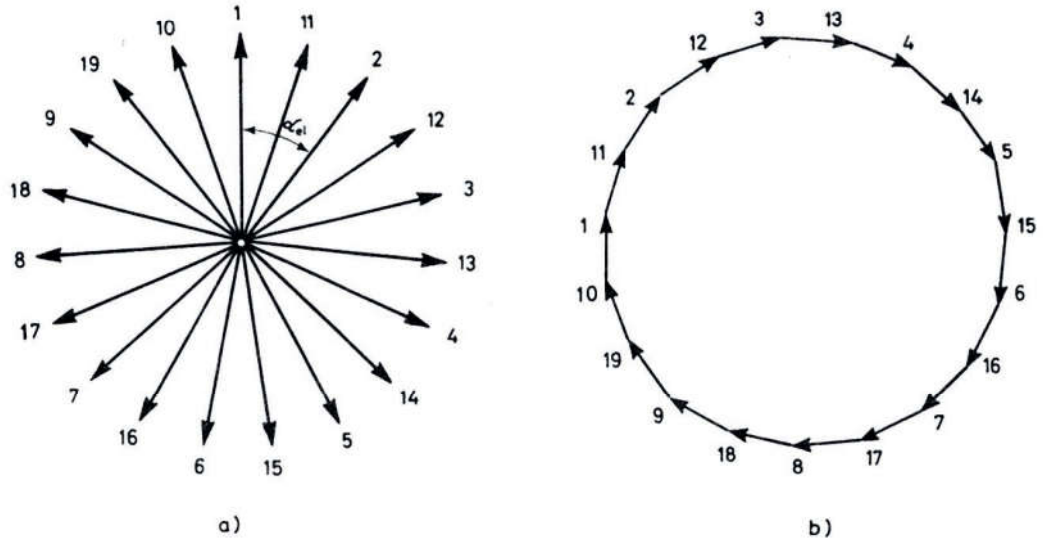
Sl. 3. Redoslijed kojim slijede galvanski spojene lamele namota iz slike 1.

Provjerimo još na pouzdan način uz pomoć vektorske zvijezde i vektorskog mnogokuta napona nacrtanih na slici 4. Vektorska zvijezda na slici 4.a predočena je uz električki kut $\alpha_{el} = 2 \cdot 360/19 = 37{,}89°$, pa je redoslijedom spajanja sa slike 2. nacrtan vektorski mnogokut napona svitaka na slici 4.b. Na temelju cijeloga ovog prikaza možemo izvući tri važna zaključka za valovite namote:

- broj paralelnih grana neovisan je o broju pari polova p;
- stroju s valovitim namotom dovoljan je svega jedan par četkica pa da namot bude ispravno galvanski spojen;
- struja četkica ovisi samo o broju četkica.

Zbog trećeg zaključka ipak se u većini izvedbi postavljaju četkice u sve neutralne zone, kako bi se smanjila dužina kolektora.

Možemo još ustanoviti da je razmatrani namot simetričan prema kriterijima (3.1–6), (3.1–7) i (3.1–8) jer je $a = 1$.



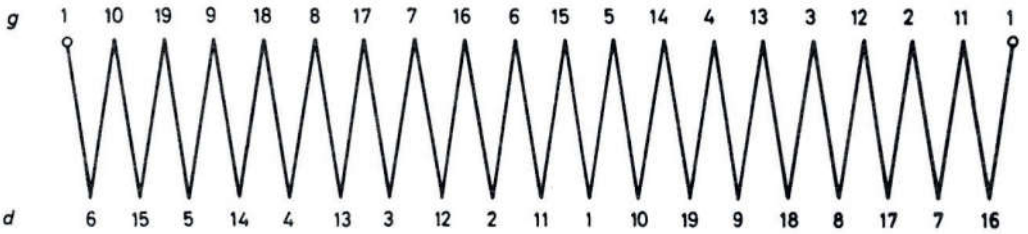
Sl. 4. a) Vektorska zvijezda napona utora za stroj s: $p = 2$, $N = 19$, $u = 1$ b) Vektorski mnogokut napona svitaka za valoviti namot s podacima: $p = 2$, $a = 1$, $N = 19$, $u = 1$, $k = 19$, $y_1 = 5$, $y_2 = 5$, $y = 10$, tj. za namot sa slike 1.

3.3.2. Valoviti nekrižani namot

Za daljnji primjer uzmimo namot istih osnovnih podataka: $p = 2$, $N = 19$, $u = 1$, $k = 9$, samo odaberimo negativan predznak pri određivanju koraka namota, dakle:

$$y = \frac{19 - 1}{2} = 9.$$

Za korak svitka $y_1 = 5$ i spojni korak $y_2 = 4$ nacrtana je pojednostavnjena shema na slici 5. Taj je namot po svim svojstvima jednak prethodnome, samo je nekrižani, što se vidi po razlici smjera kretanja na slikama 3. i 5. To možemo zaključiti i po ovome: nakon obilaska armature dolazimo u položaj svitka prije početnoga, pa neće nastati ukrštanje glave početnog svitka s vodičem spojnog



Sl. 5. Pojednostavnjena shema valovitoga nekrižanog namota s podacima: $p = 2$, $a = 1$, $N = 19$, $u = 1$, $k = 19$, $y_1 = 5$, $y_2 = 4$, $y = 9$

koraka. Prema već rečenome o križanim i nekrižanim namotima, razlikuju se namoti iz obrađena dva primjera samo po suprotnim smjerovima induciranih napona i zakretnih momenata.

3.3.3. Paralelne grane valovitih namota

Postavlja se pitanje kako izvesti valovitom namotu više paralelnih grana od minimalne dvije. Petljastome se to postizalo spojnim korakom koji se nije vraćao u prvi susjedni, nego u drugi, treći, općenito y-ti položaj svitka prema početnome, kad se htio postići y-vojni namot i time y puta veći broj paralelnih grana. Sigurno se odgovarajućim zahvatom i za valoviti namot mora postići sličan rezultat. U dosadašnjim primjerima nakon prvog obilaska armature vraćao se namot u početnom svitku susjedni položaj, formirajući korak namota po jednadžbi:

$$y = \frac{k \pm 1}{p}.$$

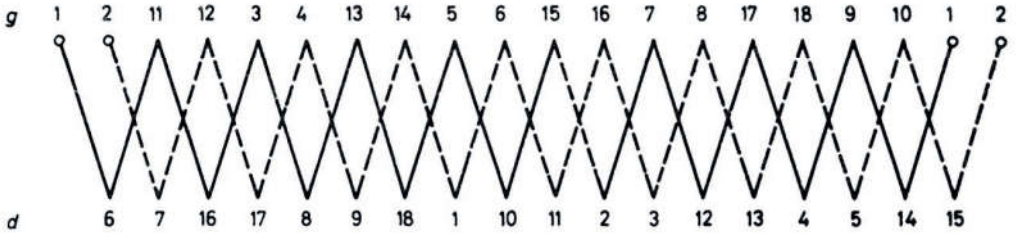
Zamijenimo li u toj relaciji 1 s a, gdje a znači cijeli pozitivan broj, očito je da ćemo se nakon prvog obilaska armature s tako definiranim namotom vratiti u a-ti položaj svitka – gledano od početnoga. Zamijenimo, dakle, (2) sa:

$$y = \frac{k \pm a}{p} \tag{3}$$

i pokušajmo riješiti jedan namot za primjer. Podaci su $p = 2$, $N = 18$, $u = 1$ i $k = 18$. Za a odaberimo $a = 2$, pa prema jednadžbi (3) izlazi:

$$y = \frac{18 \pm 2}{2} = 10 \text{ ili } 8, \text{ već prema predznaku.}$$

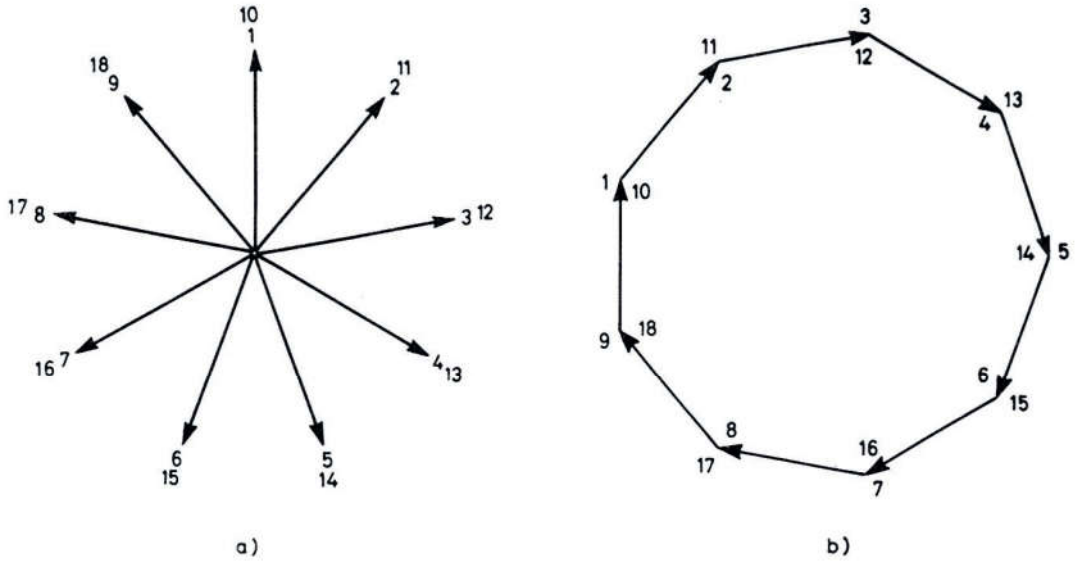
Pokušajmo nacrtati pojednostavnjenu shemu namota, uz odabrano $y = 10$ i $y_1 = y_2 = 5$. Rezultat je na slici 6. Nakon nekoliko obilazaka počevši iz gornjeg sloja utora 1, zatvori se namot sam u sebe (puno izvučeni dio namota), ostavljajući



Sl. 6. Pojednostavnjena shema valovitoga dvovojnog namota s podacima: $p = 2$, $a = 2$, $N = 18$, $u = 1$, $k = 18$, $y_1 = 5$, $y_2 = 5$, $y = 10$

polovicu prostora neispunjenom, i to tako raspoređenom u utorima da stane upravo još jedan isti takav namot, kako je na slici crtkano uneseno. Namot je dva puta zatvoren sam u sebe i ima dva para paralelnih grana. Da smo za a uzeli brojku 3 umjesto 2, dobili bismo tri para paralelnih grana. Kod valovitog namota dobivamo onoliko pari paralelnih grana koliko iznosi a u jednadžbi (3). Zato je i

upotrijebljena oznaka a, već prije uvedena za broj pari paralelnih grana, jer je upravo o toj veličini u relaciji (3) i riječ. Prema tome je jednadžba (3) osnovna jednadžba za postavljanje valovitih namota. Predznaci plus i minus mjerodavni su samo za smjer induciranog napona. Upravo iz tog razloga uvriježilo se u tehničkoj praksi nazivati takav namot dvovojnim, a onaj sa slika od 1. do 4. jednovojnim prema formalnoj analogiji s petljastim namotima. Iako su prema definiciji uvedenoj pri razmatranju petljastih namota oba viševojna, s gledišta tehnike namatanja povećanja broja paralelnih grana valovitom namotu postiže se upravo jednakim postupkom kao za petljaste namote, tj. odabiranjem u koji će se od susjednih slobodnih položaja vratiti namot nakon obilaska rotora. Namot sa slike 6. je simetričan, ne samo zbog udovoljavanja općim kriterijima simetričnosti (3.1–6), (3.1–7) i (3.1–8) već se to vidi i na slici 7, gdje su nacrtani vektorska



Sl. 7. a) Vektorska zvijezda napona utora četveropolnog stroja s $N = 18$ i $p = 2$
b) Vektorski mnogokut napona svitaka za dvovojni valoviti namot s podacima: $p = 2$, $a = 2$, $N = 18$, $u = 1$, $k = 18$, $y_1 = 5$, $y_2 = 5$, $y = 10$

zvijezda napona utora (sl. 7 a) i vektorski mnogokut napona svitaka (sl. 7.b). Dakle, među valovitim viševojnim namotima ima i pravih simetričnih dvovojnih namota (čega među petljastima dvovojnim nema). Vidi se sa slike 7.b da svakom od vektora svitaka prvog ovoja (na slici označeni izvan mnogokuta) odgovara po jedan od vektora svitaka jednakog potencijala u drugom ovoju (na slici označeni u mnogokutu).

Broj pari paralelnih grana ne određuje još koliko je puta valoviti namot sam u sebe zatvoren. On može biti a puta u sebe zatvoren, ali i manje. Kao i petljastom namotu, pitanje simetričnosti nije vezano za to svojstvo. Nesimetrični viševojni valoviti namoti (namoti više od jednog para paralelnih grana) nerado se izvode kod većih i opterećenijih strojeva, jer nema mogućnosti postavljanja spojki izjednačenja prve vrste, tj. spojki izjednačenja koje se ugrađuju samo s jedne strane rotora, već se mogu ugraditi samo spojke druge vrste.

3.3.4. Spojke izjednačenja valovitih namota

Jednovojnome valovitom namotu ne trebaju spojke izjednačenja jer ima samo jedan par paralelnih grana, $a = 1$, a ne mogu mu se, dakako, ni postaviti. Tek za dvovojne i trovojne namote (4-vojni i viševojni se i ne grade) postaje pitanje zanimljivo. Naime, glavni razlog postavljanju spojki za izjednačenje petljastim namotima, tj. magnetske nesimetrije pod raznim polovima, otpada za valovite namote jer im se svaka od paralelnih grana nalazi pod svim polovima i magnetske nesimetrije praktički ne mogu izazvati razlike potencijala. No ostali razlozi za postavljanje spojki izjednačenja pri $a > 1$, tehničke tolerancije dimenzija vodiča i vodljivosti namota te nejednolikosti pri izradi stroja (tolerancije izrade) znaju izazvati zamjetno različite otpore paralelnih grana, pa različite struje u granama i, konačno, struje izjednačenja među granama. Ti razlozi, u principu dosta manje značajni od razloga magnetskih nesimetrija, kvantitativno su više izraženi kod valovitih nego kod petljastih namota. Kao što smo ustanovili, četkice strojeva s valovitim namotom grupiraju se (približno) u dvije točke potencijala namota (načelno se to vidi na sl. 3), pa je dužina vodiča paralelne grane valovitom namotu znatno veća nego petljastome, posebno uspoređuju li se strojevi s mnogo polova. Slično tome je i s pitanjem eventualnoga povišenoga prelaznog otpora na četkicama neke paralelne grane valovitog napona koja može izazvati smanjenu struju u toj grani. Ta je pojava bila nebitna za petljasti namot kratkih paralelnih grana, a mnogo je značajnija za valoviti namot s dugačkim paralelnim granama. Ne ulazeći u točniji opis mehanizma te pojave (on se može vidjeti iz literature [L 5 i 56]), napominjemo da taj razlog i prije spomenuti razlog nejednakih otpora paralelnih grana zahtijevaju ugradnju spojki izjednačenja valovitim viševojnim namotima s istim značajem koje je to pitanje imalo za petljaste namote. Moramo ih ugrađivati gdje je to moguće (simetričnim namotima) da ne dođe do nejednolikih opterećenja grana, odnosno pregrijavanja namota i pogoršavanja komutacije. Kriterij za polaganje spojki izjednačenja jednak je onome za petljasti namot. Maksimalni mogući broj spojki izjednačenja bit će:

$$N_{\text{spmax}} = \frac{k}{a}, \tag{4}$$

a korak spojke iznosi:

$$y_{\text{sp}} = \frac{k}{a}. \tag{5}$$

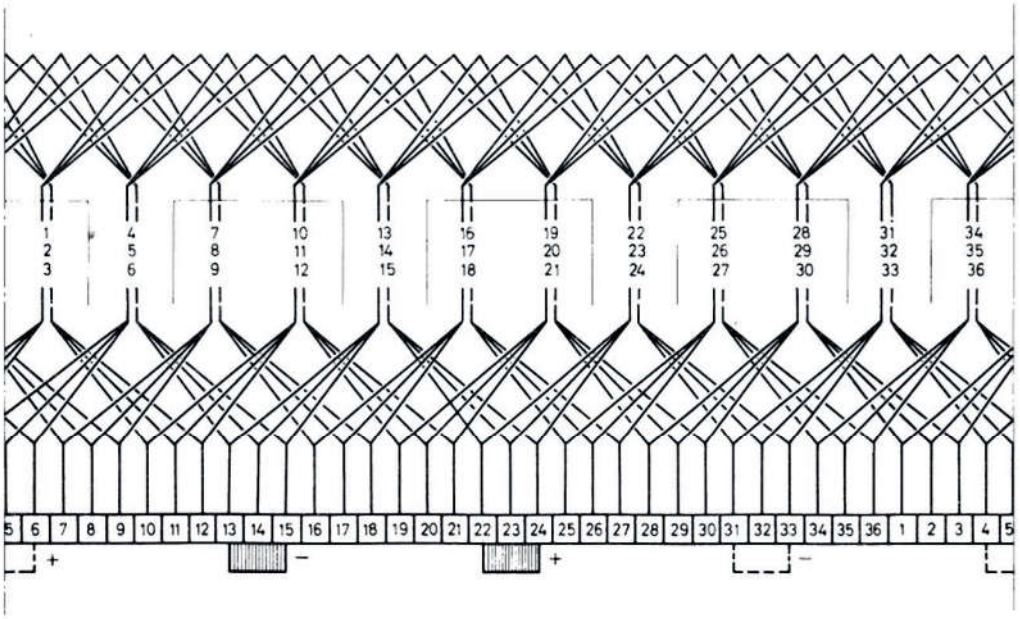
3.3.5. Stepeničasti valoviti namoti

Iako je problematika stepeničastih valovitih namota u principu jednaka onoj stepeničastih petljastih namota (naravno imajući na umu ostale razlike u svojstvima namota), ima još i općih stvari o njima koje je dobro upoznati. Posebno nismo dosad razmotrili namot s vektorima napona svitaka različitog iznosa, zbog različitih koraka svitka, i to za svitke kojima se početne strane nalaze

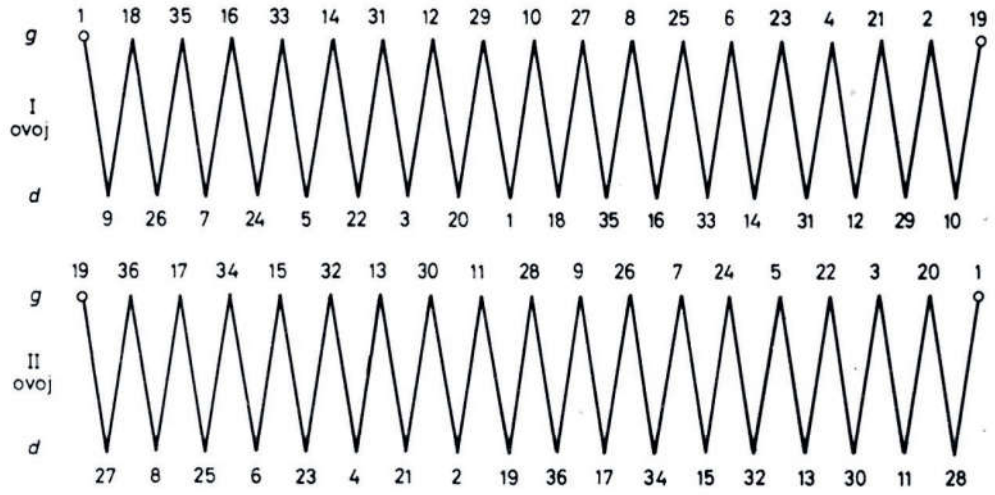
u jednom utoru. Razmotrimo to pitanje na primjeru valovitoga dvovojnog stepeničastog namota s tri svitka po utoru, $u = 3$. Podaci su namota: $p = 2$, $a = 2$, $N = 12$, $u = 3$ i $k = 36$. Pokušajmo izračunati korak namota:

$$y = \frac{k \pm a}{p} = \frac{36 \pm 2}{2} = 19 \text{ ili } 17.$$

Odabravši korak svitka $y_1 = 8$ i spojni korak $y_2 = 9$ dobivamo stepeničasti namot kojemu od tri polazne (gornje) strane svitka u prvom utoru, jedna povratna (donja) strana svršava u trećemu, a dvije u četvrtom utoru. Kompletna spojna shema nacrtana je na slici 8. Namot je inače simetričan jer udovoljava kriterijima iz relacija (3.1 – 6), (3.1 – 7) i (3.1 – 8) i jedanput je zatvoren sam u sebe.

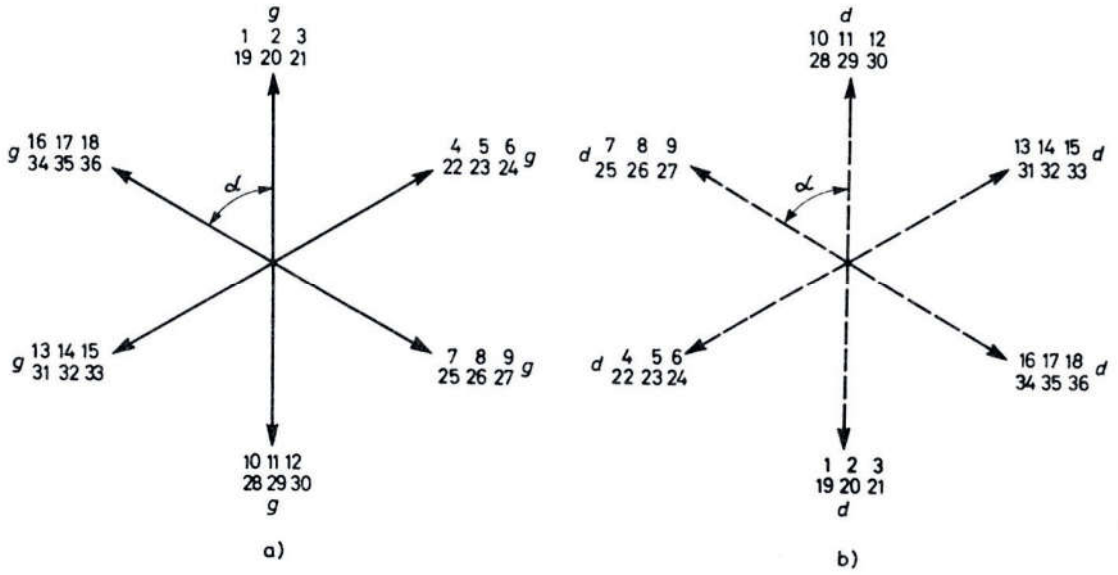


Sl. 8. Shema dvovojnoga valovitog stepeničastog namota s podacima: $p = 2$, $a = 2$, $N = 12$, $u = 3$, $k = 36$, $y_1 = 8$, $y_2 = 9$, $y = 17$



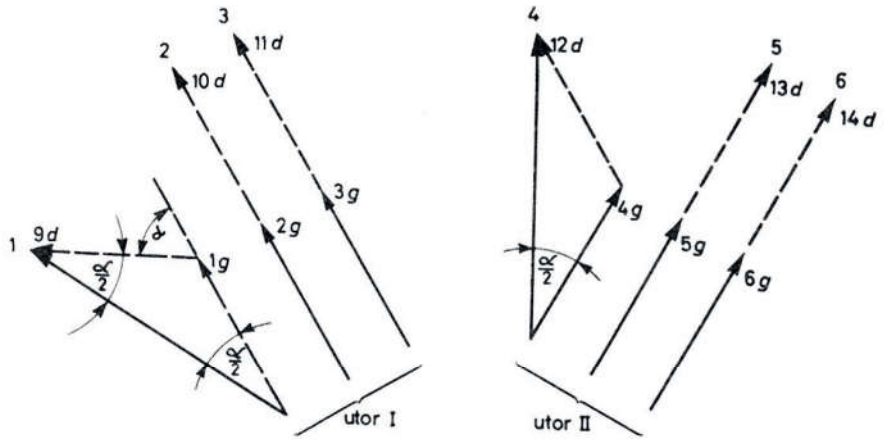
Sl. 9. Pojednostavnjena shema namota sa slike 8. sa spojem svitaka dvaju slojeva; namot je jedanput zatvoren sam u sebe

To se bolje vidi na pojednostavnjenoj spojnoj shemi (kao uostalom i spoj svitaka i vodiča) na slici 9. Električki kut među vektorima napona prema jednadžbi (3.1 – 3) iznosi $\alpha_{el} = 60°$. Da se dođe do vektorskog mnogokuta napona stroja i potvrde njegova svojstva, potrebno je najprije nacrtati vektorsku zvijezdu utora, što je i učinjeno na slici 10. Na slici 10.a označeni su smjerovi vektora strana svitaka



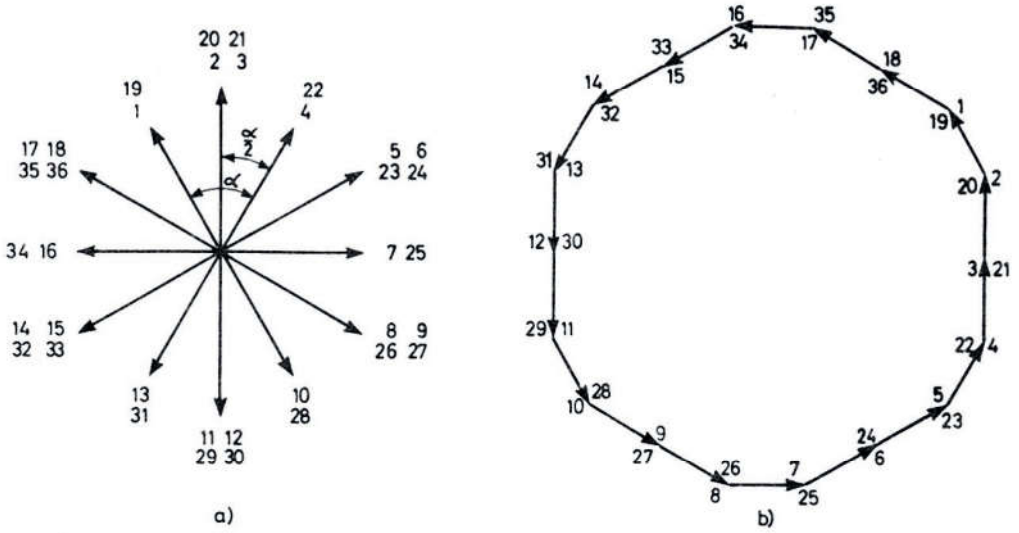
Sl. 10. Vektorska zvijezda napona utora četveropolnog stroja s 12 utora i tri svitka po utoru: a) vektori napona gornjih strana svitaka; b) vektori napona donjih strana svitaka za namot s podacima prema slici 8.

gornjeg sloja namota, a na slici 10.b donjeg sloja namota. Uzevši u obzir strane svitaka koje zajednički tvore svitak, a prema koraku svitka i spojnom koraku, tj. shemi spajanja, nacrtani su vektori svitaka kojih se gornje strane nalaze u prva dva utora stroja. Vidimo dvije značajne činjenice. Naponi su svitaka dvaju različitih iznosa. Iznos napona svitaka 1 i 4 manji je od svitaka 2, 3, 5 i 6 (u ovom primjeru *školskog* stroja s malo utora manji napon iznosi svega 86,6 % većega).



Sl. 11. Naponi svitaka prvih dvaju utora namota prema slici 8.

Drugo, kut među vektorima manjeg i većeg svitka čini svega polovicu električkog kuta među vektorima utora, a kut među dva veća svitka jednak je nuli. Budući da po svakom utoru dolazi jedan svitak s kraćim (prostorno manjim) spojnim korakom, a dva svitka s dužim (prostorno većim) spojnim korakom, iako su im spojni koraci ($y_2 = 9$) *brojno* jednaki, to će se slika iz prva dva utora u principu i dalje ponavljati u narednim utorima (trećem, četvrtom itd.). Znači, namot se sastoji od 2/3 većih i 1/3 manjih vektora napona svitaka razmaknutih za kut $\alpha = 30°$ među manjim i većim vektorima i kut $\alpha = 0$ među dva veća vektora. S tim je na slici 12.a nacrtana vektorska zvijezda svitaka i onda vektorski mnogokut



Sl. 12. a) Vektorska zvijezda napona svitaka za namot prema slici 8. b) Vektorski mnogokut napona namota stroja prema slici 8. spojeno prema shemi na slici 9.

napona na slici 12.b. Simetričnost je namota očita jer svaki od vektora prvog ovoja (označen izvan mnogokuta) ima potencijal kao i jedan od vektora drugog ovoja (označeni u mnogokutu). Vektorski mnogokut napona je dvanaesterokut, jer je namot stepeničast, što je povoljnije od nestepeničastog namota, kojem bi mnogokut napona bio šesterokut. I ovaj primjer namota potvrđuje konstataciju da se točna ocjena stepeničastog namota može obaviti samo crtanjem vektorske zvijezde strana svitaka.

3.3.6. Izvedivost valovitih namota

Rezimirajući izlaganja o valovitim namotima, potrebno je istaknuti problem njihove izvedivosti. Valoviti namot u tom pogledu ima znatno više ograničenja nego petljasti. Prije svega, ne može se izvesti kao cjeloviti (vidi poslije o manjkavom namotu) namot s bilo kojim povoljnim brojem utora N i brojem svitaka po utoru u, makar napustili sve zahtjeve o simetričnosti i slično. U to ćemo se odmah uvjeriti pokušamo li izvesti najjednostavnijem četveropolnom

stroju najjednostavniji jednovojni namot uz parni broj utora. Dokažimo to iz relacije (3):

$$y = \frac{k \pm a}{p} \text{ možemo pisati } k = py \mp a = Nu$$

i dalje:

$$\frac{N}{a} = \frac{\frac{py}{a} \pm 1}{u}. \tag{6}$$

Za naš primjer ($a = 1$, $p = 2$) py je uvijek paran broj, pa je brojnik na desnoj strani neparan. Budući da N mora biti cijeli broj, to i u mora biti neparan broj, iz čega izlazi da i N mora biti neparan broj, što smo htjeli dokazati. Relacija (6) nam osim kontrole ispravnog izbora parametara daje unaprijed mnogo obavještenja o namotu. Uzmimo još jedan primjer. Osmopolni stroj ($p = 4$) valja izvesti s četiri paralelne grane ($a = 2$). Lijeva strana relacije (6) mora zbog simetrije biti cijeli broj. Zbog toga i desna strana te relacije mora biti cijeli broj, pa će N biti parni broj. Prema zadatku dobivamo $\frac{p}{a} = 2$, pa je omjer $\frac{py}{a}$ također parni broj, kakav god bio korak namota y. Zato je brojnik desne strane sigurno neparan, pa samo s neparnim nazivnikom može desna strana biti cijeli broj. To znači da broj svitaka po utoru mora biti neparan: $u = 1,3,5,...$ Dalje izlazi da broj utora N ne smije biti djeljiv s 4 jer je desna strana nužno neparan broj itd. U tablici na slici 13. pregled je izvedivosti simetričnih valovitih namota za 4–16-polne strojeve s

a ↓ \ p →	2	3	4	5	6	7	8
1	1, 3, 5	1, 2, 4, 5	1, 3, 5	1, 2, 3, 4	1, 5	1, 2, 3, 4, 5	1, 3, 5
2		—	1, 3, 5	—	1, 2, 4, 5	—	1, 3, 5
3	—		—	—	1, 3, 5	—	—
4	—	—		—	—	—	1, 3, 5

Ovo se područje zbog $p = a$ uvijek može riješiti s petljastim namotom

Sl. 13. Pregled izvedivosti valovitih simetričnih namota s obzirom na mogući broj u strana svitaka po utoru

brojem pari paralelnih grana $a = 1-4$ i s obzirom na broj svitaka po utoru do $u = 5$. Tablica pokazuje nekoliko zanimljivih činjenica. Kao jednovojni ($a = 1$) mogu se izvesti samo simetrični namoti jer su samo oni i uopće izvedivi. Za viševojne namote moguće su izvedbe nesimetričnih namota, ali je mogućnost

izvedbe simetričnih namota vrlo skučena. Apstrahirajući to da se potreba za trovojnim namotom izuzetno rijetko pojavljuje, a za četverovojnim praktički nikako, ostaje činjenica da za npr. značajnom potrebom nekih kombinacija dvovojnih namota kao što su šesteropolni i deseteropolni strojevi nema uopće nikakve mogućnosti simetrične izvedbe.

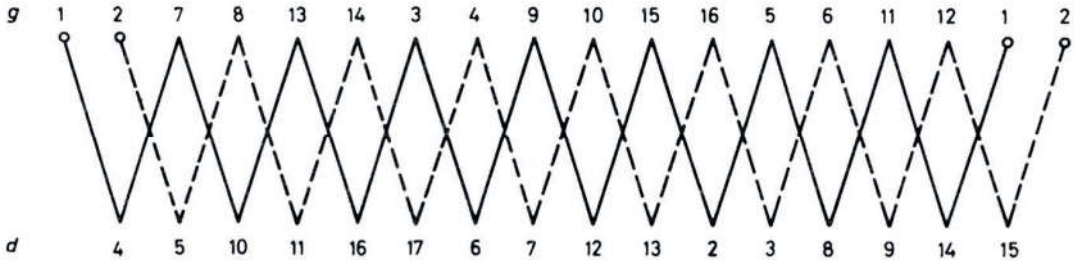
Na prvi pogled ta se situacija čini čudnom, pa izvršimo analizu za najjednostavniju (ujedno i najpotrebniju) kombinaciju šesteropolnog stroja ($p = 3$) s dvovojnim namotom ($a = 2$).

Korak namota y mora biti cijeli broj. Iz jednadžbe (3):

$$y = \frac{k \pm a}{p} \tag{3}$$

(uz $p = 3$, $a = 2$) dobivamo broj lamela $k = Nu = 3y \pm 2$, iz čega se jasno vidi da broj lamela k ne može biti djeljiv (bez ostatka) s 3 jer je $3y$ uvijek djeljivo s 3, pa to $3y \pm 2$ ne može biti. Dakle, k može biti neki iz niza prirodnih brojeva među kojima nedostaju svi oni djeljivi s 3. Označimo niz oznakom A: A) $k = Nu$ = ...10, 11, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 25, 26 itd. Iz toga neposredno izlazi da uopće nije izvediv nikakav (ni nesimetrični) namot s tri svitka po utoru ($u = 3$), jer nema broja utora N (mora biti cijeli broj) koji bi se dobio dijeljenjem bilo kojeg broja niza A brojem 3. Može se pokazati pomoću jednadžbe (6) da je za brojeve svitaka po utoru $u = 1$, 2, 4 i 5 namot u principu izvediv. Treba li udovoljiti minimalnom uvjetu simetrije, mora svakom paru paralelnih grana biti jednak broj svitaka (i kolektorskih lamela), čime se gornji niz reducira na niz B sa samo parnim brojevima: B) $k = Nu$ = ...10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34 itd. Tom nizu u usporedbi s nizom prirodnih brojeva nedostaju svi neparni brojevi i svi parni djeljivi s 3. Za niz brojeva B udovoljeno je samo jednom uvjetu simetrije, tj. da je $\frac{k}{a}$ cijeli broj. Drugi uvjet simetrije, da je i $\frac{N}{a}$ cijeli broj (pa je N parni broj zbog $a = 2$), vodi, u krajnjoj konsekvenciji do zaključka da niz brojeva utora koji dolazi u obzir može biti samo niz B, tj.:

$$N = ...8,\ 10,\ 14,\ 16,\ 20,\ 22,\ 26,\ 28,\ 32,\ \text{itd.}$$



Sl. 14. Shema valovitoga dvovojnog nesimetričnog namota s podacima: $p = 3$, $a = 2$, $N = 16$, $u = 1$, $k = 16$, $y_1 = 3$, $y_2 = 3$, $y = 6$

Pokuša li se podijeliti taj niz s p, tj. s 3, dolazi se do zaključka da nema ni jednog broja u nizu djeljivoga s 3 bez ostatka, što znači da uopće nema jednakih napona vektora utora za bilo koja dva utora. Ponovi li se pokušaj dijeljenja s $2p$, zaključuje se da nema ni dva vektora utora sa suprotnim smjerom. To je uzrok da je svaki valoviti namot uz $p = 3$ i $a = 2$ nesimetričan. Činjenica da jednake vektore napona imaju samo strane svitaka u istom utoru (uz $u \geq 2$), što može eventualno dovesti do formalno simetričnog namota, za trenutak će dovesti u zabludu, no pokazat ćemo to nešto poslije na jednom primjeru. Sad

stroju najjednostavniji jednovojni namot uz parni broj utora. Dokažimo to iz relacije (3):

$$y = \frac{k \pm a}{p} \text{ možemo pisati } k = py \mp a = Nu$$

i dalje:

$$\frac{N}{a} = \frac{\frac{py}{a} \pm 1}{u}. \tag{6}$$

Za naš primjer ($a = 1$, $p = 2$) py je uvijek paran broj, pa je brojnik na desnoj strani neparan. Budući da N mora biti cijeli broj, to i u mora biti neparan broj, iz čega izlazi da i N mora biti neparan broj, što smo htjeli dokazati. Relacija (6) nam osim kontrole ispravnog izbora parametara daje unaprijed mnogo obavještenja o namotu. Uzmimo još jedan primjer. Osmopolni stroj ($p = 4$) valja izvesti s četiri paralelne grane ($a = 2$). Lijeva strana relacije (6) mora zbog simetrije biti cijeli broj. Zbog toga i desna strana te relacije mora biti cijeli broj, pa će N biti parni broj. Prema zadatku dobivamo $\frac{p}{a} = 2$, pa je omjer $\frac{py}{a}$ također parni broj, kakav god bio korak namota y. Zato je brojnik desne strane sigurno neparan, pa samo s neparnim nazivnikom može desna strana biti cijeli broj. To znači da broj svitaka po utoru mora biti neparan: $u = 1,3,5,...$ Dalje izlazi da broj utora N ne smije biti djeljiv s 4 jer je desna strana nužno neparan broj itd. U tablici na slici 13. pregled je izvedivosti simetričnih valovitih namota za 4–16-polne strojeve s

a ↓ \ p →	2	3	4	5	6	7	8
1	1, 3, 5	1, 2, 4, 5	1, 3, 5	1, 2, 3, 4	1, 5	1, 2, 3, 4, 5	1, 3, 5
2		—	1, 3, 5	—	1, 2, 4, 5	—	1, 3, 5
3	—		—	—	1, 3, 5	—	—
4	—	—		—	—	—	1, 3, 5

Ovo se područje zbog $p = a$ uvijek može riješiti s petljastim namotom

Sl. 13. Pregled izvedivosti valovitih simetričnih namota s obzirom na mogući broj u strana svitaka po utoru

brojem pari paralelnih grana $a = 1-4$ i s obzirom na broj svitaka po utoru do $u = 5$. Tablica pokazuje nekoliko zanimljivih činjenica. Kao jednovojni ($a = 1$) mogu se izvesti samo simetrični namoti jer su samo oni i uopće izvedivi. Za viševojne namote moguće su izvedbe nesimetričnih namota, ali je mogućnost

izvedbe simetričnih namota vrlo skučena. Apstrahirajući to da se potreba za trovojnim namotom izuzetno rijetko pojavljuje, a za četverovojnim praktički nikako, ostaje činjenica da za npr. značajnom potrebom nekih kombinacija dvovojnih namota kao što su šesteropolni i deseteropolni strojevi nema uopće nikakve mogućnosti simetrične izvedbe.

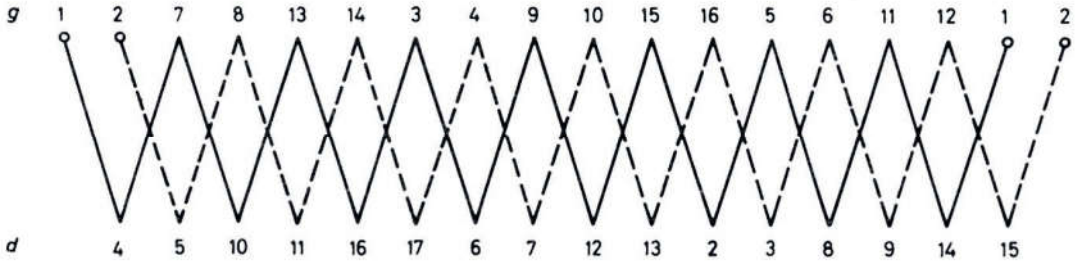
Na prvi pogled ta se situacija čini čudnom, pa izvršimo analizu za najjednostavniju (ujedno i najpotrebniju) kombinaciju šesteropolnog stroja ($p = 3$) s dvovojnim namotom ($a = 2$).

Korak namota y mora biti cijeli broj. Iz jednadžbe (3):

$$y = \frac{k \pm a}{p} \tag{3}$$

(uz $p = 3$, $a = 2$) dobivamo broj lamela $k = Nu = 3y \pm 2$, iz čega se jasno vidi da broj lamela k ne može biti djeljiv (bez ostatka) s 3 jer je $3y$ uvijek djeljivo s 3, pa to $3y \pm 2$ ne može biti. Dakle, k može biti neki iz niza prirodnih brojeva među kojima nedostaju svi oni djeljivi s 3. Označimo niz oznakom A: A) $k = Nu$ = ...10, 11, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 22, 23, 25, 26 itd. Iz toga neposredno izlazi da uopće nije izvediv nikakav (ni nesimetrični) namot s tri svitka po utoru ($u = 3$), jer nema broja utora N (mora biti cijeli broj) koji bi se dobio dijeljenjem bilo kojeg broja niza A brojem 3. Može se pokazati pomoću jednadžbe (6) da je za brojeve svitaka po utoru $u = 1$, 2, 4 i 5 namot u principu izvediv. Treba li udovoljiti minimalnom uvjetu simetrije, mora svakom paru paralelnih grana biti jednak broj svitaka (i kolektorskih lamela), čime se gornji niz reducira na niz B sa samo parnim brojevima: B) $k = Nu$ = ...10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34 itd. Tom nizu u usporedbi s nizom prirodnih brojeva nedostaju svi neparni brojevi i svi parni djeljivi s 3. Za niz brojeva B udovoljeno je samo jednom uvjetu simetrije, tj. da je $\frac{k}{a}$ cijeli broj. Drugi uvjet simetrije, da je i $\frac{N}{a}$ cijeli broj (pa je N parni broj zbog $a = 2$), vodi, u krajnjoj konsekvenciji do zaključka da niz brojeva utora koji dolazi u obzir može biti samo niz B, tj.:

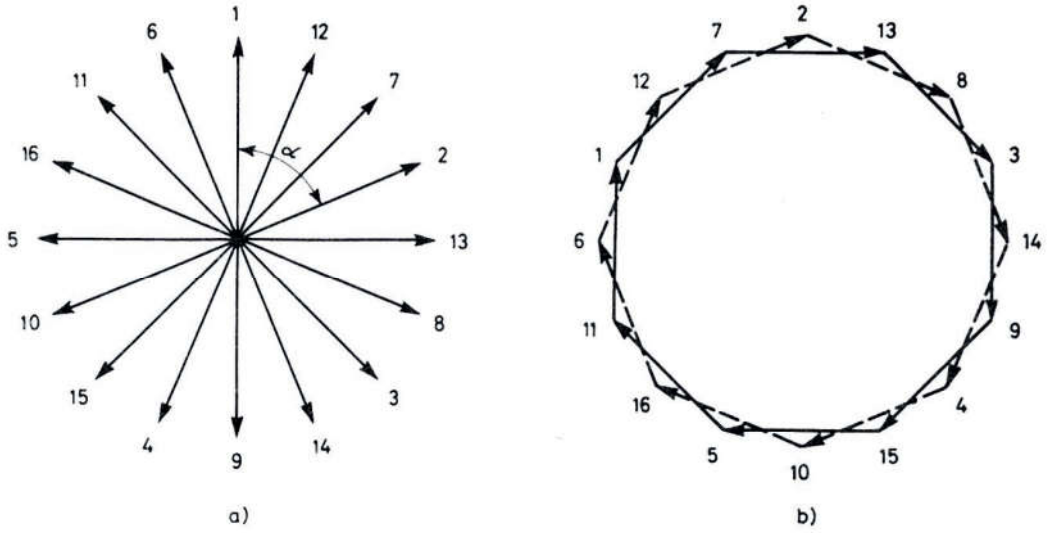
$$N = ...8,\ 10,\ 14,\ 16,\ 20,\ 22,\ 26,\ 28,\ 32,\ \text{itd.}$$



Sl. 14. Shema valovitoga dvovojnog nesimetričnog namota s podacima: $p = 3$, $a = 2$, $N = 16$, $u = 1$, $k = 16$, $y_1 = 3$, $y_2 = 3$, $y = 6$

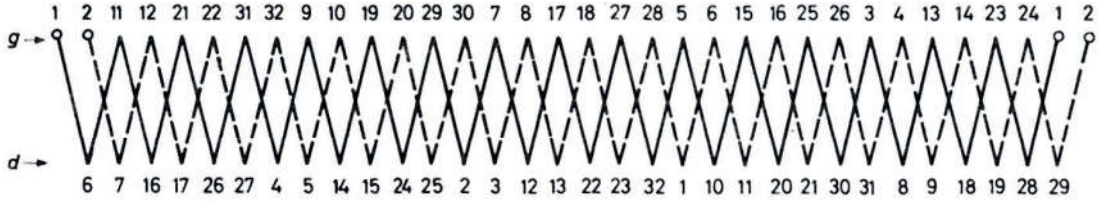
Pokuša li se podijeliti taj niz s p, tj. s 3, dolazi se do zaključka da nema ni jednog broja u nizu djeljivoga s 3 bez ostatka, što znači da uopće nema jednakih napona vektora utora za bilo koja dva utora. Ponovi li se pokušaj dijeljenja s $2p$, zaključuje se da nema ni dva vektora utora sa suprotnim smjerom. To je uzrok da je svaki valoviti namot uz $p = 3$ i $a = 2$ nesimetričan. Činjenica da jednake vektore napona imaju samo strane svitaka u istom utoru (uz $u \geq 2$), što može eventualno dovesti do formalno simetričnog namota, za trenutak će dovesti u zabludu, no pokazat ćemo to nešto poslije na jednom primjeru. Sad

ilustrirajmo cijelo razlaganje na primjerima. Izvedimo namote s podacima jednoga od broja utora iz niza B. Podaci su: $p = 3$, $a = 2$, $N = 16$, $u = 1$, $k = 16$, $y_1 = 3$, $y_2 = 3$, $y = 6$, $\alpha_{el} = 67{,}5°$. Na slici 14. shema je namota. Vidi se da je namot dvovojni, dva puta u sebe zatvoren. Vektorska zvijezda napona utora, ujedno i napona svitaka, nacrtana je na slici 15.a, a vektorski mnogokut napona armature na slici 15.b. Jasno se uočava da je namot



Sl. 15. a) Vektorska zvijezda napona utora i napona svitaka za namot s: $N = 16$, $u = 1$, $k = 16$; prema slici 14.
b) Vektorski mnogokut napona stroja s namotom prema slici 14.

nesimetričan, da nema ni jednog para identičnih vektora u oba ovoja namota i da se ne daju postaviti spojke izjednačenja prve vrste. Ima mogućnosti za spojke izjednačenja druge vrste, npr. na vrhu vektora $1g$ i $9d$, $2g$ i $10d$ itd. Za isti broj utora izvedimo namot s dva svitka po utoru. Podaci su: $p = 3$, $a = 2$, $N = 16$, $u = 2$, $k = 32$, $y_1 = 5$, $y_2 = 5$, $y = 10$ i $\alpha_{el} = 67{,}5°$. Na slici 16. nacrtana je shema namota. Zapažamo da je namot dvovojni, dva puta u sebe zatvoren. Vektorska zvijezda napona utora (označeni rimskim brojkama) predočena je na slici 17.a. Na njoj su arapskim brojkama označeni i vektori svitaka u utoru. Kratka kontrola dvaju svitaka u istom utoru pokazuje da je namot još i stepeničast. Na slici 17.b nacrtana su dva susjedna svitka, kojih gornji vodiči leže u istom utoru, pa se vidi da su im naponi i različitog iznosa. Uz pomoć spojne sheme na slici 16. zaključuje se da su svi vektori svitka prvog ovoja (počinje s $1g$) manji od svitaka drugog ovoja (počinje s $2g$). Rezultanta je na slici 17.c prikazan vektorski mnogokut napona armature stroja. Namot je nesimetričan i naponi koje daju pojedini ovoji razlikuju se upravo u omjeru u kojem se razlikuju naponi svitaka prvog i drugog ovoja. Nema, dakako, nikakve mogućnosti

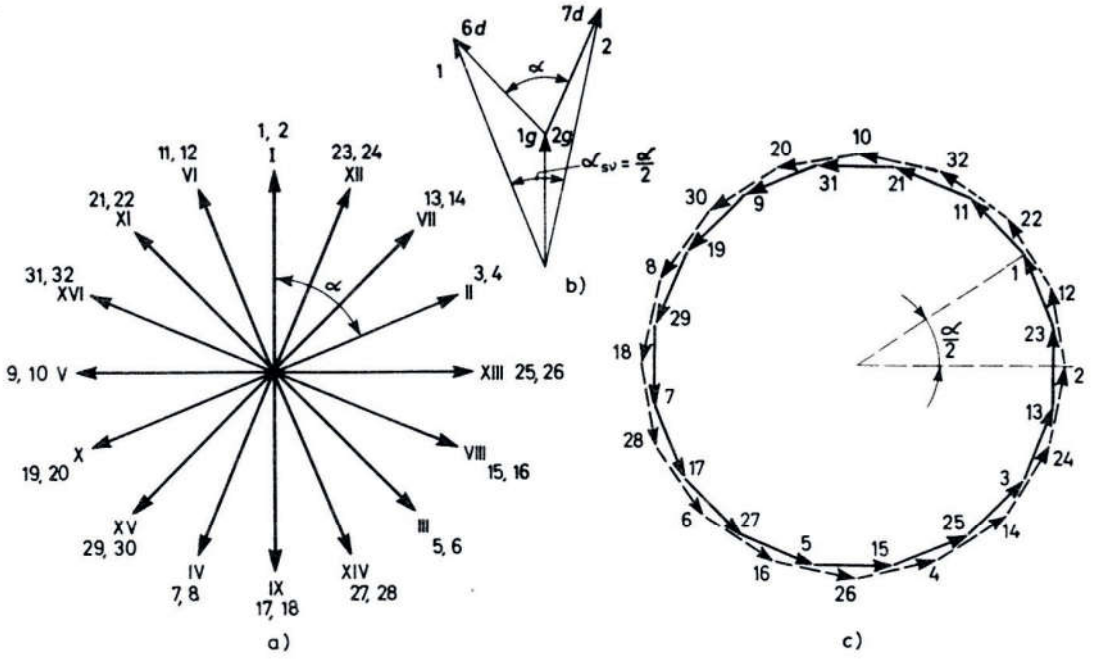


Sl. 16. Shema valovitoga dvovojnog nesimetričnog stepeničastog namota s podacima: $p = 3$, $a = 2$, $N = 16$, $u = 2$, $k = 32$, $y_1 = 5$, $y_2 = 5$, $y = 10$

postavljanja spojki izjednačenja i stroj ima krajnje nepovoljna svojstva. Pokuša li se izbjeći da namot bude stepeničast sa, u osnovi, sličnim podacima, treba izmijeniti korak svitka y_1 i spojni korak y_2, jer se korak namota ne može izmijeniti zbog:

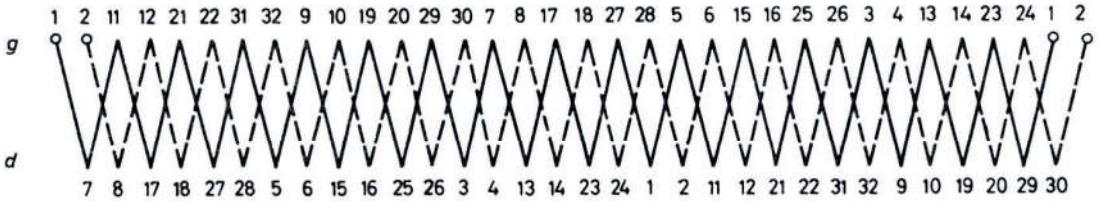
$$y = \frac{k \pm a}{p} = \frac{32 \pm 2}{3} = 10,$$

uz predznak minus, a uz predznak plus uopće se ne dobiva korak y kao cijeli broj. Izmijenimo li, dakle, podatke za y_1 i y_2, podaci će stroja u novom primjeru biti: $p = 3$, $a = 2$, $N = 16$, $u = 2$, $k = 32$, $y_1 = 6$, $y_2 = 4$, $y = 10$, $\alpha_{el} = 67{,}5°$. Na slici 18. spojna je



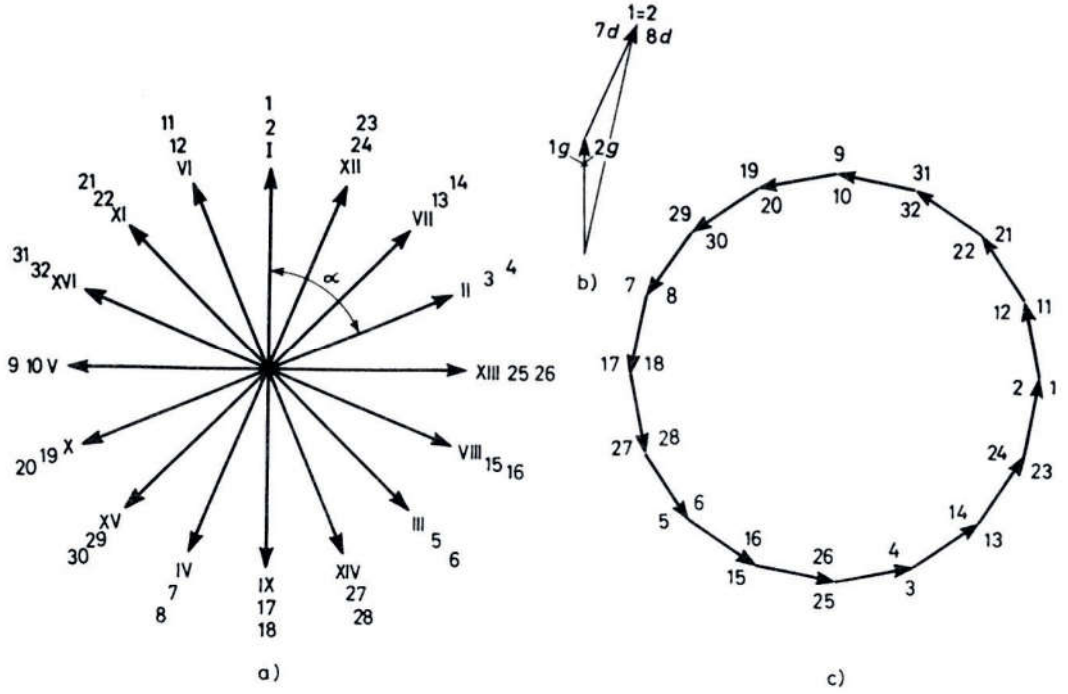
Sl. 17. a) Vektorska zvijezda napona utora i napona svitaka za namot s: $N = 16$, $u = 2$, $k = 32$; prema slici 16. b) Naponi prvog i drugog svitka namota prema shemi na slici 16; naponi vektora svitaka raznih ovoja namota c) Vektorski mnogokut napona stroja s namotom prema slici 16.

shema. Namot je dakako dvovojni i dva je puta sam u sebe zatvoren, a osim toga je nestepeničast, običan. Nacrtamo li, slično kao u prethodnom primjeru, vektorsku zvijezdu napona utora i svitaka (sl. 19.a), pa usporedbe radi i napone prva dva svitka obaju ovoja (sl. 19.b) i, konačno, vektorski mnogokut napona stroja (sl. 19.c), izgleda da smo dobili simetričan namot, iako je to i po fizikalnom tumačenju i zbog neudovoljavanja kriteriju iz jednadžbe (3.1 – 8) nemoguće. Kad malo bolje pogledamo vektorski mnogokut na slici 19.c,



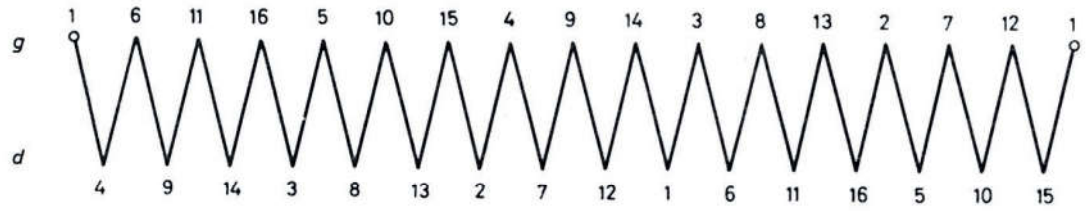
Sl. 18. Shema valovitoga dvovojnog formalno simetričnog namota s podacima: $p = 3$, $a = 2$, $N = 16$, $u = 2$, $k = 32$, $y_1 = 6$, $y_2 = 4$, $y = 10$

s njegova dva identična ovoja, i zaželimo postaviti spojke izjednačenja, odmah vidimo o čemu je riječ. Naime, umjesto postavljanja pravih spojki izjednačenja dovoljno je kratko spojiti kolektorske lamele svitaka 1 i 2, 3 i 4, 5 i 6 itd., čime se namot pretvara u simetrični jednovojni! Naš je namot, dakle, lažni, formalni dvovojni namot. Nacrtamo li za vježbu na



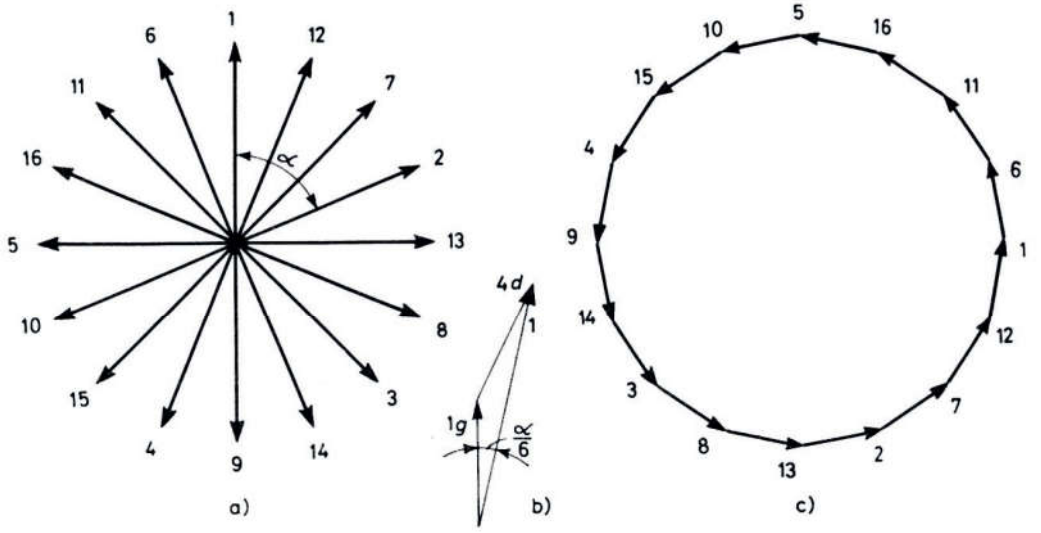
Sl. 19. a) Vektorska zvijezda napona utora i napona svitaka za namot s: $N = 16$, $u = 2$, $k = 32$; prema slici 18. b) Vektor napona (prvog) svitka namota sa slike 18. c) Vektorski mnogokut napona stroja s namotom prema slici 18.

slikama 20. i 21. jednovojni simetrični valoviti namot s podacima: $p = 3$, $a = 1$, $N = 16$, $u = 1$, $k = 16$, $y_1 = 3$, $y = 2$, $y = 5$, $\alpha_{el} = 67{,}5°$, vidimo da je riječ o dva namota identičnih svojstava. Mi smo samo jednovojnome simetričnom namotu svaku lamelu podijelili na dvije. Vodič smo u utoru (ili u grani namota) podijelili na dva jednakog presjeka itd., i dobili smo formalno dvovojni namot. Ta dva namota imaju ne samo identične vektorske zvijezde i mnogokute napona itd. već su im identični naponi na stezaljkama, struje armature, snage itd. Bitno je da tim formalnim dvovojnim namotom nismo dobili nikakva nova fizikalna svojstva stroja! Ipak ima jedna praktička razlika. Zbog izrade dvostrukog broja svitaka, dvostrukog broja kolektorskih lamela, dvostrukog utroška rada na namatanju itd., ovaj formalno dvovojni namot znatno je skuplji. Konačno možemo i



Sl. 20. Shema valovitoga jednovojnog simetričnog namota s podacima: $p = 3$, $a = 1$, $N = 16$, $u = 1$, $k = 16$, $y_1 = 3$, $y_2 = 2$, $y = 5$. Svojstvima namota jednaka su svojstva onoga sa slike 18.

generalizirati. Iz svakog a-vojnog namota stroja dade se napraviti svaki formalni $2a$-vojni namot stroja opisanim načinom, a da mu se svojstva uopće ne promijene. To se, dakako, nikad ne čini jer je formalna $2a$-vojna varijanta ne samo ekonomski nepovoljnija već ima i manju tehničku pouzdanost zbog dvostrukog broja spojnih mjesta u namotu.



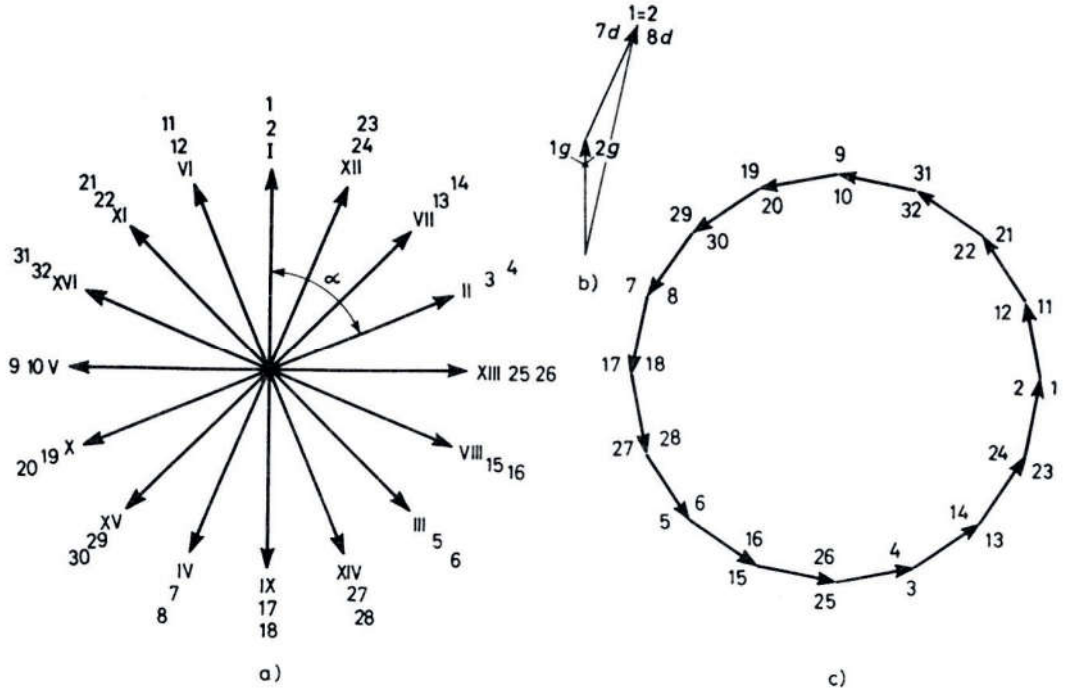
Sl. 21. a) Vektorska zvijezda napona utora i napona svitaka za namot s: $N = 16$, $u = 1$, $k = 16$; prema slici 20. b) Vektor napona (prvog) svitka namota sa slike 20. c) Vektorski mnogokut napona stroja s namotom prema slici 20.

3.4. Opća teorija bubnjastih namota

Usporede li se petljasti i valoviti namot, dolazi se do zaključka da svaki ima svoje osobine, prednosti i mane, pa je o tome ovisna i njihova upotreba u gradnji strojeva. Najbitnija razlika za primjenu je broj paralelnih grana. Petljasti namot ima p puta više paralelnih grana od valovitoga ako su oba a-vojni. To svojstvo ih izjednačuje kad su dvopolni strojevi (koji su jako rijetki u praksi), a svima ostalim, posebno mnogopolnima, valoviti ima znatno više efektivnih zavoja.

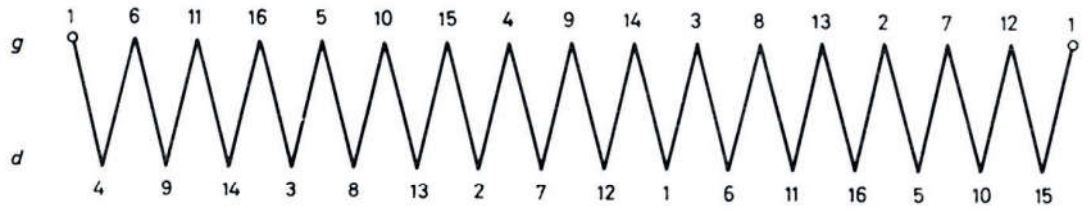
Za manji stroj je karakteristično da ima mnogo zavoja. Po osnovnoj jednadžbi $e = Blv$ inducira se u malom stroju, zbog male dužine l, malog dijametra, pa zbog male obodne brzine v i uz, grubo uzevši, nepromijenjenu indukciju, mali napon po vodiču, pa treba mnogo zavoja spojenih u seriju da se postigne nazivni napon za koji je stroj građen. Velikom je stroju obrnuto. Relativno veliko l, D i v uz konstantno B daje visok napon po vodiču, pa ne treba mnogo zavoja spojenih u seriju da se dosegne željeni napon. Osobito je neugodna gradnja malih strojeva za visoke napone i velikih strojeva za niske napone, kao što su to generatori za elektrolizu, jer je često vrlo teško postaviti namot. Kod jako velikih strojeva iskrsavaju posebne teškoće, pa se često, radi postizanja dobrog rada, napon stroja i postrojenja odabire prema namotu. Valoviti namot odgovara, dakle, relativno manjem stroju i višem naponu, a petljasti većem stroju i nižem naponu. Postoji čak područje malih strojeva gdje je moguć samo valoviti namot. U području koje odgovara srednjim strojevima upotrebljavaju se i jedan i drugi. Ako su moguća oba, onda se uvijek izvodi valoviti, koji je, zbog svojih svojstava u znatnoj prednosti u pogonu. To se pogotovo odnosi

s njegova dva identična ovoja, i zaželimo postaviti spojke izjednačenja, odmah vidimo o čemu je riječ. Naime, umjesto postavljanja pravih spojki izjednačenja dovoljno je kratko spojiti kolektorske lamele svitaka 1 i 2, 3 i 4, 5 i 6 itd., čime se namot pretvara u simetrični jednovojni! Naš je namot, dakle, lažni, formalni dvovojni namot. Nacrtamo li za vježbu na



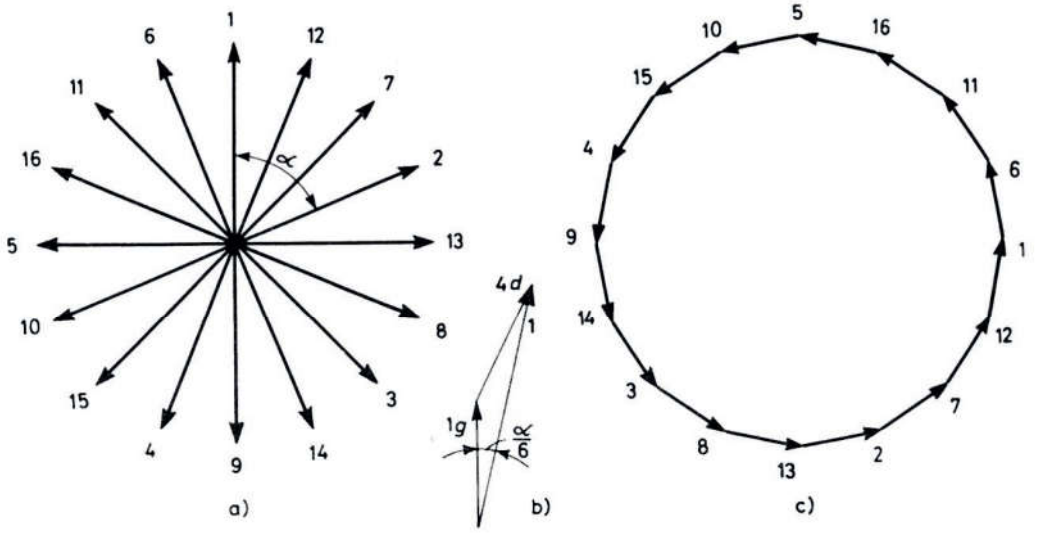
Sl. 19. a) Vektorska zvijezda napona utora i napona svitaka za namot s: $N = 16$, $u = 2$, $k = 32$; prema slici 18. b) Vektor napona (prvog) svitka namota sa slike 18. c) Vektorski mnogokut napona stroja s namotom prema slici 18.

slikama 20. i 21. jednovojni simetrični valoviti namot s podacima: $p = 3$, $a = 1$, $N = 16$, $u = 1$, $k = 16$, $y_1 = 3$, $y = 2$, $y = 5$, $\alpha_{el} = 67{,}5°$, vidimo da je riječ o dva namota identičnih svojstava. Mi smo samo jednovojnome simetričnom namotu svaku lamelu podijelili na dvije. Vodič smo u utoru (ili u grani namota) podijelili na dva jednakog presjeka itd., i dobili smo formalno dvovojni namot. Ta dva namota imaju ne samo identične vektorske zvijezde i mnogokute napona itd. već su im identični naponi na stezaljkama, struje armature, snage itd. Bitno je da tim formalnim dvovojnim namotom nismo dobili nikakva nova fizikalna svojstva stroja! Ipak ima jedna praktička razlika. Zbog izrade dvostrukog broja svitaka, dvostrukog broja kolektorskih lamela, dvostrukog utroška rada na namatanju itd., ovaj formalno dvovojni namot znatno je skuplji. Konačno možemo i



Sl. 20. Shema valovitoga jednovojnog simetričnog namota s podacima: $p = 3$, $a = 1$, $N = 16$, $u = 1$, $k = 16$, $y_1 = 3$, $y_2 = 2$, $y = 5$. Svojstvima namota jednaka su svojstva onoga sa slike 18.

generalizirati. Iz svakog a-vojnog namota stroja dade se napraviti svaki formalni $2a$-vojni namot stroja opisanim načinom, a da mu se svojstva uopće ne promijene. To se, dakako, nikad ne čini jer je formalna $2a$-vojna varijanta ne samo ekonomski nepovoljnija već ima i manju tehničku pouzdanost zbog dvostrukog broja spojnih mjesta u namotu.



Sl. 21. a) Vektorska zvijezda napona utora i napona svitaka za namot s: $N = 16$, $u = 1$, $k = 16$; prema slici 20. b) Vektor napona (prvog) svitka namota sa slike 20. c) Vektorski mnogokut napona stroja s namotom prema slici 20.

3.4. Opća teorija bubnjastih namota

Usporede li se petljasti i valoviti namot, dolazi se do zaključka da svaki ima svoje osobine, prednosti i mane, pa je o tome ovisna i njihova upotreba u gradnji strojeva. Najbitnija razlika za primjenu je broj paralelnih grana. Petljasti namot ima p puta više paralelnih grana od valovitoga ako su oba a-vojni. To svojstvo ih izjednačuje kad su dvopolni strojevi (koji su jako rijetki u praksi), a svima ostalim, posebno mnogopolnima, valoviti ima znatno više efektivnih zavoja.

Za manji stroj je karakteristično da ima mnogo zavoja. Po osnovnoj jednadžbi $e = Blv$ inducira se u malom stroju, zbog male dužine l, malog dijametra, pa zbog male obodne brzine v i uz, grubo uzevši, nepromijenjenu indukciju, mali napon po vodiču, pa treba mnogo zavoja spojenih u seriju da se postigne nazivni napon za koji je stroj građen. Velikom je stroju obrnuto. Relativno veliko l, D i v uz konstantno B daje visok napon po vodiču, pa ne treba mnogo zavoja spojenih u seriju da se dosegne željeni napon. Osobito je neugodna gradnja malih strojeva za visoke napone i velikih strojeva za niske napone, kao što su to generatori za elektrolizu, jer je često vrlo teško postaviti namot. Kod jako velikih strojeva iskrsavaju posebne teškoće, pa se često, radi postizanja dobrog rada, napon stroja i postrojenja odabire prema namotu. Valoviti namot odgovara, dakle, relativno manjem stroju i višem naponu, a petljasti većem stroju i nižem naponu. Postoji čak područje malih strojeva gdje je moguć samo valoviti namot. U području koje odgovara srednjim strojevima upotrebljavaju se i jedan i drugi. Ako su moguća oba, onda se uvijek izvodi valoviti, koji je, zbog svojih svojstava u znatnoj prednosti u pogonu. To se pogotovo odnosi

na jednovojni valoviti namot. I upravo taj povoljniji namot prirodno se upotrebljava u području malih strojeva, gdje su mnogo lakše prilike, a nemoguće ga je izvesti za velike strojeve, koji su neusporedivo opterećeniji i iskorišteniji.

Vrijeme je da se upozori na jedno svojstvo istosmjernih strojeva koje ih izdvaja od ostalih. Ono se ne da u potpunosti razraditi u ovom poglavlju, ali je u principu potrebno za daljnje razumijevanje. Kad govorimo da je neki stroj jako iskorišten ili opterećen u električkom ili magnetskom smislu, imamo sliku iz prethodnog poznavanja izmjeničnih strojeva. Redovno mislimo na veliko iskorištenje željeza uslijed velike gustoće magnetskog toka, ili na veliko iskorištenje bakra zbog velike gustoće struje. U istosmjernih strojeva se tome dodaje problem iskorištenja stroja s obzirom na dobru komutaciju, problem koji je u većini slučajeva teži od onih što ih otprije poznajemo. Za vrijeme prolaska kroz neutralnu zonu mijenja se smjer struje u vodiču. S porastom snage stroja struje su sve veće, a i naponi rastu na osnovi upravo opisane problematike izvedivosti namota. Tad nastupaju teškoće s komutacijom, koje su presudne za stroj, kako za postavljanje namota, tako i za dimenzioniranje osnovnih konstrukcijskih parametara. Zato ne možemo čak ni osnovnu problematiku namota smatrati zaključenom ovim poglavljem. Potpunije razumijevanje dobiva se tek nakon poznavanja teorije komutacije i ostaloga što uz nju dolazi. Zato ćemo se u pravi čas nanovo vratiti na probleme namota.

Iz dosadašnjeg razmatranja bubnjastih namota dalo bi se zaključiti da su valoviti i petljasti namoti dvije odvojene vrste, bez neke dublje zajedničke veze. Da potvrdimo ili oborimo tu tezu, razmotrimo ovaj primjer: na slici 1. nacrtan je normalni petljasti namot za četveropolni stroj s 23 svitka (utora) i četiri paralelne grane. Namot rezultira iz koraka svitka $y_1 = 5$, spojnog koraka $y_2 = 4$ i koraka namota $y = 1$; namot je, dakle, nekrižani. Pokušajmo umjesto spojnog koraka $y_2 = 4$, koji se vraća, uzeti spojni korak $y_2 = 19$, koji produžava smjer kretanja koraka svitka. Tad će korak namota biti $y = y_1 + y_2 = 5 + 19 = 24$. Time smo namot pretvorili u valoviti, što se vidi na slici 2. Rezultat je valoviti namot za koji je lako uvidjeti da je četveropolni, da ima četiri paralelne grane i da je križani. Nema nikakve fizikalne razlike od petljastoga, iz kojega je izveden. Nazovimo ga valovitim namotom druge vrste. Mana mu je da ima veći utrošak bakra, pa ga nećemo upotrebljavati za gradnju stroja. Ujedno smo ustanovili da križani valoviti namot po smjeru induciranog napona odgovara nekrižanome petljastom. Tu radije uvedimo pojam kretanja namota. Kreće li se namot udesno, slijedi li u našem načinu prikazivanja pomak svitka prilikom povratka u susjedstvo udesno od početnoga, dobivamo nekrižani namot kod petljastoga, a križani kod valovitoga. U lijevom kretanju namota – petljasti je križani, a valoviti nekrižani.

Rezultat našeg eksperimenta vodi do zaključka da mora postojati neka zajednička teorija koja obuhvaća i petljaste i valovite namote. Takva teorija postoji i evo njezinih rezultata, koji su, i bez dubljeg ulaženja, jasni na temelju našega dosadašnjeg poznavanja namota. Korak za bilo kakav bubnjasti namot može se izraziti jednadžbom:

$$y = \frac{nk \pm a}{p}. \tag{1}$$

Pri tome je n cijeli pozitivan broj, uključujući i nulu. Oznaka plus vrijedi za namote koji se kreću udesno, a oznaka minus za one koji se kreću ulijevo.

Za $n = 0$ dobiva se petljasti namot, dakako ako je a djeljivo s p.

Za $n = 1$ rezultat je valoviti namot prve vrste, a to je naš normalni valoviti namot.

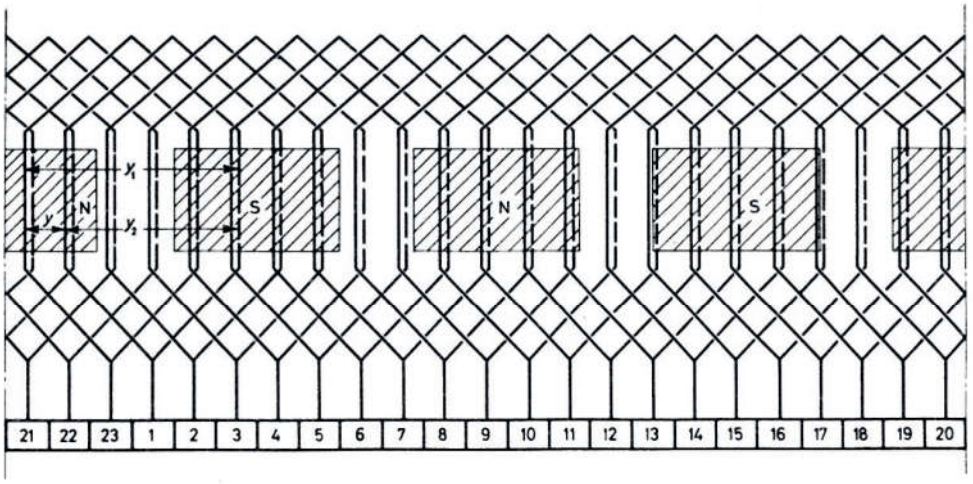
Za $n = 2$, 3 i više dobiva se valoviti namot druge, treće, ...vrste.

Provjerimo! Podaci su: $p = 4$, $u = 1$, $N = 23$, $k = 23$, $a = 2$.

a) Za $n = 0$:

$$y = \frac{\pm a}{p} = \frac{\pm 2}{2} = \pm 1.$$

Za + 1 namot se kreće udesno, a to je upravo naš petljasti nekrižani namot sa slike 1.

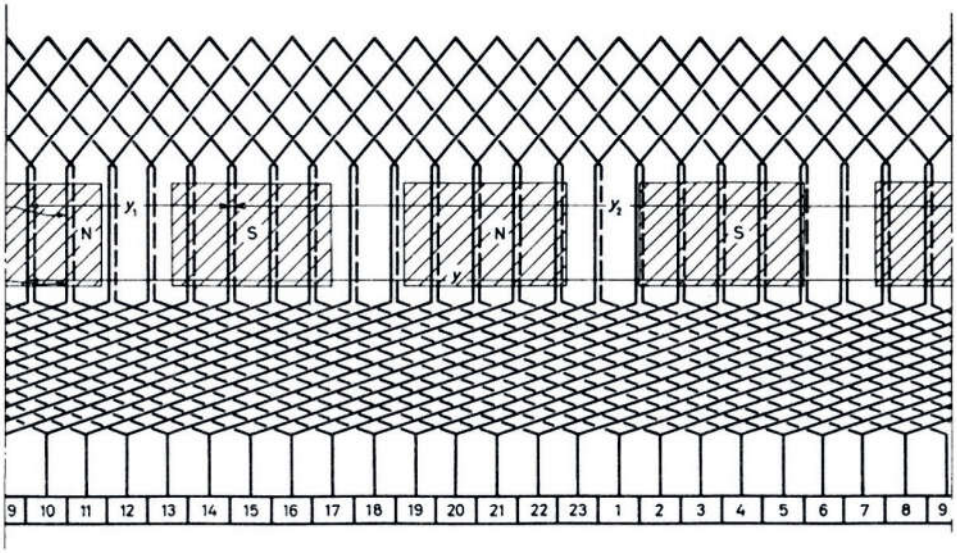


Sl. 1. Shema petljastog namota: $p = 2$, $a = 2$, $N = 23$, $u = 1$, $k = 23$, $y_1 = 5$, $y_2 = 4$, $y = 1$

b) Za $n = 2$:

$$y = \frac{2 \cdot 23 \pm 2}{2} = 24 \text{ (uz predznak +)}.$$

Za predznak plus namot se kreće udesno, i to je valoviti križani namot sa slike 2.



Sl. 2. Shema valovitog namota druge vrste s istim svojstvima kakva su petljastom namotu na slici 1.

c) Za $n = 1$:

$$y = \frac{1 \cdot 23 \pm 2}{2} \neq \text{cijeli broj},$$

što znači da se ne može izvesti normalni valoviti dvovojni namot.

d) Pokušajmo prema c) izvesti jednovojni valoviti namot, dakle sve kao kod c), samo s $a = 1$:

$$y = \frac{1 \cdot 23 \pm 1}{2} = 12 \text{ (uz oznaku } +).$$

Nakon dva koraka iz prvog utora dolazi se u 25-i, odnosno drugi utor, što potvrđuje izvedivost jednovojnoga valovitog namota.

Jednadžba (1) dobro će poslužiti prilikom osnovnog postavljanja namota, a nakon toga možemo uvjetima simetrije itd. provjeravati svojstva. Valovite namote drugog i višeg reda ne izvodimo. Vidjeli smo da se namot drugog reda svodi na petljasti. Valoviti namot trećeg reda svodi se na onaj prvoga itd. Za dokaz pokušajmo s podacima iz primjera d) izvesti namot trećeg reda, ($n = 3$):

$$y = \frac{3 \cdot 23 \pm 1}{2} = 35 \text{ (uz oznaku } +).$$

Kad smo obišli s tolikim korakom oko armature, odbijamo 23 utora; $35 - 23 = 12$, a to je korak valovitog namota prvog reda iz uzetog primjera.

3.5. Neki posebni namoti

Neke posebne vrste namota češće se pojavljuju u praksi, pa ih je potrebno obraditi. Njihove se teorije redovno dadu svesti na teoriju bubnjastih namota, pa ne čine posebnu teškoću.

3.5.1. Manjkavi namoti

To su obično petljasti ili valoviti namoti kod kojih, kako se već iz naziva vidi, nešto nedostaje. To može biti:

a) da imaju jedan ili veći broj svitaka manje nego lamela, pa uslijed pomanjkanja svitaka ima *mrtvih* lamela;

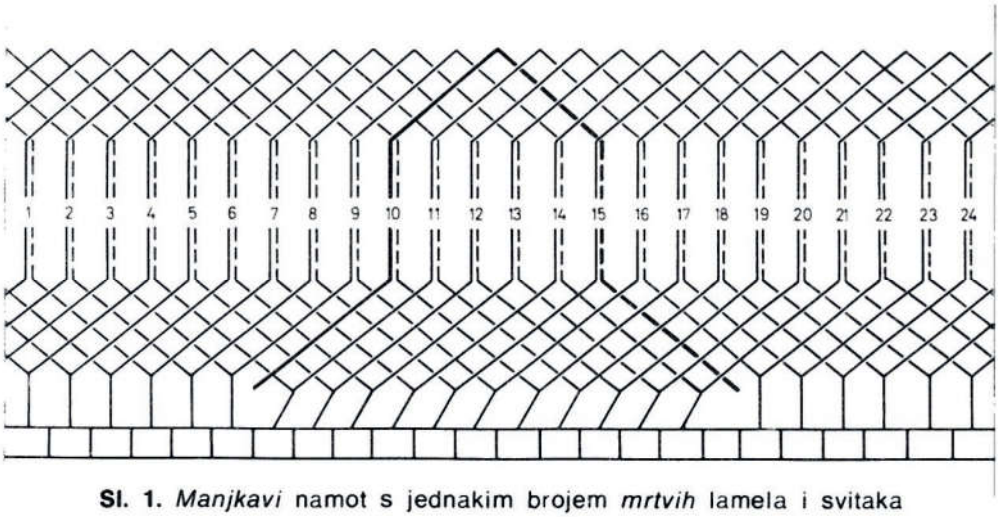
b) da imaju jednu ili veći broj lamela manje nego svitaka, pa uslijed pomanjkanja lamela ima *mrtvih* svitaka;

c) da imaju jednak broj lamela i svitaka, ali jedan ili više svitaka nisu spojeni na lamele, pa je jednak broj *mrtvih* i lamela i svitaka;

d) da imaju nejednak broj lamela i svitaka kao pod a) ili pod b), a osim toga nisu ni svi postojeći svici spojeni na lamele.

Jedan takav namot tipa c) prikazuje slika 1. Takvi manjkavi namoti nastaju na dva načina:

1. Neki originalni tvornički strojevi katkad su tako napravljeni. Razlog je ekonomičnost. Prilikom produkcije malih strojeva ne isplati se raditi kolektore sa svim brojem lamela koji su mogući. Obično se kod jedne veličine stroja odluči na svega jedan broj utora N i nekoliko vrsta kolektora. Tad je *rijedak* niz brojeva zavoja koji se dadu ispravno izvesti. Da taj niz postane gušći, unaprijed se predvide kombinacije manjkavih namota.

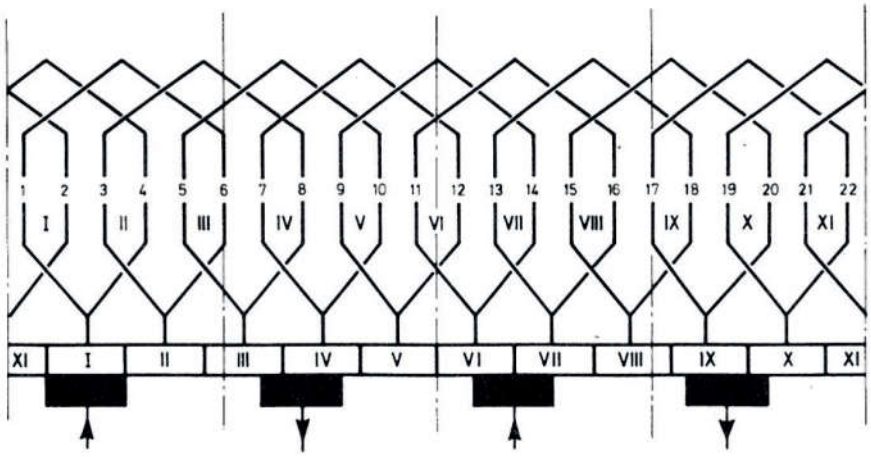


Sl. 1. *Manjkavi* namot s jednakim brojem *mrtvih* lamela i svitaka

2. Kod prematanja gotovog stroja za nove uvjete, napon, brzinu vrtnje, struju i slično, mora se iz istih razloga postizanja određenog broja zavoja mijenjati u ili spajati više lamela u jednu, ili oboje, itd. Valja tu odmah istaknuti da takvi zahvati kod imalo opterećenih strojeva, osobito u pogledu komutacije, dovode do lošeg rezultata.

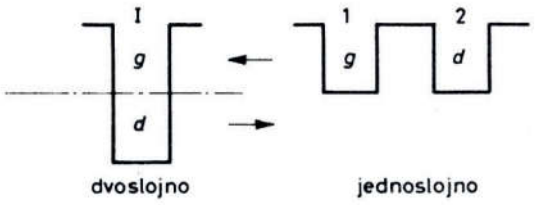
3.5.2. Jednoslojni namoti

Jednoslojni namoti imaju vrlo usko područje upotrebe. Zbog otežane izrade izbjegavaju se gdje god je to moguće. Na slici 2. shema je jednoga petljastog jednoslojnog namota.



Sl. 2. Shema jednoslojnoga petljastog namota

Jednoslojni se namoti mogu, što se tiče njihove razrade, potpuno svesti na dvoslojne. Možemo zamisliti da nam svaka dva utora jednoslojnog namota čine jedan utor dvoslojnoga, kako je to naznačeno na slici 3. Zato ćemo promatrati

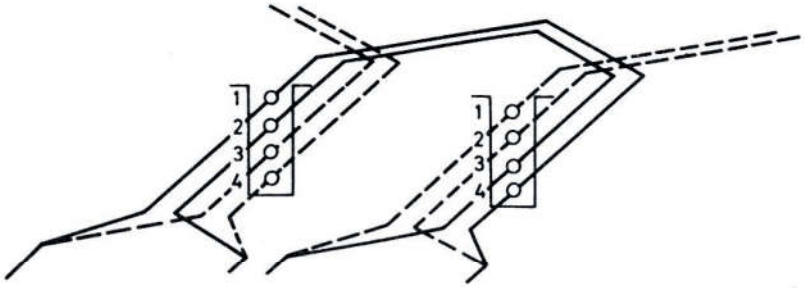


Sl. 3. Svođenje jednoslojnog namota na dvoslojni

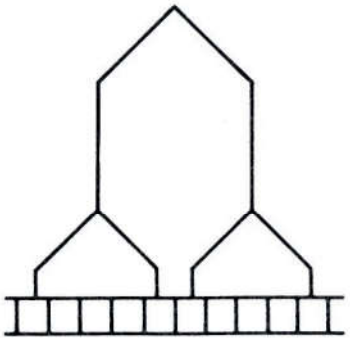
jednoslojni namot kao dvoslojni, samo s pola manje utora, a upravo toliko ima i kolektorskih lamela. Pri tome svi neparni utori jednoslojnog namota čine gornji sloj, a svi parni donji sloj dvoslojnog namota, na koji je sveden jednoslojni namot.

3.5.3. Žablji namot

Žablji je namot rezultat pokušaja da se svojstva petljastoga približe svojstvima valovitog namota. Žabljem namotu u sve utore uloži se jednak broj svitaka petljastog i valovitog namota. Načelno raspored prikazuje slika 4. Ako takav svitak predočimo shematski, kao na slici 5, sliči on na žablje krakove, pa mu odatle i naziv.



Sl. 4. Prikaz rasporeda svitaka *žabljeg* namota



Sl. 5. Oblik svitka žabljeg namota

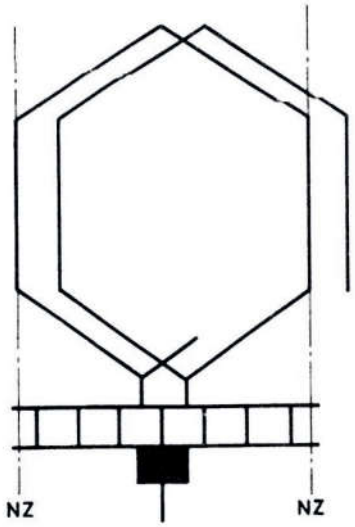
Glavna je prednost žabljeg namota u tome što ne treba spojki izjednačenja, bez obzira na to koliko ima paralelnih grana. Valoviti namot služi petljastome kao spojke izjednačenja. Izjednačenje je potpuno i savršeno jer je izjednačen svaki svitak. Prilikom postavljanja namota valja paziti da broj utora odgovara petljastom i valovitom dijelu. Kao cjelina, ima žablji namot dvostruki broj paralelnih grana što ih ima sam za sebe njegov petljasti dio, pa je u pogledu efektivnog broja zavoja jednak svome petljastom dijelu, koji bi imao vodiče dvostrukog presjeka. Jedina mu je mana to što je skup, pa se upotrebljava samo za ekstremno iskorištene strojeve ili one vrlo velike snage.

3.6. Položaj četkica. Otpor armature

Četkice, njihove dimenzije, kvaliteta, položaj, prekrivanje s kolektorskim lamelama – sve su to bitna pitanja za rad istosmjernog stroja. Većina tih pitanja bit će obrađena u poglavlju o komutaciji. Zasad pogledajmo četkice samo kao krajnje točke našeg namota. One su električki smještene u neutralnu zonu jer je u tom položaju djelovanje namota najefektnije. U tom položaju ni jedan vodič armature ne djeluje protiv osnovnog smjera induciranog napona stroja, pa je napon za dane prilike magnetskog polja najveći, a time je i iskorištenje stroja najbolje. To nije jedini razlog smještaja četkica u neutralnu zonu, ali potpuno opravdava takav raspored.

Pogleda li se okom konkretni izvedeni istosmjerni stroj, izgleda da se četkice prostorno nalaze negdje u visini sredine glavnog pola. To dolazi zbog toga što je lamela kojoj je svitak u neutralnoj zoni, uslijed pomaka nastaloga zakretom glave svitka, došla negdje na položaj kolektora koji odgovara sredini glavnog pola. Četkica pokriva upravo tu lamelu. Na slici 1. vidi se kako dolazi do toga prostornog pomaka, a on je vidljiv i na ostalim dosadašnjim shemama namota gdje je označen.

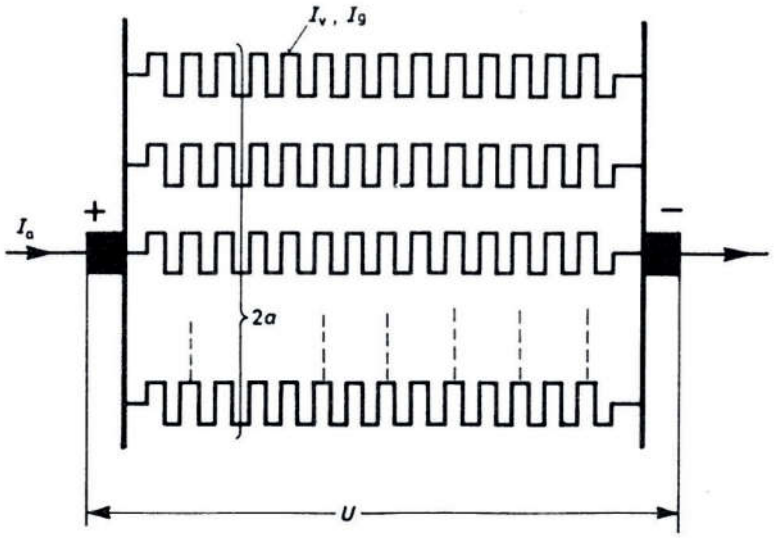
Između pozitivnih i negativnih četkica nalazi se cijeli armaturni namot. Za nas su važne struje koje teku tim namotom, i radni otpor armature na kojem



Sl. 1. Prostorni raspored strana svitaka i pripadnih lamela, položaj četkica prema polovima

nastaju padovi napona, i u kojem se zbog prolaska struje stvaraju gubici. Predočimo li namot kao shemu otpora na slici 2, lako računamo struje jer je otpor svake od $2a$ paralelnih grana međusobno jednak. Označimo li ukupnu struju armature s I_a, struja u vodiču ili grani bit će:

$$I_v = \frac{I_a}{2a}. \tag{1}$$



Sl. 2. Shema otpora namota armature

Struja u četkici ovisi o ukupnom broju četkica $n_č$:

$$I_č = \frac{2I_a}{n_č}. \tag{2}$$

Otpor jednog vodiča iznosi:

$$R_v = \frac{l_v}{q\varkappa},$$

gdje je l_v dužina jednog vodiča [m], q presjek vodiča [mm²], a $\varkappa$ vodljivost materijala.

Budući da jedan stvarni zavoj ima dva vodiča, to je efektivni broj zavoja u armaturi:

$$w_a = \frac{w}{2a} = \frac{z}{4a}, \tag{3}$$

pri čemu je w ukupni broj u seriju vezanih zavoja armature, a z je ukupni broj svih vodiča, koji računamo prema:

$$z = 2uNw_s. \tag{4}$$

Pri tome je w_s broj zavoja u jednom svitku, a $uN = k = s$ ukupni je broj svitaka.

Kad bi u namotu armature svi vodiči bili spojeni u seriju, bio bi R_a otpor armature jednak zR_v. No kako su ti vodiči spojeni u $2a$ jednakih paralelnih grana, izlazi:

$$R_a = zR_v\left(\frac{1}{2a}\right)^2$$

ili:

$$R_a = \frac{zl_v}{4\varkappa q a^2}. \tag{5}$$

Izračunavanjem otpora armature završeno je osnovno izlaganje o namotima armature. Kako je već spomenuto, nije time završeno i naše proučavanje namota armature. Armaturni namot, ulančujući glavni magnetski tok, na neki je način središnji dio stroja u procesu pretvaranja energije, električne u mehaničku ili obrnuto. Zato nam je potrebno dublje poznavanje tog dijela stroja, posebno problema koji se postavljaju pri stroju u punoj funkciji. Zbog toga ćemo se u daljnjem izlaganju često vraćati na problematiku armaturnog namota, no uvijek u vezi s funkcijom stroja kao cjeline.

3.7. Ostali namoti istosmjernog stroja

Osim namota armature svaki istosmjerni stroj ima obično još više drugih namota. Zajednička je karakteristika svih njih da služe za stvaranje magnetskog polja u stroju, ili za njegovo korigiranje. Sve su to, dakle, u osnovi namoti za stvaranje uzbude. Najvažniji od njih s obzirom na osnovno funkcioniranje stroja, jest osnovni uzbudni namot glavnih polova, koji kraće nazivamo uzbudnim namotom. Njegova je funkcija da stvara protjecanje koje uzbuđuje osnovni magnetski tok stroja. Već na prvome shematskom presjeku istosmjernog stroja na slici 2.1–1. označen je taj uzbudni namot. Osnovna mu je izvedba u obliku svitaka koji obavijaju polove istosmjernog stroja, a slični su transformatorskim svicima, samo što se prilagođavaju prostoru oko pola, što je već uočljivo na osnovnoj slici (2.1–1). Ostalim namotima istosmjernog stroja također je slična izvedba. Na ovom ih mjestu nećemo obrađivati, već ćemo ih postepeno uvoditi tokom tumačenja teorije istosmjernih strojeva.

3.8. Zadaci i problemi

3.8.1. Zadaci

1. Dvopolni istosmjerni stroj namotan je petljastim jednovojnim nekrižanim dvoslojnim namotom i ima na armaturi 16 utora s dva štapa u utoru ($u = 1$). Treba:
   a) odrediti je li namot simetričan;
   b) nacrtati shemu namota armature;

c) nacrtati vektorsku zvijezdu i vektorski mnogokut napona;

d) grafički naći vrijednost induciranog napona na stezaljkama, ako četkica prekriva jednu lamelu, a inducirani napon u vodiču iznosi 10 V.

2. Četveropolni istosmjerni stroj namotan je petljastim jednovojnim nekrižanim dvoslojnim namotom i ima na armaturi 32 utora s dva štapa u utoru ($u = 1$). Potrebno je:

a) nacrtati shemu namota armature;

b) predočiti vektorsku zvijezdu i vektorski mnogokut napona;

c) provesti usporedbu sa strojem u 1. zadatku s obzirom na namot armature.

3. Četveropolni istosmjerni stroj namotan je valovitim jednovojnim križanim dvoslojnim namotom i ima na armaturi 23 utora s dva štapa u utoru ($u = 1$). Valja:

a) odrediti je li namot simetričan;

b) nacrtati shemu namota armature;

c) nacrtati vektorsku zvijezdu i vektorski mnogokut napona.

4. Može li se istosmjerni stroj s podacima prema 3. zadatku izvesti s petljastim simetričnim namotom?

5. Četveropolni istosmjerni stroj namotan je petljastim jednovojnim nekrižanim dvoslojnim namotom i ima na armaturi 14 utora s četiri štapa u utoru ($u = 2$). Treba nacrtati:

a) shemu običnog (nestepeničastog) namota armature;

b) shemu stepeničastog namota armature;

c) vektorsku zvijezdu napona;

d) vektorski mnogokut napona običnog namota armature;

e) vektorski mnogokut napona stepeničastog namota armature;

f) shemu spoja spojki za izjednačenje potencijala.

6. Koliko bi utora trebalo da ima istosmjerni stroj u 5. zadatku želimo li izvesti dijametralan namot armature?

7. Dvopolni istosmjerni stroj namotan je petljastim jednovojnim križanim dvoslojnim namotom i ima na armaturi 16 utora s četiri štapa u utoru ($u = 2$). Potrebno je:

a) odrediti je li namot simetričan;

b) nacrtati shemu namota armature;

c) nacrtati vektorsku zvijezdu napona;

d) nacrtati vektorski mnogokut napona.

8. Četveropolni istosmjerni stroj namotan je valovitim jednovojnim nekrižanim dvoslojnim namotom i ima na armaturi 23 utora sa šest štapova po utoru ($u = 3$).
Treba:

a) odrediti je li namot simetričan;

b) nacrtati shemu namota armature;

c) nacrtati vektorsku zvijezdu napona;

d) nacrtati vektorski mnogokut napona.

9. Četveropolni istosmjerni stroj namotan je petljastim dvovojnim nekrižanim dvoslojnim namotom i ima na armaturi 22 utora s dva štapa u utoru ($u = 1$). Potrebno je:

a) ustanoviti je li namot simetričan;

b) nacrtati shemu namota armature;

c) nacrtati vektorsku zvijezdu napona;

d) nacrtati vektorski mnogokut napona;

e) nacrtati shemu spojki za izjednačenje potencijala.

10. Četveropolni istosmjerni stroj namotan je petljastim dvovojnim nekrižanim dvoslojnim namotom i ima na armaturi 20 utora s dva štapa u utoru ($u = 1$). Valja nacrtati:

a) shemu namota armature;

b) vektorsku zvijezdu napona;

c) vektorski mnogokut napona;

d) shemu spojki za izjednačenje potencijala.

11. Četveropolni istosmjerni stroj namotan je valovitim dvovojnim nekrižanim dvoslojnim namotom i ima 12 utora na armaturi s po šest štapova u utoru ($u = 3$).

Potrebno je nacrtati:

a) shemu spoja namota armature;

b) shemu spoja stepeničastog namota armature;

c) vektorsku zvijezdu napona;

d) vektorski mnogokut napona običnog namota armature;

e) vektorski mnogokut napona stepeničastog namota armature;

f) shemu spojki za izjednačenje potencijala.

12. Četveropolni istosmjerni stroj namotan je valovitim dvovojnim križanim dvoslojnim namotom i ima na armaturi 12 utora sa šest štapova u utoru ($u = 3$).

Treba nacrtati:

a) shemu spoja stepeničastog namota armature;

b) vektorsku zvijezdu napona;

c) vektorski mnogokut napona stepeničastog namota.

3.8.2. Rješenja

1. Broj kolektorskih lamela prema jednadžbi (3.1 – 1) bit će:

$$k = Nu = 16.$$

Za jednovojni petljasti namot prema izrazu (3.2–3) dobivamo:

$$p = a = 1.$$

a) Nužni uvjeti simetrije prema izrazima od (3.1–6) do (3.1–8) bez obzira na vrstu namota armature su:

$$\frac{N}{a} = 16 = \text{cijeli broj}, \quad \frac{k}{a} = 16 = \text{cijeli broj}, \quad \frac{p}{a} = 1 = \text{cijeli broj},$$

a dodatni uvjeti za petljasti namot:

$$\frac{N}{p} = 16 = \text{cijeli broj}, \quad \frac{k}{p} = 16 = \text{cijeli broj}.$$

[Namot je simetričan.]

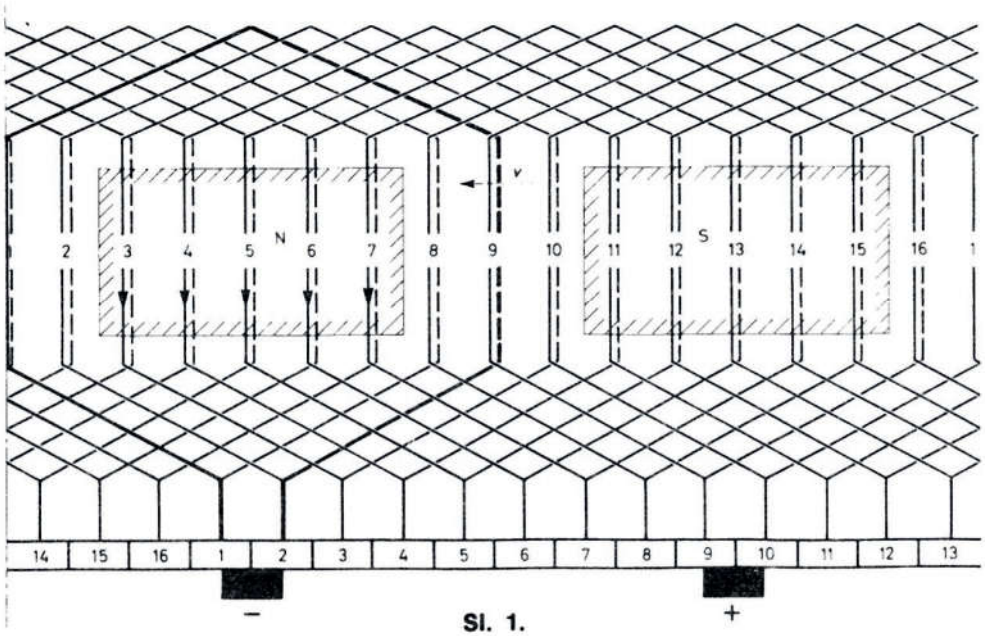
b) Budući da se u utoru nalazi jedna strana svitka ($u = 1$), koraci namota izraženi u broju lamela odgovaraju koracima izraženima u broju utora.

Korak namota: $y = \pm \frac{a}{p} = \pm 1$, za nekrižani namot $y = +1$

Korak svitka: $y_1 = \frac{k}{2p} = 8$

Spojni korak: $y_2 = y_1 - y = 7$

[Na sl. 1. predočena je shema spoja namota armature s ucrtanim položajem i polaritetom magnetskih polova, te smjerom induciranih napona i polaritetom četkica za označeni smjer vrtnje.]



Sl. 1.

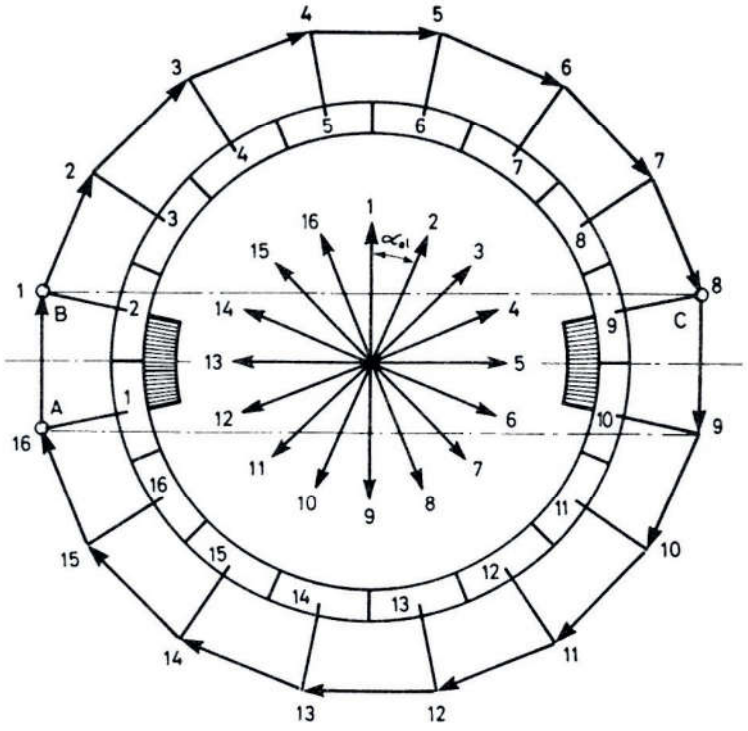
c) Fazni pomak među vektorima napona susjednih utora prema jednadžbi (3.1–3) je:

$$\alpha_{el} = \frac{360}{N} p = 22{,}5°.$$

Na središnjem dijelu slike 2. prikazana je vektorska zvijezda napona koja sadrži 16 vektora napona vodiča međusobno pomaknutih za kut α_{el}, pri čemu svaki vektor predočuje napon gornjeg i donjeg vodiča označenog utora.

Napon zavoja između lamela 1 i 2 jednak je vektorskoj sumi napona vodiča $1g$ i $9d$, a označen je vektorom 1. Na vanjskom dijelu slike 2. vektorski je mnogokut napona sa spojevima na pripadne kolektorske lamele i položajem četkica.

[Vektorska zvijezda i mnogokut napona prikazani su na sl. 2.]



Sl. 2.

d) Inducirani napon na stezaljkama jednak je induciranom naponu na četkicama, a uz oznake na slici 2. iznosi:

$$\left[E = \frac{\overline{BC}}{\overline{AB}} = 100{,}5 \text{ V} \right]$$

2. Uvodno određujemo da je $k = 32$ i $p = a = 2$.

a) Korak namota: $y = \pm \frac{a}{p} = \pm 1$, za nekrižani namot $y = +1$

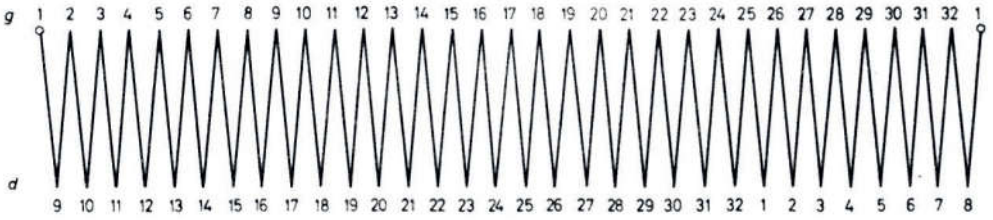
Korak svitka: $y_1 = \frac{k}{2p} = 8$

Spojni korak: $y_2 = y_1 - y = 7$

[Shemu spoja namota armature sadrži sl. 3.]

b) Fazni pomak među vektorima napona susjednih utora prema izrazu (3.1–3) je:

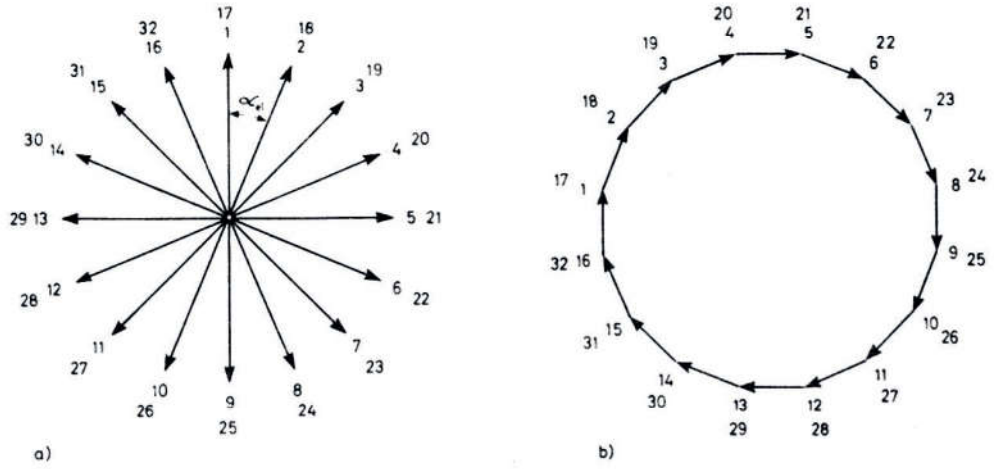
$$\alpha_{el} = \frac{360}{N} p = 22{,}5°.$$



Sl. 3.

Na slici 4.a prikazana je vektorska zvijezda napona sa 16 vektora napona vodiča, međusobno pomaknutih za kut α_{el}, pri čemu svaki vektor predočuje napon gornjeg i donjeg vodiča označenog utora. Napon zavoja između lamela kolektora 1 i 2 jednak je vektorskoj sumi napona vodiča 1*g* i 9*d*, a označen je vektorom 1. Vektorski mnogokut napona prikazan je na slici 4.b.

[Vektorska zvijezda i mnogokut napona su na sl. 4.]



Sl. 4.

c) Zamislimo da smo stroj u 1. zadatku prorezali po obodu i u taj prorez dodali još jedan isti stroj kao u tom zadatku, pa bismo dobili stroj u 2. zadatku s dva jednaka para polova.

U shemi spoja namota armature stroja iz 2. zadatka dio od 1. do 16. utora (prvi par polova) odnosi se na stroj kao u 1. zadatku, a dio od 17. do 32. utora (drugi par polova) na dodani isto takav dio stroja.

Jednako tako, u vektorskoj zvijezdi i mnogokutu napona, dio od 1. do 16. vektora napona odnosi se na prvi, a dio od 17. do 32. vektora na drugi par polova.

[Zaključujemo da pod svakim parom polova dobivamo potpunu elektromagnetsku sliku stroja i da stroj iz 2. zadatka u osnovi čini dva paralelno spojena stroja iz 1. zadatka. Stroj u 2. zadatku imat će jednak napon kao stroj u 1. zadatku, ali će se moći opteretiti dvostrukom strujom zbog dvostrukog broja paralelnih grana namota armature.]

3. Broj lamela kolektora prema izrazu (3.1 – 1) iznosi:

$$k = Nu = 23.$$

Jednovojni valoviti namot, bez obzira na broj polova, ima broj pari paralelnih grana:

$$a = 1.$$

a) Uvjeti simetrije prema jednadžbama od (3.1 – 6) do (3.1 – 8) za valovite namote su:

$$\frac{N}{a} = 23 = \text{cijeli broj}, \quad \frac{k}{a} = 23 = \text{cijeli broj}, \quad \frac{p}{a} = 2 = \text{cijeli broj}.$$

[Namot je simetričan.]

b) Korak namota, za valoviti namot prema relaciji (3.3 – 2) uz predznak plus za križani namot, iznosi

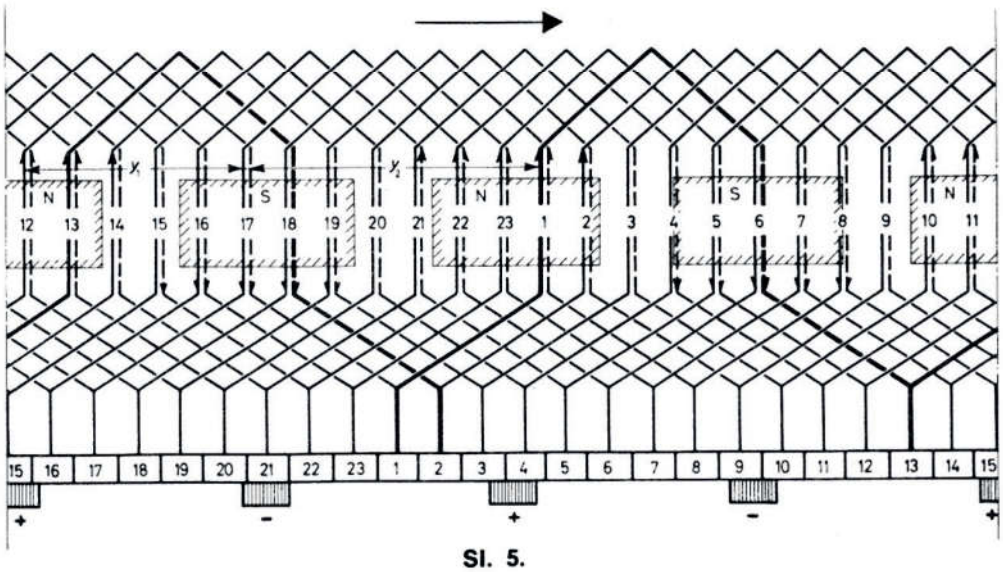
$$y = \frac{k + a}{p} = \frac{23 + 1}{8} = 12.$$

Približni bi korak svitka bio:

$$y'_1 = \frac{k}{2p} = 5{,}75; \text{ odabiremo cijeli broj } y_1 = 5.$$

Spojni korak je: $y_2 = y - y_1 = 7$.

[Na sl. 5. shema je spoja namota armature s ucrtanim položajem i polaritetom magnetskih polova, te smjerom induciranih napona i polaritetom četkica za označeni smjer vrtnje.]



Sl. 5.

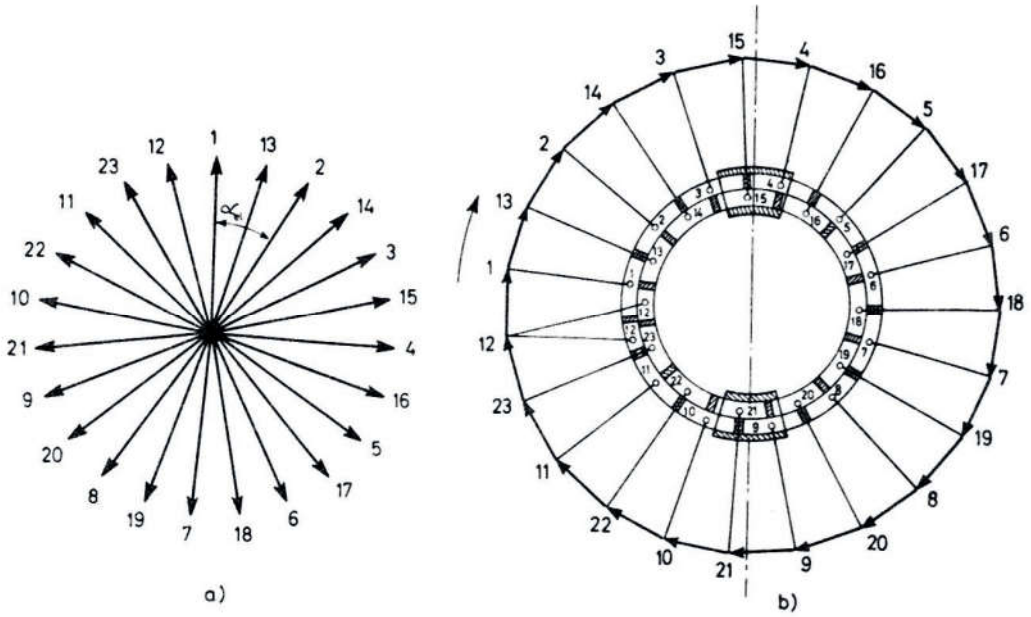
c) Fazni pomak među vektorima napona susjednih utora prema izrazu (3.1 – 1) je:

$$\alpha_{el} = \frac{360}{N} p = 31{,}3°.$$

Na slici 6.a prikazana je vektorska zvijezda napona, koja je jednostruka i sadrži 23 vektora međusobno pomaknuta za kut $\frac{\alpha_{el}}{2}$. Napon zavoja između lamela kolektora 1 i 13 jednak je vektorskoj sumi napona vodiča 1*g* i 6*d*, a označen je vektorom 1. Na slici 6.b vektorski je mnogokut napona sa spojevima na pripadne kolektorske lamele.

Na središnjem dijelu slike 6.b vidi se kako valoviti namot može imati dvije ili $2p$ četkica.

[Vektorska zvijezda i mnogokut napona predočeni su na sl. 6.]



Sl. 6.

4. [Ne, jer ne zadovoljava uvjete simetrije.]

5. Broj kolektorskih lamela prema jednadžbi (3.1 – 1) bit će:

$$k = Nu = 28.$$

Korak jednovojnoga nekrižanog petljastog namota iznosi:

$$y = \pm \frac{a}{p} = \pm 1, \text{ za nekrižani namot } y = +1.$$

a) Približni je korak svitka:

$y'_1 = \frac{k}{2p} = \frac{28}{4} = 7$; odabiremo $y_1 = 6$ jer pri običnom namotu mora biti:

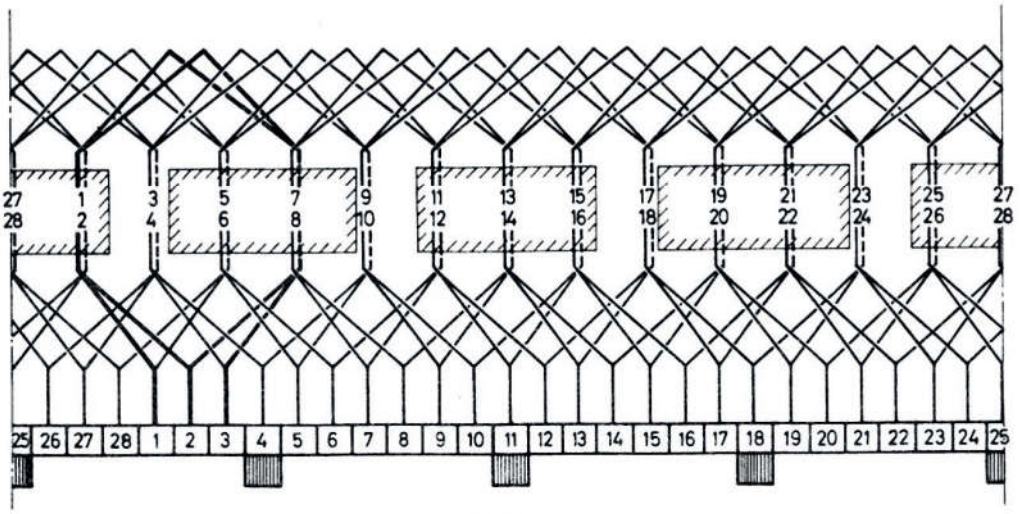
$\frac{y_1}{u}$ = cijeli broj; u našem primjeru 3.

Kad je broj strana svitaka u utoru $u > 1$, korak svitka izražen u utorskim koracima razlikuje se od koraka svitka izraženoga u koracima lamela. U našem primjeru korak je svitka:

$y_1 = 6$ lamela ili $\frac{y_1}{u} = 3$ utorska koraka, tj. iz utora 1 u utor 4.

Spojni korak je: $y_2 = y_1 - y = 5$.

[Shema spoja običnog namota armature prikazana je na sl.7.]



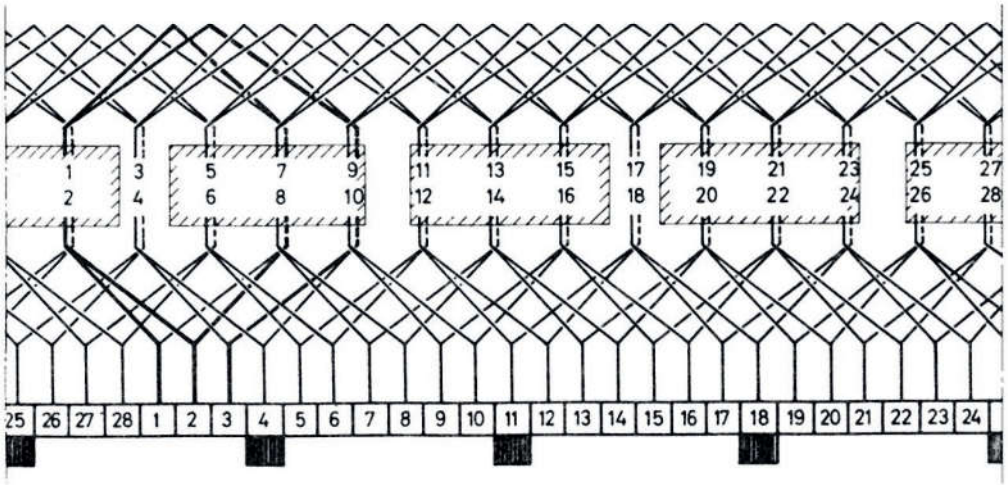
Sl. 7.

b) Korak namota y ovisi o vrsti namota (jednovojni petljasti nekrižani) i ne mijenja se s izvedbom namota (obični ili stepeničasti).
Korak svitka odabiremo:

$$y_1 = 7,$$

jer kod stepeničastog namota mora biti:

$$\frac{y_1}{u} \neq \text{cijeli broj} = 3{,}5.$$



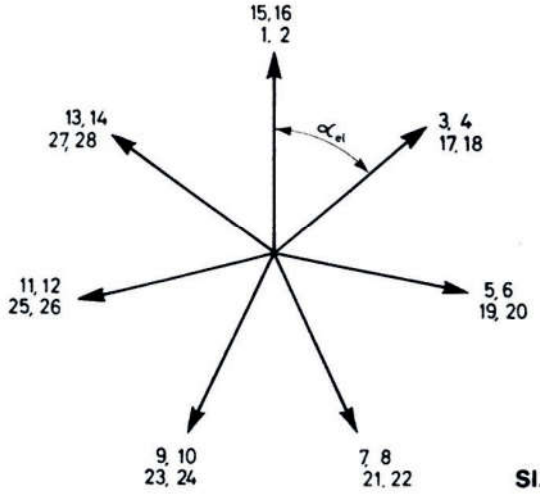
Sl. 8.

Korak svitka prikazan u utorskim koracima je iz utora 1 u utor 4 i 5, a to znači da se od dvije strane svitaka iz utora 1 jedna strana svitka nalazi u utoru 4, a druga u utoru 5.
Spojni korak je: $y_2 = y_1 - y = 6$.
[Shemu spoja stepeničastog namota armature sadrži sl. 8.]

c) Fazni pomak među vektorima napona iz susjednih utora bit će:

$$\alpha_{el} = \frac{360}{N} p = 51{,}43°.$$

Budući da svi vodiči iz jednog utora imaju isti položaj vektora napona, u našem su primjeru istog položaja vektori napona 1 i 2, 3 i 4 itd.
Na slici 9. prikazana je vektorska zvijezda napona, koja je dvostruka (1–14 i 15–28) uslijed $p = 2$ i sadrži po sedam vektora (1 i 2, 3 i 4 itd.) zbog $u = 2$, međusobno pomaknutih za α_{el}.
[Vektorska zvijezda napona, bez obzira na izvedbu namota, prikazana je na sl. 9.]

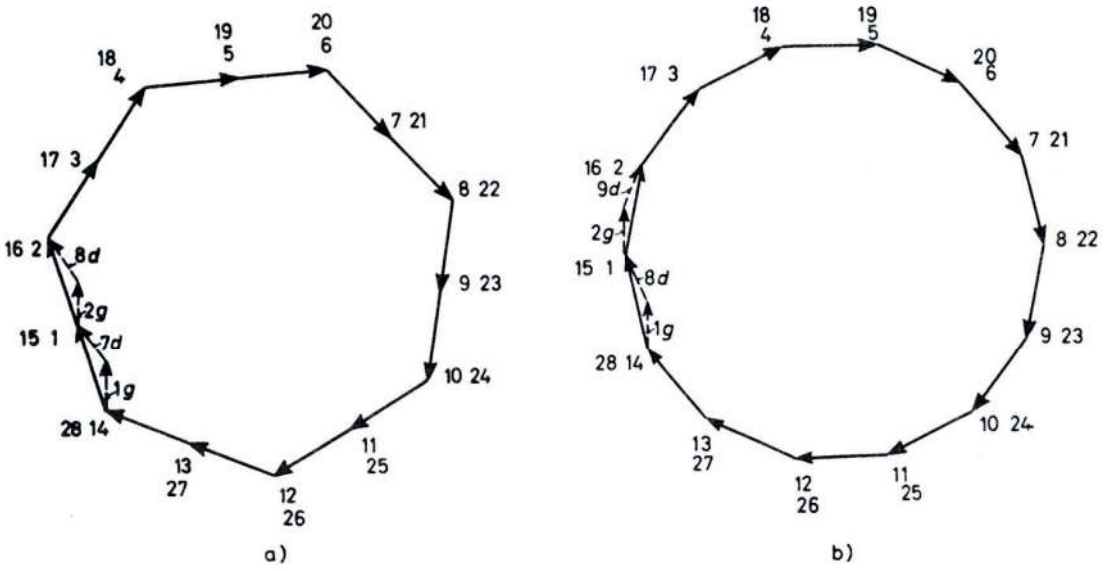


Sl. 9.

d) Napon zavoja između lamela kolektora 1 i 2 jednak je vektorskoj sumi napona vodiča 1*g* i 7*d*, a označen je vektorom 1, i dalje, između lamela kolektora 2 i 3 napon zavoja je $2 = 2g \hat{+} 8d$. Budući da su vodiči 1*g* i 2*g* u istom utoru, a vodiči 7*d* i 8*d* također u jednom utoru, vektori 1 i 2 imaju isti smjer (vidi detalj sl. 10.a).
Na slici 10.a predočen je vektorski mnogokut napona, koji je dvostruki sedmerokut (1–14 i 15–28) uslijed $p = 2$, a svaka mu stranica sadrži dva vektora napona zavoja.
[Vektorski mnogokut napona prikazan je na sl. 10.a.]

e) Napon zavoja između kolektorskih lamela 1 i 2 jednak je vektorskoj sumi napona vodiča 1*g* i 8*d*, a označen je vektorom 1, i dalje, između lamela kolektora 2 i 3 napon zavoja je $2 = 2g \hat{+} 9d$. Budući da su vodiči 1*g* i 2*g* u istom utoru, a vodiči 8*d* i 9*d* u raznim utorima, vektori 1 i 2 nemaju isti smjer (vidi detalj sl. 10.b).

Na slici 10.b vektorski je mnogokut napona, koji je dvostruki četrnaesterokut (zbog $p = 2$), a svaka mu stranica sadrži jedan vektor napona zavoja. [Vektorski je mnogokut napona na sl. 10.b.]

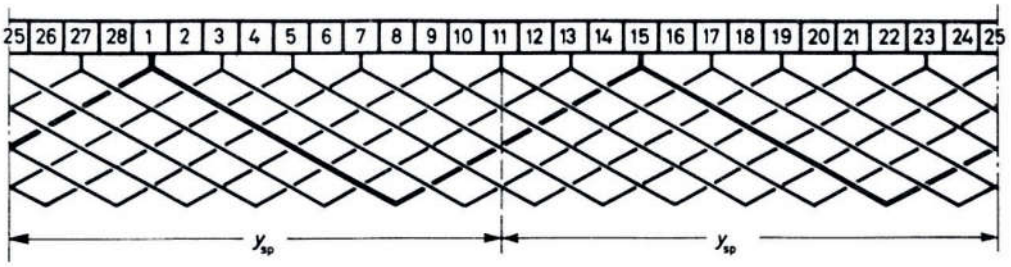


Sl. 10.

f) Simetrični petljasti namot ima p točaka istog potencijala, a korak spojki za izjednačenje potencijala petljastog namota prema izrazu (3.2–9) iznosi:

$$y_{sp} = \frac{k}{p} = 14.$$

Iz vektorskog mnogokuta napona na slici 10. vidi se broj točaka istog potencijala (1 i 15, 2 i 16, 3 i 17 itd.), i korak spojki za izjednačenje potencijala (15 – 1 = 14, 16 – 2 = 14 itd.). Korak spojki izjednačenja ovisi o vrsti namota (petljasti, valoviti), a ne o izvedbi namota (običan, stepeničast).



Sl. 11.

[Shema spoja spojki za izjednačenje potencijala, uz jednu spojku po utoru, prikazana je na sl. 11. i jednaka je za obje izvedbe armaturskog namota.]

6. Rješenjem jednadžbi:

$$\alpha_{el} = \frac{360}{N} p \quad \text{i} \quad \frac{180}{\alpha_{el}} = n$$

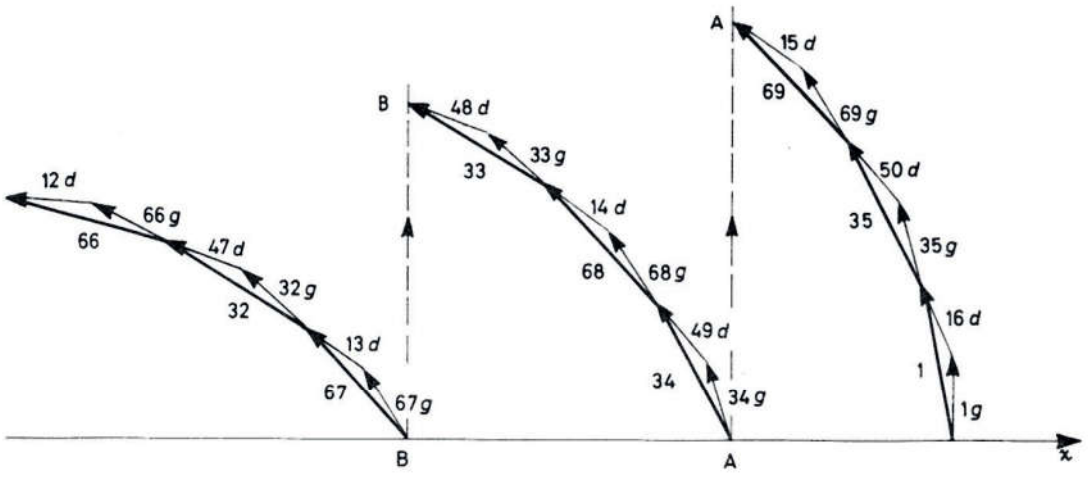
dobivamo mogući broj utora:

$$N = 2pn,$$

pri čemu je n cijeli broj.
[12 ili 16 utora]

7. a) [Simetričan je.]
b) [Korak namota $y = -1$, korak svitka $y_1 = 16$, spojni korak $y_2 = 17$ i utorski korak svitka 1 – 9. Shema namota: $1g - 17d$, $32g - 16d$, $31g - 15d$, ...]
c) [Vektorska je zvijezda napona jednostruka i sadrži 16 vektora međusobno pomaknutih za kut $\alpha_{el} = 22{,}5°$.]
d) [Vektorski mnogokut napona je jednostruki šesnaesterokut, a svaka strana mnogokuta sadrži dva vektora napona zavoja (npr. $32g + 16d + 31g + 15d$).]

8. a) [Simetričan je.]
b) [Korak namota $y = 34$, korak svitka $y_1 = 15$, spojni korak $y_2 = 19$ i utorski korak svitka 1–6. Shema je namota:
$1g - 16d$, $35g - 50d$, $69g - 15d$, $34g - 49d$, ...]
c) [Vektorska je zvijezda napona jednostruka i sadrži 23 vektora međusobno pomaknuta za kut $\frac{\alpha_{el}}{2} = 15{,}65°$.]
d) [Vektorski mnogokut napona je jednostruki 23-kut, a svaka strana mnogokuta sadrži tri vektora napona zavoja (npr. $1g + 16d$, $35g + 50d$, $69g + 15d$). Na sl. 12. prikazane su tri strane vektorskog mnogokuta napona, svaka sastavljena od tri vektora napona zavoja (npr. $1 \hat{+} 35 \hat{+} 69$)].



Sl. 12.

9. Broj kolektorskih lamela je $k = Nu = 22$.

Broj pari paralelnih grana dvovojnoga petljastog namota je $a = 2p = 4$.

a) [Simetričan je djelomično u smislu dvovojnoga petljastog namota.]

b) Korak namota dvovojnoga petljastog nekrižanog namota iznosi:

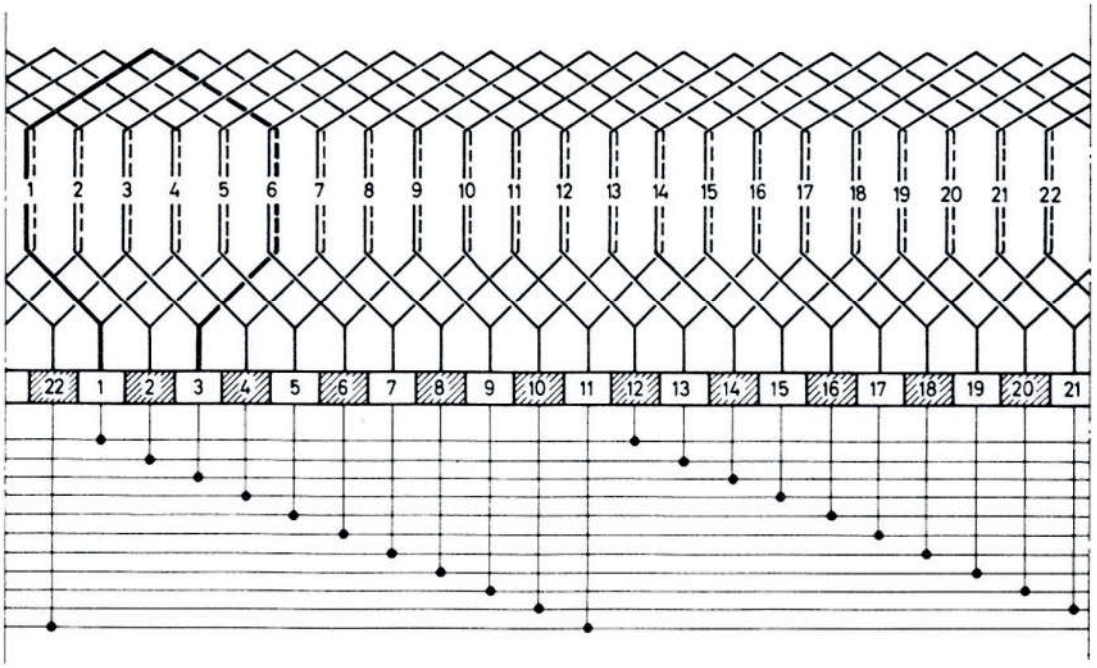
$$y = \pm \frac{a}{p} = \pm 2;$$ u našem primjeru $y = +2$.

Približni korak svitka je:

$$y'_1 = \frac{k}{2p} = 5{,}5;$$ odabiremo cijeli broj $y_1 = 5$.

Spojni korak je $y_2 = y_1 - y = 3$.

[Shema spoja namota armature prikazana je na sl. 13.]



Sl. 13.

c) Fazni pomak među vektorima napona susjednih utora bit će:

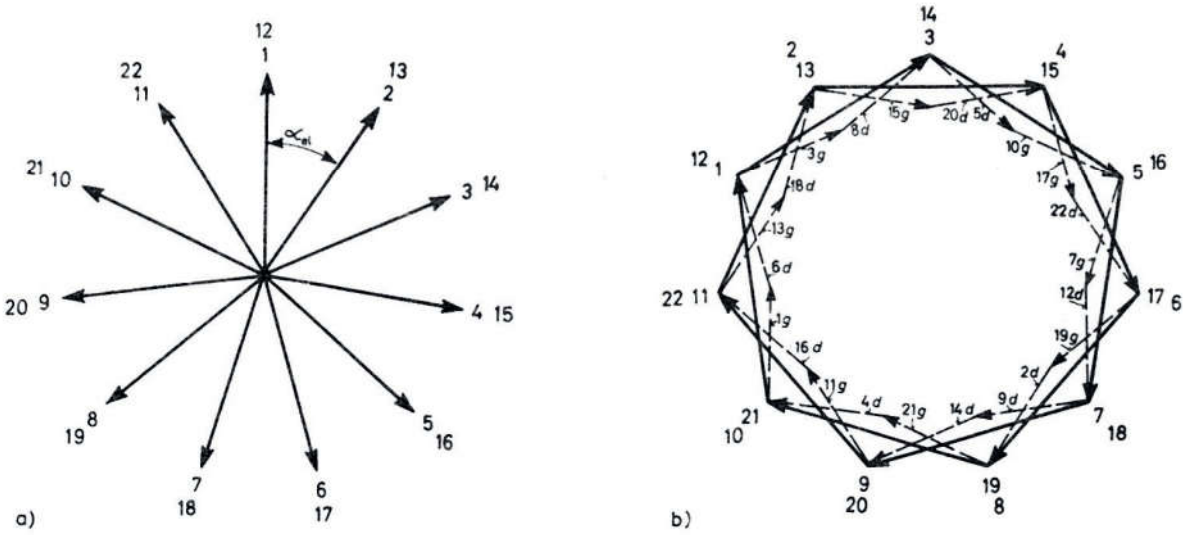
$$\alpha_{el} = \frac{360}{N} p = 32{,}73°.$$

[Na sl. 14.a prikazana je vektorska zvijezda napona, koja je dvostruka (1 – 11 i 12 – 22, zbog $p = 2$) i sadrži 11 vektora međusobno pomaknutih za α_{el}.]

d) Napon zavoja između prve i treće kolektorske lamele jednak je vektorskoj sumi napona vodiča $1g$ i $6d$, pa je označen vektorom 1, i dalje, između treće i pete kolektorske lamele vlada napon zavoja $3 = 3g \uparrow 8d$.

Na slici 14.b nalazimo vektorski mnogokut napona, koji je dvostruk (1-3-5--7-9-11-13-15-17-19-21 i 12-14-16-18-20-22-2-4-6-8-10). Iz sheme spoja namota i vektorskog mnogokuta napona vidi se da je namot dva puta zatvoren sam u sebe, tj. da su prije stavljanja četkica dva dijela namota galvanski odvojena. Prvi dio namota čine gornji vodiči iz neparnih i donji vodiči iz parnih utora, a drugi dio gornji vodiči iz parnih i donji vodiči iz neparnih utora.

[Vektorski je mnogokut napona na sl. 14.b.]



Sl. 14.

e) Korak je spojki za izjednačenje potencijala petljastog namota prema izrazu (3.2–9):

$$y_{sp} = \frac{k}{p} = 11.$$

Iz vektorskog mnogokuta napona na slici 14.b uočavamo točke istog potencijala (npr. 1 i 12, 2 i 13, 3 i 14 itd.) i korak spojki za izjednačenje potencijala (12 – 1 = 11, 13 – 2 = 11 itd.). Budući da je $\frac{N}{p}$ = neparni broj, svaka spojka za izjednačenje potencijala naizmjence spaja točke istog potencijala, ali iz različitih ovoja namota.

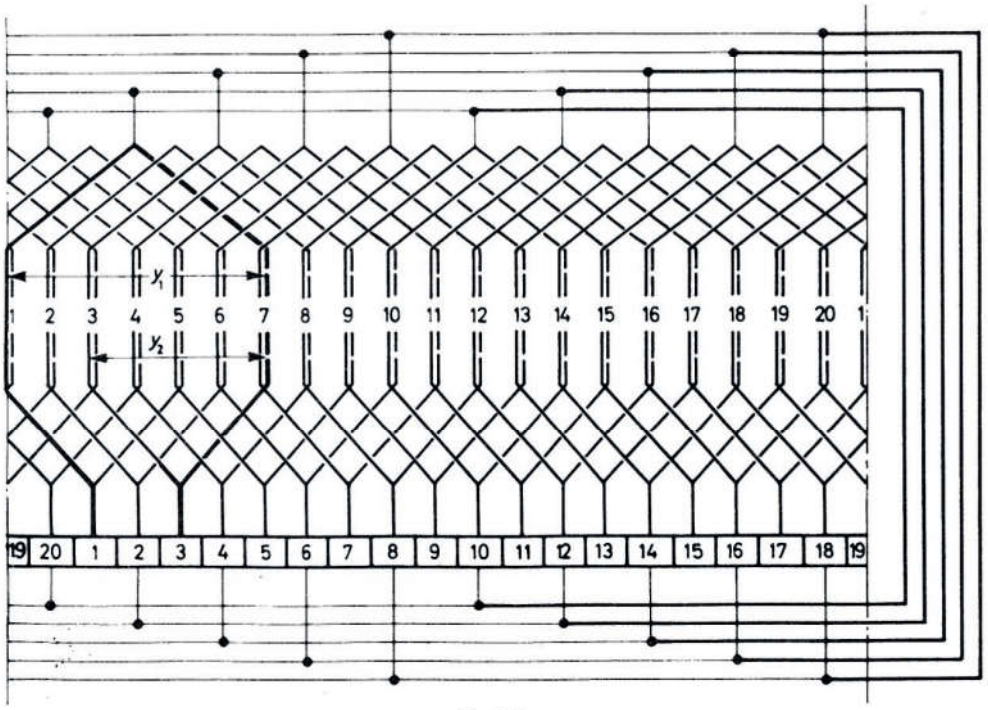
[Shema spojki za izjednačenje potencijala, uz jednu spojku po utoru, prikazana je na sl. 13.]

10. Broj lamela kolektora je $k = Nu = 20$, a broj pari paralelnih grana dvovojnoga petljastog namota $a = 2p = 4$.

a) Korak namota dvovojnoga petljastog nekrižanog namota iznosi uz pozitivni predznak $y = + \frac{a}{p} = + 2$.

Približni korak svitka je $y_1' = \frac{k}{2p} = 5$, pa odabiremo, zbog uvjeta u relaciji (3.2–10), $y_1 = 6$.

Spojni korak bit će tad: $y_2 = y_1 - y = 4$.
[Shemu spoja namota armature sadrži sl. 15.]

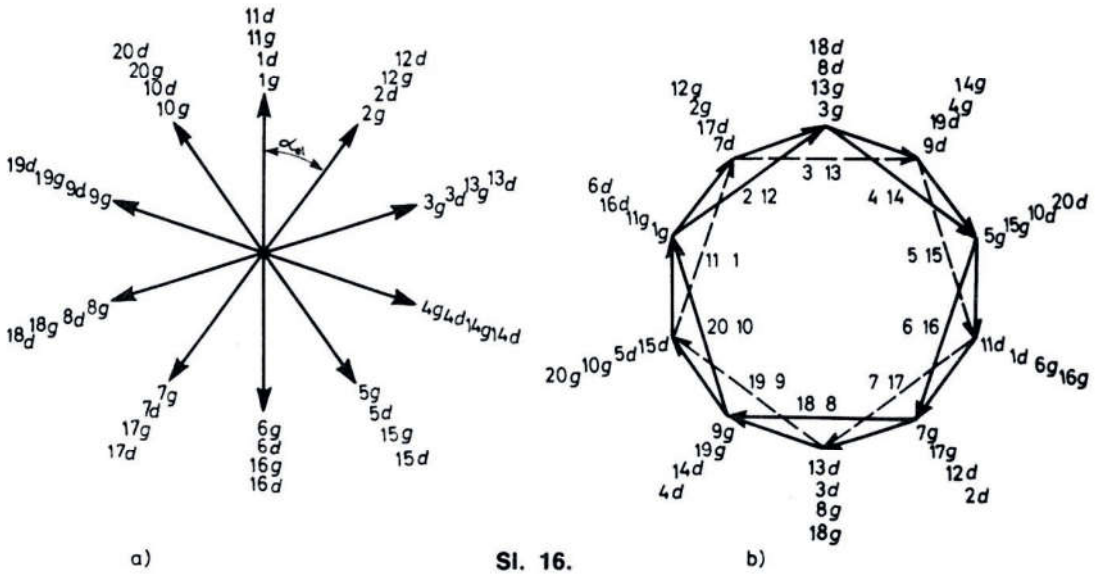


Sl. 15.

b) Fazni pomak među vektorima napona iz susjednih utora je:

$$\alpha_{el} = \frac{360}{N} p = 36^\circ.$$

[Na sl. 16.a prikazana je dvostruka vektorska zvijezda napona (1 – 10 i 11 – 20) zbog $p = 2$, koja sadrži deset vektora međusobno pomaknutih za α_{el}.]



Sl. 16.

c) Napon zavoja između lamela kolektora 1 i 3 jednak je vektorskoj sumi napona vodiča $1g$ i $7d$, a označen je vektorom 1, i dalje, između lamela kolektora 3 i 5 napon zavoja je $3 = 3g \hat{+} 9d$.
Na slici 16.b nalazimo dvostruki vektorski mnogokut napona (1-3-5-7-9 i 11-13-15-17-19, te 2-4-6-8-10 i 12-14-16-18-20). Osim napona zavoja (npr. vektori 1, 3 itd.) na vektorskom su mnogokutu napona prikazani i naponi vodiča (npr. vektori $1g$, $7d$) koji čine napon zavoja (npr. 1). Iz sheme spoja i vektorskog mnogokuta napona vidi se da je namot dva puta zatvoren sam u sebe. Prvi sam u sebe zatvoreni dio namota čine vodiči iz neparnih utora, a drugi dio vodiči iz parnih utora.
[Vektorski mnogokut napona prikazan je na sl. 16b.]

d) Korak spojki za izjednačenje potencijala petljastog namota je:

$$y_{sp} = \frac{k}{p} = 10.$$

Postavljanjem spojki za izjednačenje potencijala s korakom $y_{sp} = 10$ na strani kolektora možemo izjednačiti potencijale samo svakog ovoja zasebno (npr. 2 i 12, 4 i 14 itd. ili 1 i 11, 3 i 13, itd.), ali ne i cijelog namota. Crtanjem vektorskog mnogokuta napona vodiča (a ne zavoja) dobivamo točke istog potencijala (npr. početak vektora napona vodiča $2g$, $12g$ i kraj vektora napona vodiča $1g$, $11g$) koje možemo spojiti zajedno. Budući da se počeci vektora napona $2g$ i $12g$ nalaze na strani kolektora, a krajevi vektora napona vodiča $1g$ i $11g$ na kolektoru suprotnoj strani, to postavljamo grupu spojki na strani kolektora (izjednačuju jedan ovoj) i grupu spojki na strani suprotno od kolektora (izjednačuju drugi ovoj), a obje grupe spojki međusobno spajamo vodovima s jedne na drugu stranu stroja, i to ispod paketa željeza armature. Ti spojni vodovi su Punga-spojnice.

Nemogućnost postavljanja spojki za izjednačenje potencijala u oba ovoja s jedne strane namota pojavljuje se kad je $\frac{N}{p}$ = cijeli parni broj, a da bismo uopće mogli postaviti Punga-spojke, mora biti korak svitka $y_1 = \frac{k}{2p} \pm 1$ i spojni korak $y_2 = \frac{k}{2p} \mp 1$.

[Shemu spojki za izjednačenje potencijala nalazimo na sl. 15, pri čemu su Punga-spojnice izvučene debljom crtom.]

11. Broj kolektorskih lamela je $k = Nu = 36$, a broj pari paralelnih grana dvovojnoga valovitog namota iznosi $a = 2$.

a) Korak namota u dvovojnome nekrižanom valovitu namotu iznosi:

$$y = \frac{k - a}{p} = 17$$

Korak svitka je:

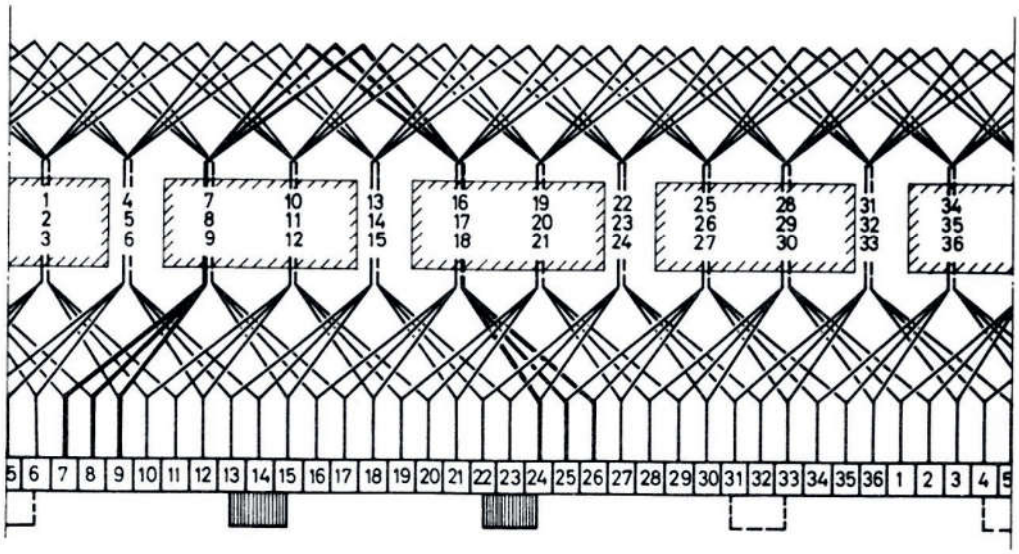
$y_1 = \frac{k}{2p} = 9$, što odgovara običnom namotu, gdje mora biti:

$$\frac{y_1}{u} = \text{cijeli broj} = 3.$$

Korak svitka izražen u utorskim koracima je: utor 1 u utor 4. Spojni korak iznosi:

$$y_2 = y - y_1 = 8.$$

[Shema spoja običnog namota armature predočena je na sl. 17.]



Sl. 17.

b) Korak namota ne ovisi o izvedbi namota armature i bit će:

$$y = 17.$$

Za korak svitka odabiremo:

$$y_1 = 8$$

jer stepeničastom namotu mora biti $\frac{y_1}{u} \neq$ cijelog broja. Korak svitka prikazan u utorskim koracima je iz utora 1 u utore 3 i 4, što uz korak svitka $y_1 = 8$ znači da se od tri strane svitaka iz utora 1 jedna strana svitka nalazi u utoru 3, a dvije u utoru 4.

Spojni korak je: $y_2 = y - y_1 = 9$.

[Shemu spoja stepeničastog namota armature sadrži sl. 3.3–8.]

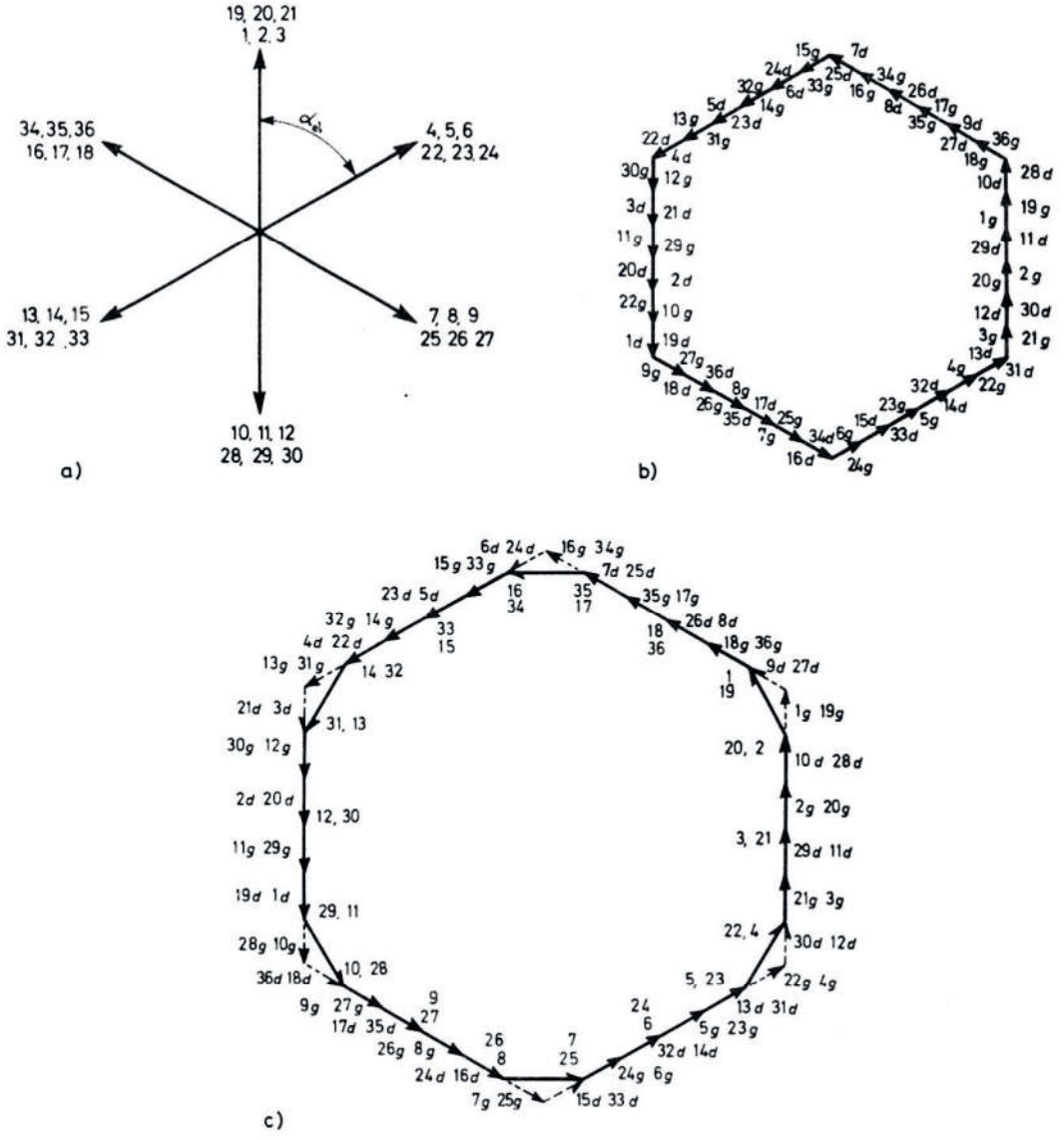
c) Fazni pomak među vektorima napona iz susjednih utora je:

$$\alpha_{el} = \frac{360}{N} p = 60°.$$

Na slici 18.a vektorska je zvijezda napona, koja je dvostruka (1–18 i 19–36, zbog $p = 2$) i sadrži šest vektora (1, 2 i 3, zatim 4, 5 i 6 itd., zbog $u = 3$) međusobno pomaknutih za kut α_{el}.

[Vektorska zvijezda napona, bez obzira na izvedbu namota, prikazana je na sl. 18.a.]

d) Vektorski mnogokut napona sastavljen od napona vodiča nalazimo na slici 18.b. Napon zavoja između lamela kolektora 1 i 18 jednak je vektorskoj sumi napona vodiča $1g$ i $10d$, i dalje, između kolektorskih lamela 18 i 35 vektorskoj sumi $18g$ i $27d$ itd.



Sl. 18.

Vektorski je mnogokut dvostruki šesterokut (zbog $a = 2$), a svaka mu stranica sadrži tri napona zavoja.

[Vektorski mnogokut napona sadrži sl. 18.b.]

e) Vektorski mnogokut napona prikazan je na slici 18.c. Oznake izvan mnogokuta (npr. $1g$, $19g$, $9d$, $27d$ itd.) znače napone vodiča, a oznake u mnogokutu napone zavoja (npr. $1 = 1g \uparrow\downarrow 9d$, $18 = 18g \uparrow\downarrow 25d$).

Vektorski mnogokuti napona sastavljeni od *napona vodiča* po obliku se ne razlikuju običnom i stepeničastom namotu (vidi sl. 18.b i 18.c).

Vektorski mnogokuti napona sastavljeni od *napona zavoja* razlikuju se pri običnom i stepeničastom namotu. Dok je običnom namotu mnogokut napona zavoja pravilni šesterokut, stepeničastom se namotu on pretvara u nepravilni dvanaesterokut s dužim stranicama (vektor napona dva zavoja) i kraćim stranicama (vektor napona jednog zavoja). Vektorski je mnogokut napona dvostruk zbog $a = 2$; vidi i sliku 3.3–12.b.

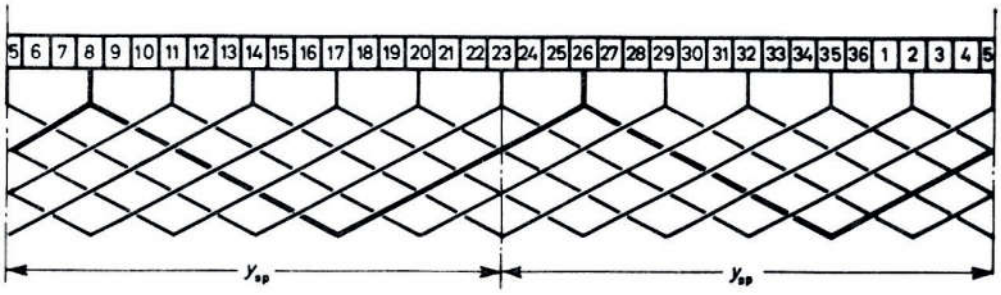
[Vektorske mnogokute napona vodiča i zavoja prikazuje sl. 18. c.]

f) Simetrični valoviti namot ima a točaka istog potencijala bez obzira na broj polova, a korak spojki za izjednačenje potencijala valovitog namota prema izrazu (3.3–5) iznosi:

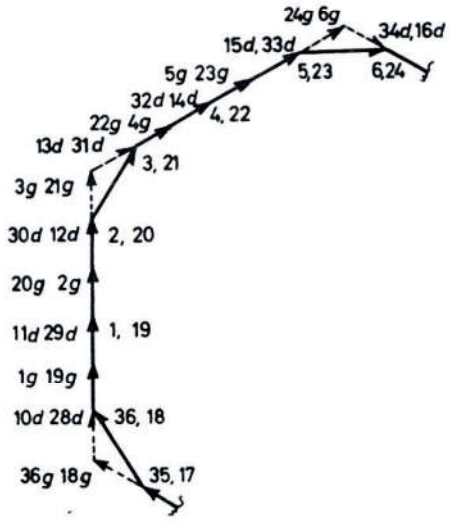
$$y_{sp} = \frac{k}{a} = 18$$

Iz vektorskih mnogokuta napona na slikama 18.b i 18.c vidi se broj točaka istog potencijala (1 i 19, 2 i 20, 3 i 21 itd.). Korak spojki za izjednačenje potencijala ne ovisi o izvedbi namota.

[Shemu spoja spojki za izjednačenje potencijala, uz jednu spojku po utoru, nalazimo na sl. 19. i jednaka je za obje izvedbe namota armature.]



Sl. 19.



Sl. 20.

12. a) [$k = 36$; korak namota $y = 19$ zbog predznaka plus u jednadžbi (3.3–2), korak svitka $y_1 = 10$, spojni korak $y_2 = 9$ i utorski korak svitka iz utora 1 u utore 4 i 5. Shema namota: $1g-11d$, $20g-30d$, $3g-13d$ itd.]

b) [Vektorska je zvijezda napona dvostruka i sadrži šest vektora međusobno pomaknutih za kut $\alpha_{el} = 60°$. Vidi sl. 18.a.]

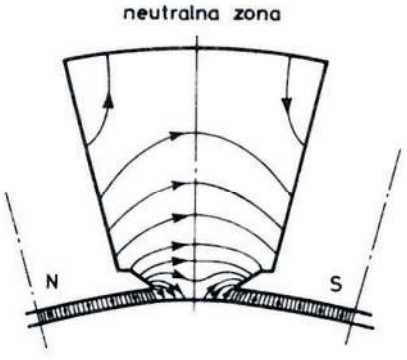
c) [Vektorski je mnogokut napona dvostruk i dvanaesterokut sa šest dužih stranica (vektor napona dva zavoja) i šest kraćih stranica (vektor napona jednog zavoja). Na sl. 20. dio je vektorskog mnogokuta napona.]

4. TEORIJA ISTOSMJERNIH STROJEVA

Svrha je teorije istosmjernih strojeva da u osnovi protumači sva fizikalna zbivanja koja se u istosmjernom stroju događaju u raznim uvjetima upotrebe. Daljnja joj je zadaća da obradi razne vrste istosmjernih strojeva, koje nastaju korišćenjem raznim varijantama spojeva između armature, mreže i uzbudnih namota. Time teorija stvara konstruktoru i proizvođaču istosmjernih strojeva čvrst temelj, od kojega oni polaze pri gradnji istosmjernih strojeva određenih za opće ili specijalne namjene u eksploataciji. Korisnik stroja crpe iz teorije saznanja koja mu omogućuju najpogodnije iskorištavanje stroja u tehničkom i ekonomskom pogledu.

4.1. Induciranje napona

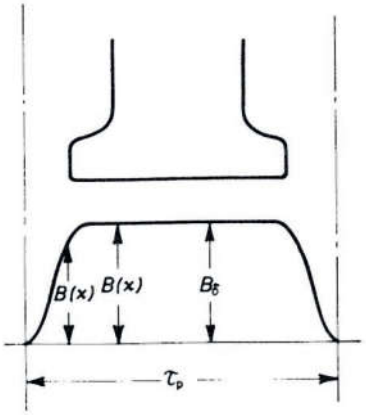
Zamislimo pojednostavnjeni presjek istosmjernog stroja, onakav kakav je na slici 2.1 – 1, ili sličan, s tom razlikom što ima armaturu s normalnim utorima u koje je smješten jedan potpun i ispravan namot. Postavlja se osnovno pitanje koliki je inducirani napona E u jednome takvu namotu uz pretpostavku da uzbudnim namotom teče konstantna uzbudna struja i_u [A] i da se stroj vrti konstantnom brzinom vrtnje n [s^{-1}] ili [min^{-1}]. Uzbudna struja s ukupnim zavojima uzbudnih namota na jednom paru polova stvara protjecanje $\Theta = i_u w_u$ koje će potjerati magnetski tok magnetskim krugom i stvoriti u zračnom rasporu stroja magnetsko polje indukcije B. Pri tome nije važno za rješenje našega trenutnog zadatka koliki je ukupni iznos magnetskog toka koji se stvori u stroju, nego nas zanima koliki je iznos upravo onoga magnetskog toka koji u području između dviju neutralnih zona vlada u zračnom rasporu, ili bolje rečeno, koji prelazi bilo iz pola u armaturu, bilo iz armature u pol. Taj tok nazivamo glavnim magnetskim tokom, a označavamo ga s Φ_{gl}[Vs], za razliku od rasipnoga magnetskog toka polova Φ_s, koji je uzbuđen istim protjecanjem, ali ne prolazi zračnim rasporom, već prostorom među polovima, i polnim papučama, kako je u principu prikazano na slici 1. Iznos normalne komponente indukcije, koju označujemo s $B(x)$, u prostoru između pola



Sl. 1. Uzbudno magnetsko polje u praznom hodu istosmjernog stroja, za jedan polni korak

i armature očito je konstantan pod polom i jednak iznosu B_δ, ali od krajeva polnih papuča opada prema neutralnim zonama, gdje poprima vrijednost nula, kako je skicirano na slici 2. Zanemarimo li rubne efekte na čeonim stranama paketa željeza armature, lako ćemo izračunati iznos glavnog magnetskog toka Φ_{gl} kao:

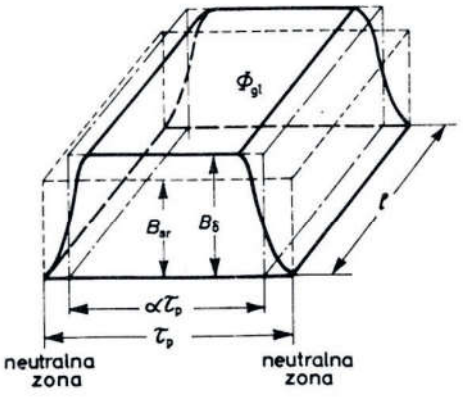
$$\Phi_{gl} = l \int_0^{\tau_p} B(x)\ \mathrm{d}x. \tag{1}$$



Sl. 2. Skica rasporeda magnetske indukcije po obodu armature ispod jednog pola istosmjernog stroja u praznom hodu

Tu je l dužina željeznog paketa armature i pola, a τ_p je polni korak. Taj iznos možemo predočiti volumenom geometrijskog tijela izvučenoga punom crtom na slici 3. Ali jednak volumen ima i pravokutni paralelopiped, na istoj slici izvučen točka-crtica linijom, kojem su bridovi B_δ, l, i $\alpha\tau_p$, pa za tok vrijedi:

$$\Phi_{gl} = \alpha\tau_p l B_\delta. \tag{2}$$



Sl. 3. Geometrijski prikaz glavnoga magnetskog toka na obodu armature pod jednim polom istosmjernog stroja

Pri tome α nazivamo faktorom prekrivanja pola, pa bi $\alpha\tau_p$ bio idealni polni luk za idealizirani slučaj, kad zrak lijevo i desno od tako zamišljenoga idealnog polnog luka ne bi uopće provodio magnetske silnice. Dakako da jednak volumen ima i crtkano izvučeni paralelopiped (sl. 3) s bridovima B_{sr}, l i τ_p, gdje je B_{sr} srednja vrijednost indukcije na prostoru polnog koraka, pa vrijedi:

$$\Phi_{gl} = \tau_p l B_{sr}. \tag{3}$$

Računamo li sa srednjom vrijednosti magnetske indukcije B_{sr} i s brzinom gibanja oboda rotora:

$$v = \frac{D\pi n}{60} = \frac{2p\tau_p n}{60},$$

dobit ćemo prosječnu vrijednost induciranog napona u jednom vodiču kao:

$$e_{sr} = B_{sr} l v = \frac{\Phi_{gl}}{l\tau_p} l \frac{2p\tau_p n}{60} = \frac{pn}{30} \Phi_{gl}.$$

Budući da u jednom namotu ima u seriju spojenih $\frac{z}{2a}$ vodiča, izlazi za inducirani napon u armaturi:

$$E = \frac{z}{2a} e_{sr} = \frac{z}{2a} \Phi_{gl} \frac{pn}{30} = \frac{p}{a} \frac{nz}{60} \Phi_{gl}. \tag{4}$$

Pri tome je Φ_{gl} u [Vs], a n u [min^{-1}]. U tom je obliku naš rezultat fizikalno najjasniji i najprikladniji za razmatranja naponskih prilika u stroju. On svakako zaslužuje izvjesnu diskusiju. Pokušajmo ga najprije prikazati u obliku u kojem smo navikli gledati slične izraze izmjeničnih strojeva. Najprije zamijenimo broj vodiča brojem efektivnih zavoja po jednadžbi (3.6-3):

$$w_a = \frac{z}{4a}.$$

Dalje, dio izraza (4) $\frac{pn}{60} = f$ klasični je izraz za frekvenciju i frekvencija je izmjeničnih veličina u rotoru stroja. Dakle, kad se to dvoje, a iz jednadžbe (3.6-3) i frekvencija prema iznesenom objašnjenju, uvedu u jednadžbu (4), dobivamo:

$$E = 4w_a f \Phi_{gl}. \tag{4.a}$$

Pri tome nam je f stvarna frekvencija toka, napona i struje, gledano sa strane rotora, odnosno armature, sa svim posljedicama koje su nam poznate iz teorije izmjeničnih strojeva. Ta je frekvencija mjerodavna za izračunavanje gubitaka u željezu armature, dodatnih gubitaka u namotu armature zbog potiskivanja struje u bakru armature itd.

Budući da je, dakle, riječ o izmjeničnoj armaturi, možemo i s izmjenične strane doći do jednadžbe (4.a). Načinimo to za kontrolu. Izraz za inducirani napon izmjeničnog stroja je:

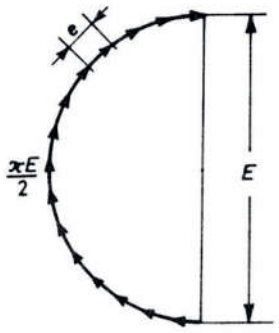
$$E_{ef} = 4{,}44\ f\ w f_n \Phi_{gl} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w f_n \Phi_{gl},$$

gdje je E_{ef} [V] efektivna vrijednost induciranog napona, w efektivni broj zavoja koji obuhvaćaju magnetski tok Φ_{gl}, a f_n je faktor namota (faze) struja. Pomnožimo li taj izraz s $\sqrt{2}$, da dobijemo maksimalnu vrijednost induciranog napona, izlazi:

$$\sqrt{2} E_{ef} = 2\pi f w f_n \Phi_{gl}.$$

Lijeva strana tog izraza odgovara za istosmjerni stroj induciranome istosmjernom naponu E, jer je kod istosmjernog stroja riječ o maksimalnoj, a kod izmjeničnoga

o efektivnoj vrijednosti. Na desnoj strani izraza ostao je još faktor namatanja f_n, koji valja odrediti za istosmjerni namot. Ako pretpostavimo sinusnu raspodjelu magnetskog toka po obodu armature, te ako stroj ima dovoljno velik broj utora na armaturi, onda se vektorski mnogokut napona svitaka u jednoj grani može zamijeniti polukrugom (vidi sl. 4). Tad se napon na četkicama E prema



Sl. 4. Određivanje faktora namota istosmjernom stroju

aritmetičkoj sumi napona svitaka e odnosi u omjeru $2:\pi$, jer je napon stroja predočen promjerom polukruga. Unesemo li taj rezultat u prethodnu jednadžbu:

$$\sqrt{2}\,E_{ef} = 2\pi f w\,\frac{2}{\pi}\,\Phi_{gl},$$

dobivamo već izvedenu jednadžbu (4.a), tj.:

$$E = 4 w_a f\,\Phi_{gl}.$$

Pri tome je očita jednakost $w = w_a$ jer je s w_a samo označeno da je riječ o zavojima namota armature.

Dakle, dobiveni rezultat potvrđuje dosadašnje izvode.

Našu osnovnu relaciju (4) dobili bismo, dakako, i da smo umjesto od jednadžbe (3) u računu napona vodiča pošli od jednadžbe (1) ili (2). Osnovno je da je za rezultat mjerodavan glavni magnetski tok Φ_{gl}. Pogledamo li jednadžbu (4) malo pobliže, odmah utvrđujemo činjenicu da su za neki izvedeni stroj veličine p, a i z konstante, pa vrijedi:

$$E = k'_e n \Phi_{gl}, \tag{5}$$

gdje je:

$$k'_e = \frac{p}{a}\,\frac{z}{60}, \tag{6}$$

tj. faktor proporcionalnosti između induciranog napona E i umnoška glavnoga magnetskog toka Φ_{gl} s brzinom vrtnje n. U čistom sistemu jedinica, gdje se radije upotrebljava kutna brzina $\omega\,[s^{-1}]$ (čitaj: radijana u sekundi) umjesto brzine vrtnje $n[min^{-1}]$ (čitaj: okretaja u minuti) formalno se mijenja oblik jednadžbe (4). Iz poznate definicije za kutnu brzinu:

$$\omega = \frac{n\pi}{30}$$

uvrštenjem n u jednadžbu (4) dobivamo:

$$E = \frac{pz}{2a\pi}\,\omega\Phi_{gl}. \tag{4.b}$$

Ako tad konstantni dio desne strane jednadžbe (4.b) izrazimo sa:

$$k_e = \frac{pz}{2a\pi}, \tag{6.a}$$

možemo napisati i:

$$E = k_e \omega \Phi_{gl}. \tag{5.a}$$

U obliku (5) ili (5.a) pruža nam jednadžba za inducirani napon već vrlo vrijedne podatke o osnovnom ponašanju istosmjernih strojeva. Tako za generator i za motor možemo zaključiti ovo:

– Napon se generatora lako mijenja bilo promjenom brzine vrtnje n ili kutne brzine ω (što se gotovo nikad ne susreće), bilo promjenom toka Φ_{gl} (što se gotovo uvijek upotrebljava). Glavni tok Φ_{gl} mijenja se promjenom uzbudne struje, što je većinom i dovoljno brzo, jer su tromosti magnetskog polja još u podnošljivim granicama, a sama regulacija je dovoljno ekonomična, jer je snaga uzbudnog kruga reda veličine 1 % snage generatora.

– Napišu li se jednadžbe (5) ili (5.a) eksplicitno za n, odnosno ω:

$$n = \frac{1}{k'_e} \frac{E}{\Phi_{gl}}, \tag{5.b}$$

$$\omega = \frac{1}{k_e} \frac{E}{\Phi_{gl}}, \tag{5.c}$$

očito je da su dvije mogućnosti promjene brzine vrtnje ili kutne brzine motora. Prva se mogućnost ostvaruje mijenjajući narinuti napon, a naziva se regulacija (podešavanje) naponom, a drugom mijenjamo magnetski tok, odnosno uzbudnu struju, pa je nazivamo regulacija poljem (podešavanje). Objema se mogućnostima vrlo često koristi u praksi. Razlike upotrijebljenih izraza *regulacija* i *podešavanje* proizlaze iz u praksi učvršćenog shvaćanja da se podešavanje obavlja ručno, a regulacija automatski.

Trebalo bi se još časak zadržati na praktičnoj strani prikazivanja glavnog magnetskog toka relacijom (2). Očito je iz puta kojim je izveden pojam idealnoga polnog luka $\alpha\tau_p$ da je riječ o jednoj zamišljenoj veličini. No, moguće je konstruirati takav oblik polne papuče da se idealni polni luk $\alpha\tau_p$ poklapa po iznosu točno sa stvarnim geometrijskim polnim lukom. Čak štoviše, za one dužine polnog luka koje dolaze u praktičnim izvedbama, izvede li se oblik polne papuče polukružan, i to tako da je zračni raspor konstantan, razlike u proračunu sa stvarnim polnim lukom, umjesto idealnim, toliko su male da se mogu zanemariti. Povoljna je činjenica da je takav oblik pola najlakši i za proizvodnju. Bez obzira na to je li oblik polne papuče korigiran (zaokružen) na samim krajevima papuče ili ne, za praksu je dovoljno točno izračunati pomoću omjera:

$$\alpha \doteq \frac{\text{širina polne papuče}}{\text{polni korak}}, \text{ tj. } \alpha \doteq \frac{b_p}{\tau_p}. \tag{7}$$

Faktor α iz jednadžbe (7) nazivamo *prekrivanje* pola. Normalno se prekrivanje pola izvodi prilikom gradnje stroja:

$\alpha = 0{,}6 - 0{,}72$ za stroj s pomoćnim polovima;

$\alpha = 0{,}65 - 0{,}75$ za stroj bez pomoćnih polova.

Pri tome manje vrijednosti odgovaraju strojevima manje snage, a veće strojevima veće snage. U odjeljku o komutaciji bit će navedene brojke detaljnije obrazložene.

Još je potrebno načelno razjasniti odnos između induciranog napona E i napona stezaljki U. Pretpostavljamo da je riječ o nezasićenom stroju, tj. da uz promatrane uvjete ni u jednom dijelu magnetskog kruga nema tolikog iznosa indukcije B da se znatniji dio uzbudne struje troši na magnetiziranje željeza, tj. kao da je sva uzbudna struja praktički potrebna za svladavanje magnetskog otpora u zračnom rasporu. Kad je razmatrani stroj opterećen, njegovom armaturom teče struja I_a. Ta struja izaziva u otporima armature pad napona $I_a R_a$. Također nastaje i pad napona na četkicama kroz koje struja ulazi i izlazi iz armature. Do ovog pada napona dolazi zbog prelaznog otpora s četkica na kolektor i obratno.

Prema tome se u principu inducirani napon u generatoru raspodjeljuje na napon koji se utroši na potrošaču (mreži) i na pad napona na otporu armature i na četkicama, tako da za napon stezaljki vrijedi prema drugome Kirchoffovu zakonu:

$$U = E - I_a R_u - \Delta U_č. \tag{8}$$

Za motor će biti drukčije. Napon narinut na stezaljke troši se na pad napona u otporu armature, na pad napona na četkicama i na svladavanje induciranog napona E, koji se protivi narinutom naponu, pa se zbog toga često naziva i protuinducirani napon:

$$U = E + I_a R_u + \Delta U_č. \tag{9}$$

U jednadžbama (8) i (9) namjerno je upotrijebljena oznaka (za otpor u stroju) R_u umjesto R_a, koju smo prije uveli za otpor armature. Velikoj većini stvarnih izvedenih strojeva između stezaljki stroja i četkica spojeni su u seriju još i razni drugi namoti, o funkciji kojih će biti još riječi. Očito je da je ukupni otpor između stezaljki, izuzevši prelazni otpor na četkicama, mjerodavan za stvaranje pada napona $I_a R_u$. Taj *ukupni otpor*, označen s R_u, rado nazivamo *otporom armature u proširenom smislu;* tako je $R_u = \Sigma R$, gdje je R_a samo jedan od pribrojnika na desnoj strani. To ide tako daleko da se uvriježilo pod pojmom pada napona na armaturi misliti na tako definiran ukupni pad napona među stezaljkama, izuzevši pad napona na četkicama.

Kad se više ne može smatrati da je stroj nezasićen, a to je tako u većini praktičkih primjera, nisu više odnosi između E i U tako jednostavni kao što je upravo iznijeto. Utjecaj zasićenja bit će detaljno obrađen u odjeljku o reakciji armature.

4.2. Stvaranje okretnog momenta

Da bismo ustanovili koliki moment razvija istosmjerni stroj, vratimo se nanovo na osnovnu predodžbu stroja prema slici 2.1 – 1, koju upotpunimo tako da zamislimo armaturu s normalnim brojem utora i potpunim namotom. Iskoristimo li razmatranja o magnetnom toku Φ_{gl} i indukciji B iz prethodnog odjeljka, možemo odmah utvrditi da sve sile koje djeluju na pojedine vodiče, bilo gdje se oni nalazili na obodu armature, imaju tangencijalni smjer na obod armature. Na osnovi izlaganja u drugom poglavlju i relacije (2.1 – 3) možemo napisati za srednju vrijednost momenta jednog vodiča (uz srednju vrijednost indukcije B_{sr} uvedenu u odjeljku 4.1):

$$M_v = \frac{1}{2} I_v B_{sr} l D.$$

Pri tome je I_v struja vodiča, l dužina paketa željeza armature, a D je promjer armature u zračnom rasporu. Pretpostavimo da je namot dovoljno fino razdijeljen i da prema jednadžbi (2.2 – 2) ima mnogo utora po polu, pa ćemo daljnja razmatranja provesti uvođenjem strujnog obloga A, tj. promatrat ćemo rotor tako kao da je ukupna struja jednoliko porazdijeljena po njegovu obodu. Strujni je oblog naš stari znanac, pojam koji je definiran i razrađen još u osnovama strojeva. Pišimo, dakle:

$$A = \frac{I_v z}{D\pi} = \frac{I_v z}{2p\tau_p} = \frac{I_a z}{2aD\pi}, \tag{1}$$

pri čemu je I_a ukupna struja armature. Ako odatle izrazimo I_v, vrijedit će za moment vodiča:

$$M_v = \frac{1}{2} \frac{2p}{z} \tau_p B_{sr} l D A = \frac{p}{z} \Phi_{gl} D A.$$

Odatle se dobiva relacija za ukupni moment motora množenjem brojem vodiča z:

$$M = p \Phi_{gl} D A. \tag{2}$$

Izrazimo li DA iz jednadžbe (1), bit će:

$$M = \frac{pz}{2a\pi} \Phi_{gl} I_a \text{ [Nm]}. \tag{3}$$

Jednadžbe (2) i (3) osnovne su jednadžbe za proračunavanje zakretnog momenta. Budući da su za neki konkretni istosmjerni stroj veličine p, a i z konstantne, dalje pišemo:

$$M = k_m \Phi_{gl} I_a, \tag{4}$$

gdje je:

$$k_m = \frac{pz}{2a\pi} \tag{5}$$

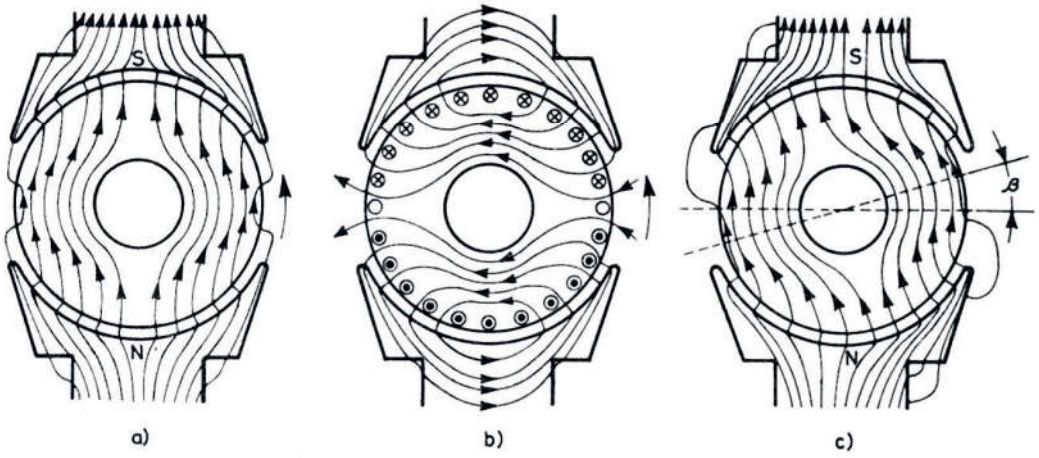
konstanta proporcionalnosti između razvijenog momenta motora i umnoška glavnoga magnetskog toka i struje armature. Evidentno je da je k_m iz jednadžbe (5) identično s k_e iz jednadžbe (4.1 – 6.a).

Izraz za moment (4), izuzme li se konstanta proporcionalnosti k_m, jednak je onome u izmjeničnih strojeva.

4.3. Reakcija armature

Optereti li se normalni istosmjerni stroj, poteći će njegovim namotom armature struja tereta. Ta struja sa zavojima armature stvara protjecanje, a ono uspostavlja u stroju jedno novo magnetsko polje, kojega u praznom hodu nije bilo. Budući da se to novo magnetsko polje stvara u prostoru gdje je već jedno drugo magnetsko polje, ta dva polja formiraju zajedničko, rezultantno polje. Pod teretom se, dakle, općenito mijenja magnetsko polje po iznosu i smjeru u pojedinim točkama stroja, jer se mijenja ukupna uzbuda koja to polje stvara. Možemo, sasvim općenito, očekivati promjenu glavnog magnetskog toka, kako po iznosu, tako i po gustoći, u pojedinim točkama stroja. To, dakako, izaziva cijelo mnoštvo promjena u fizikalnom djelovanju stroja. Kako cijeli proces nastaje sudjelovanjem armaturnog protjecanja u ukupnoj uzbudi stroja, cijelu pojavu s njezinim posljedicama nazivamo reakcijom armature.

Pojavu je potrebno potanje razmotriti, i to ne samo radi ispravnog razumijevanja funkcioniranja stroja već i zbog presudnog utjecaja koji ta pojava ima na gradnju istosmjernih strojeva uopće. Počnimo od osnovnih predodžbi. Zamislimo shematski presjek istosmjernog stroja i u shemi izostavimo (ne crtajmo) sve one detalje koji nam mogu pomutiti izgled magnetskog polja prikazanoga silnicama. Na slici 1. smo za tri razna stanja uzbude ucrtali tako zamišljeno magnetsko polje. Na prvom prikazu (sl. 1.a) ucrtano je polje u praznom hodu, kakvo poznajemo otprije. Na drugom prikazu (sl. 1.b) nacrtano je polje što ga stvara samo protjecanje armature, tj. kad armaturom teče struja smjer koje je označen, i to na neuzbuđenom stroju, tj. kad uzbudnim namotom ne teče nikakva struja. Cijelo tako prikazano polje potječe, dakle, samo od uzbudnog djelovanja armature. Na slici 1.c, tj. u trećem prikazu, superponirano je stanje prvog i drugog prikaza, tj. prikazano je stanje pri kojem uz normalnu uzbudu sa statorske strane armaturom teče još i neka struja tereta. To je, dakle, neko stvarno pogonsko

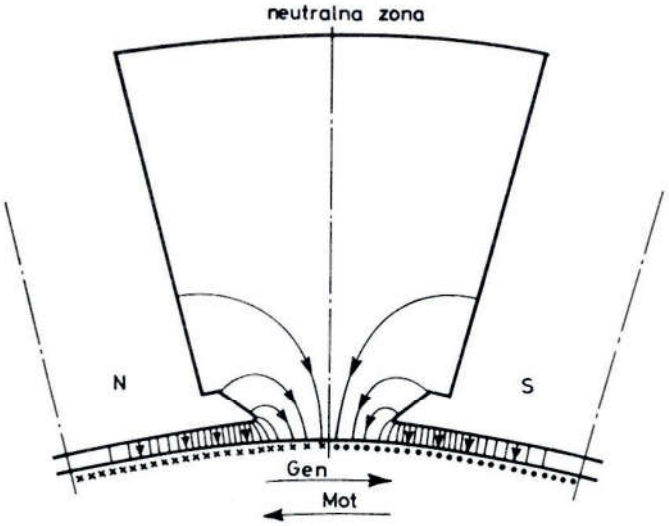


Sl. 1. Pojednostavnjeni prikaz magnetskog polja u zračnom rasporu istosmjernog stroja:
a) za prazni hod i uzbudu izazvanu samo uzbudnim namotom
b) za stroj neuzbuđen sa strane polova, ali uzbuđen djelovanjem struje u armaturi
c) za uzbuđen i opterećen stroj – rezultantno magnetsko polje

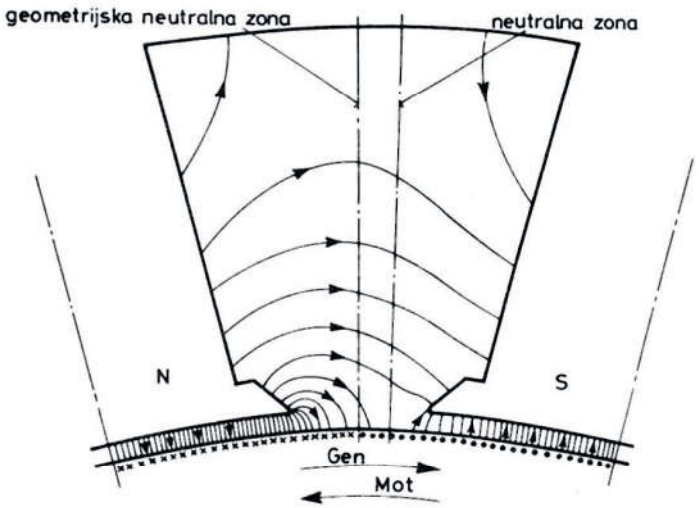
stanje stroja, ono koje nas upravo zanima. Prema stanju magnetskog polja neopterećenog stroja (sl. 1.a), koje smo dosad uvijek pretpostavljali, pokazuje to stanje magnetskog polja pod opterećenjem već iz ove slike dvije bitne razlike:

a) magnetsko polje više nije homogeno porazdijeljeno na površini pola i u zračnom rasporu;
b) neutralna se zona pomaknula iz geometrijske simetrale međupolnog prostora za neki kut, koji nazovimo β.

Kako te slike polja izgledaju na stvarnim strojevima, sa stvarnim konstrukcijskim dimenzijama, prikazano je za uzbuđen i neopterećen stroj na slici 4.1 – 1, za neuzbuđen stroj sa strujom u armaturi na slici 2, a za pogonsko stanje, tj. uzbuđen i opterećen stroj na slici 3.

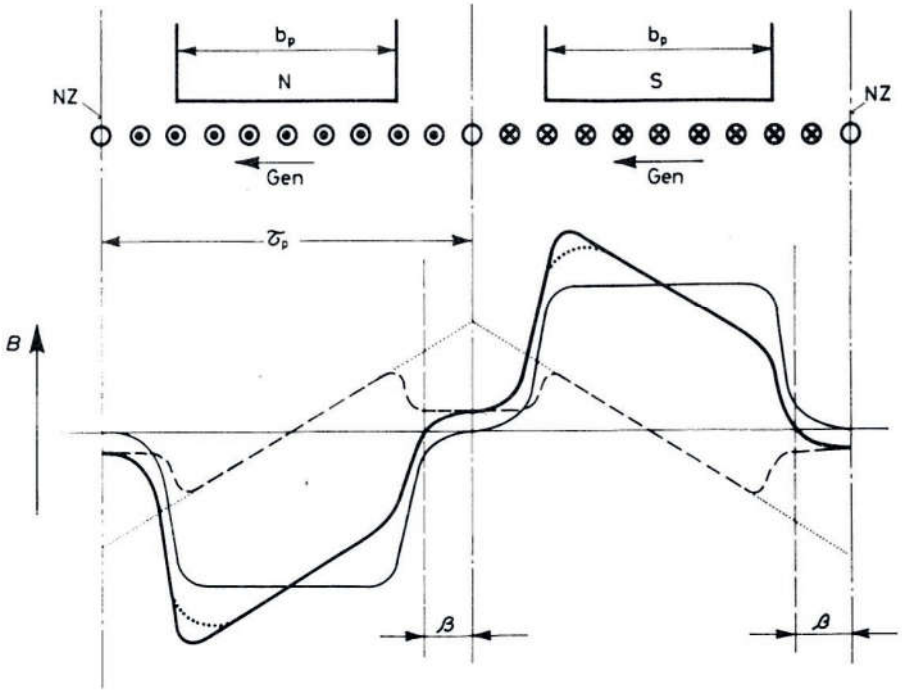


Sl. 2. Magnetsko polje nastalo djelovanjem struje armature stroja uz neuzbuđene glavne polove



Sl. 3. Rezultantno magnetsko polje uzbuđeno i osnovnom uzbudom i strujom armature; stroj bez pomoćnih polova

Uz pomoć tih osnovnih slika uspjeli smo konstatirati deformaciju magnetskog polja uslijed reakcije armature, no još ništa ne znamo o kvantitativnim promjenama toka, koje svakako valja očekivati. Razmotrimo, dakle, još jednom pažljivo karakter superpozicija pojedinih uzbuda na slici 4.



Sl. 4. Prostorna raspodjela rezultantnoga magnetskog polja opterećenoga istosmjernog stroja (bez pomoćnih polova); utjecaj pojedinih komponenata uzbude

Ispod polova N i S označen je smjer vrtnje generatora (za jedan određen slučaj moramo se odlučiti) i naznačeni su vodiči armature sa smjerom struje. Tankom linijom predočena je raspodjela (gustoća) magnetskog polja u zračnom rasporu pri praznom hodu. Magnetsko polje nastalo uslijed uzbude izazvane armaturnom strujom predočeno je tankom crtkanom linijom. Ono se pod polom mijenja po pravcu ako je armaturna uzbuda jednoliko raspodijeljena po obodu rotora. Pretpostavili smo, dakle, da namot nije raspodijeljen u utore, što bi izazvalo stepeničasti karakter tanko crtkane linije na slici 4, već da je odgovarajući armaturni strujni oblog jednoliko raspodijeljen po obodu rotora. Kad ne bi bilo promjene širine zračnog raspora, taj bi se pravac produžio i u međupolno područje, kako je to točkastom linijom označeno. U stvarnosti opada indukcija u međupolnom prostoru zbog porasta magnetskog otpora i ima iznose koji odgovaraju tanko izvučenoj crtkanoj liniji. Superpozicijom tih dviju krivulja dobivamo (uvjetno) stvarni iznos indukcije za pretpostavljeno pogonsko stanje, što je na slici izvučeno punom debelom linijom. Tako bi glavni magnetski tok ostao isti kao i neopterećenom stroju, što je sa slike evidentno. I bilo bi zaista tako kad ne bismo odmah uvidjeli da ta predodžba vrijedi samo za magnetski nezasićene strojeve, tj. za strojeve kojima indukcija u bilo kojoj točki magnetskog kruga u željezu ne premašuje veće vrijednosti. Na slici 1.c vidi se, naime, da se

deformacija magnetskog polja posebno odrazila na vršcima polnih papuča. Dok se jedan vršak pola magnetski rasteretio, drugi se opteretio, tj. indukcija mu je znatno porasla, što se uočava i na slici 4, koju upravo analiziramo. Ako je stroj potpuno nezasićen (jako magnetski neiskorišćen), postojeća će uzbuda protjerati povećani dio ukupnog toka kroz taj opterećeniji vršak pola, pa vrijedi puna debela linija, tj. zbroj iznosa indukcija u svakoj točki stroja. No, ako je stroj pravilno magnetski iskorišćen, tj. zasićen, postojeća će uzbuda protjerati manji tok kroz opterećeniji vršak polne papuče nego u prethodnom primjeru jer se na tom mjestu bitno povećao magnetski otpor željeza. U tom će se slučaju promijeniti rezultantna krivulja magnetskog polja, koja je debelom točkastom linijom unesena na slici 4. To je redovno tako pri ispravno građenom stroju. Dakle, zbog zasićenja gubimo na iznosu glavnoga magnetskog toka Φ_{gl} kod opterećenoga, u usporedbi s neopterećenim strojem. Na slici 4. vidi se i pomak stvarne neutralne zone za kut β.

Reakcija armature tako objašnjena izaziva četiri osnovne neugodne i neželjene posljedice:

a) gubitak na iznosu induciranog napona E;
b) povećanje gubitaka u željezu;
c) pomak stvarne neutralne zone iz položaja geometrijske neutralne zone;
d) porast napona među pojedinim lamelama.

Bit će od nesumnjive koristi da detaljnije obradimo svaku od tih posljedica.

4.3.1. Gubitak induciranog napona zbog reakcije armature

Budući da je inducirani napon istosmjernog stroja E, prema jednadžbi (4.1 – 5), proporcionalan iznosu glavnoga magnetskog toka, to mu i iznos opada proporcionalno iznosu Φ_{gl}. U slučaju stroja kao generatora to znači i opadanje (smanjenje) napona na stezaljkama, prema jednadžbi (4.1 – 8), i to ne samo zbog padova napona na otporu armature i četkicama kad poteče struja, nego i zbog smanjenja induciranog napona uzrokovanoga reakcijom armature. U krajnjoj konzekvenciji smanjuje se i snaga stroja, što odmah postaje evidentno pomnožimo li jednadžbu (4.1 – 8) armaturnom strujom I_a. U slučaju stroja kao motora, kad je narinuti napon U čvrst, trebalo bi pod opterećenjem da i inducirani napon E i glavni magnetski tok Φ_{gl} ostanu čvrsti pa da se ne promijeni brzina vrtnje – vidi jednadžbu (4.1 – 5.b) ili (4.1 – 5.c). Međutim, izrazimo li eksplicitno brzinu vrtnje motora n uz pomoć jednadžbe (4.1 – 9):

$$n = \frac{1}{k'_e} \frac{U - I_a R_u - \Delta U_č}{\Phi_{gl}}, \tag{1}$$

vidi se da se brzina vrtnje mijenja s opterećenjem motora, i to kako zbog smanjenja induciranog napona E uslijed pada napona na otporima stroja i četkicama (brzina vrtnje bi opadala), tako i zbog smanjenja glavnoga magnetskog toka Φ_{gl} izazvanoga reakcijom armature (brzina vrtnje bi rasla). Tendencija da brzina vrtnje raste s opterećenjem motora je nepoželjna jer vodi k nestabilnosti motora. Obje nepoželjne pojave, smanjenje napona generatoru i povećanje brzine

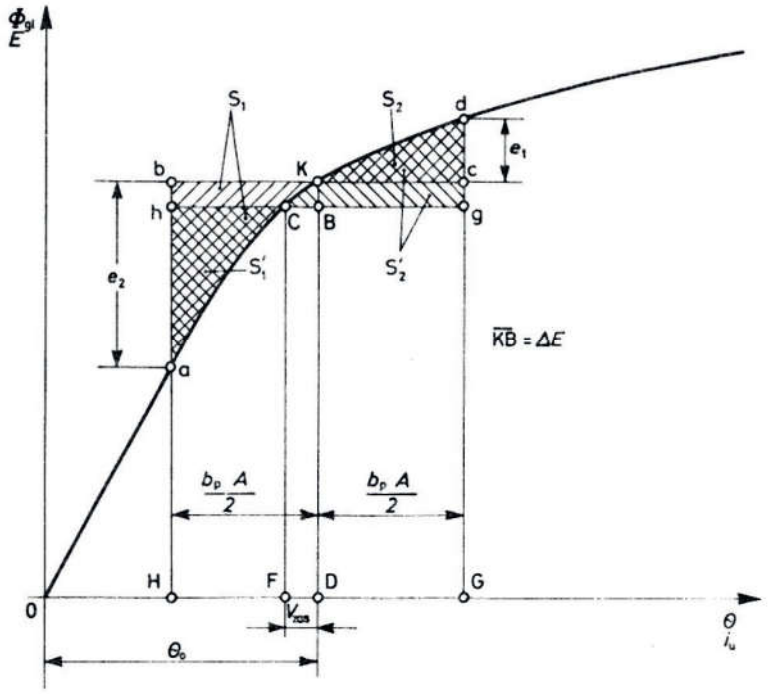
vrtnje motoru, posljedica su reakcije armature. Iz tih je razloga, pa i radi što točnijeg poznavanja rada stroja uopće, potrebno i kvantitativno izraziti smanjenje induciranog napona, odnosno glavnoga magnetskog toka opterećenom stroju.

Jedina fizikalno točna metoda za određivanje iznosa magnetskog toka Φ_{gl} nekome opterećenom stroju je provedba prostorne integracije tog toka na temelju jednadžbe (4.1 – 1). To bi se moglo učiniti, recimo, točnim crtanjem silocijevi za stanje magnetskog polja pri složenoj uzbudi (vidi sl. 1.c i 3) ili sličnim postupkom uz pomoć elektroničkog računala. Taj vrlo složeni i mukotrpni posao radi se danas samo pri istraživačkim radovima na istosmjernom stroju. U rješavanju praktičkih zadataka (proračuna) zadovoljavaju i određene praktičke (približne) metode koje daju dovoljno pouzdane rezultate. Tih metoda ima više, no mi ćemo prikazati onu koja je provjerena pri gradnji strojeva u domaćoj industriji. Osnova joj je određivanje gubitaka glavnoga magnetskog toka ili induciranog napona iz krivulje ili karakteristike praznog hoda stroja. Ta se krivulja dobiva bilo ispitivanjem stroja u praznom hodu, bilo proračunom magnetskog kruga stroja za različite iznose uzbude. To je, dakle, funkcionalna ovisnost induciranog napona E ili magnetskog toka Φ_{gl} o protjecanju uzbudnog namota Θ_0 ili o uzbudnoj struji i_u pri konstantnoj brzini vrtnje – sve bez tereta. Ta je karakteristika nacrtana na slici 5. Na toj slici dužina $\overline{KD}$ predočuje inducirani napon E u praznom hodu. Teče li armaturom struja I_a, uzbudno djelovanje koje možemo nadomjestiti strujnim oblogom A, bit će pod sredinom pola širine b_p takva indukcija koja bi proizvela inducirani napon iznosa $\overline{KD}$ kad bi vladala pod cijelim polom (što je razumljivo iz sl. 4). Na jednoj strani pola od te točke na udaljenosti x suprotstavlja se protjecanje armature protjecanju uzbude iznosom xA pa indukcija opada. Pod vršKom pola iznosi to suprotno protjecanje $b_pA/2$, pa bi se u stroju inducirao napon E u iznosu dužine $\overline{aH}$ kad bi pod cijelim polom vladala tako niska indukcija. Zato na drugoj strani od sredine pola ukupno protjecanje raste, pa pod vršKom pola dosiže vrijednost $\Theta_0 + b_pA/2$, te bi se u stroju inducirao napon u iznosu dužine $\overline{dG}$ ako bi pod cijelim polom vladala tako visoka indukcija. Na neki način, mogli bismo, dakle, prikazati ukupni tok Φ_{gl} ili inducirani napon integralom krivulje praznog hoda u granicama od točke H do točke G na apscisi podijeljenim dužinom $\overline{HG}$. Odmah zapažamo da se smanjuje inducirani napon prema onome u praznom hodu jer je smanjenje induciranog napona $e_2 = \overline{ab}$ na jednoj strani pola veći od povećanja $e_1 = \overline{cd}$ na drugoj strani pola. Približno bismo po Simpsonu mogli računati smanjenje napona:

$$\Delta E = E - \frac{E - e_2 + 4E + E + e_1}{6} = \frac{e_2 - e_1}{6}. \tag{2}$$

Izračunavanje stvarnoga induciranog napona pod teretom izvest ćemo točnije grafički prema slici 5. Gubitak magnetskog toka na jednoj polovici pola, gdje je smanjena indukcija zbog reakcije armature, dade se predočiti površinom sfernog trokuta a, b, K označenom sa S_1. Od gubitka manji je dobitak na drugoj polovici pola, gdje je povećana indukcija; taj dobitak je površina sfernog trokuta K, c, d svojom površinom S_2. Površine S_1 i S_2 iscrtane su na slici desnim sjenčenjem. Spustimo se po karakteristici od točke K do točke C koja je odabrana tako da su površine sfernih trokuta S_1' i S_2' definirane točkama a, h, C i C, g, d jednake.

Površine tih sfernih trokuta iscrtane su lijevim sjenčenjem. Dužina $\overline{CF}$ označava aritmetičku srednju vrijednost ordinate krivulja među granicama G i H na apscisi. Tako je u nekom mjerilu predočen dužinom $\overline{CF}$ i iznos ukupnog toka Φ_{gl} i iznos induciranog napona E. Gubitak je napona prema tome jednak dužini $\overline{KB}$ Taj isti



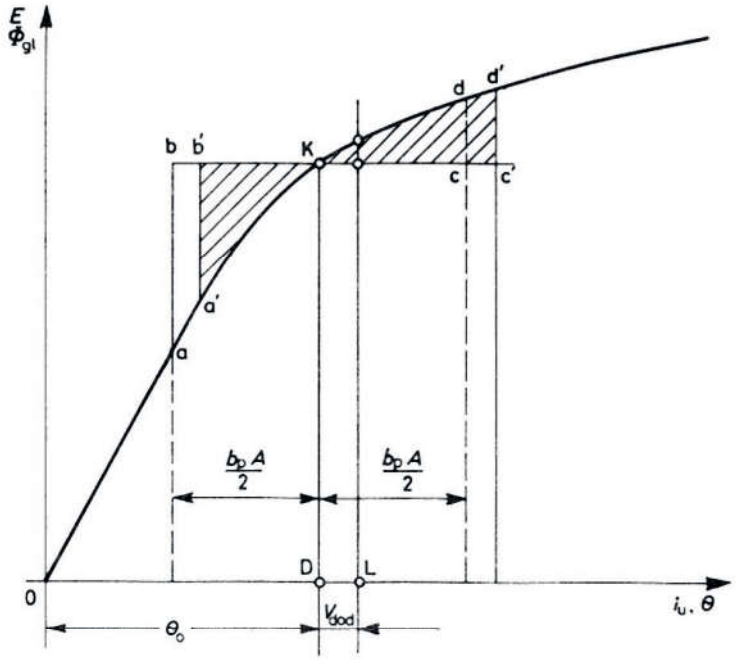
Sl. 5. Grafičko određivanje utjecaja reakcije armature na inducirani napon istosmjernog stroja pomoću karakteristika praznog hoda; određivanje negativnog (fiktivnog) magnetskog napona V_{zas} – sve crtano za jedan pol

gubitak napona izazvalo bi pri radu u praznom hodu smanjenje uzbudnog protjecanja u iznosu koji na slici odgovara dužini $\overline{FD}$, tj. kao da smo uzbudi Θ_0 dodali negativni magnetski napon V_{zas}. Zato, kad govorimo o (negativnom) magnetskom naponu V_{zas} ili o protuamperzavojima reakcije armature ili poprečnog polja, ne govorimo o nekome stvarnom protjecanju nastalome na glavnim polovima, nego o efektu uzrokovanome zasićenjem (zato i indeks zas), kojeg su posljedice takve kao da se pojavila neka protuuzbuda.

Da pod teretom ostane inducirani napon jednak onome u praznom hodu, potrebno je povećati uzbudnu struju, a time i uzbudno protjecanje. To potrebno povećanje približno je jednako već izračunatome fiktivnom smanjenju uzbude V_{zas}. Točno možemo potrebno dodatno povećanje uzbude dobiti opet grafičkim putem, kako je prikazano na slici 6, gdje su iste veličine jednako označene kao na slici 5. Sad cijelo područje protjecanja širine Ab_p pomičemo udesno po apscisi sve dok sferni trokuti a′, b′, K i c′, d′, K ne postanu površinom jednaki. Potrebno dodatno uzbudno protjecanje jednako je tad dužini $\overline{DL}$ sa slike 6.

Može se dogoditi da stvarno potrebno povećanje uzbudnog protjecanja V_{dod}, ako želimo pod teretom sačuvati inducirani napon, bude veće od fiktivnog gubitka protjecanja V_{zas}, a može biti i manje. To ovisi o ukupnim prilikama zasićenosti

stroja, i nije osobito važno jer je pogreška neznatna zamijenimo li u računima jedno s drugim. Važan je, zapravo, samo razlog, jer nam širi uvid u zbivanja u istosmjernom stroju. Bitno za promjenu magnetskog toka, induciranog napona i potrebnog protjecanja pod teretom nije u činjenici da je željezo stroja uopće zasićeno, nego u tome je li promjena zasićenja *jednolika*. To je jasno s naših upravo razmotrenih slika 5. i 6. Neće biti nikakve promjene magnetskog toka i



Sl. 6. Grafičko određivanje potrebnoga dodatnog protjecanja (magnetskog napona) V_{dod} za održavanje konstantne vrijednosti induciranog napona pri opterećenom stroju – crtano za jedan pol

induciranog napona ako na slikama područje $b_p A$ pada pod dio krivulje praznog hoda koji je pravac. To se događa u okolnostima u kojima je radna točka u posve nezasićenom dijelu karakteristike praznog hoda, ili se nalazi u vrlo jako, potpuno zasićenom dijelu, gdje je karakteristika opet približno pravac. Najveće su promjene i gubici na induciranom naponu kad se radna točka nalazi upravo na *koljenu* krivulje praznog hoda, a smanjuju se kad se radna točka pomiče od tog koljena, bilo u zasićeno, bilo u nezasićeno područje. Nepovoljna je činjenica što je većini strojeva radna točka obično u blizini koljena, nešto malo u zasićenom području. U nezasićenom području željezo nije dovoljno iskorišćeno, pa je stroj velik i skup, a u jako zasićenom stroju rastu dimenzije željeza i bakra polova zbog prevelike uzbude, potrebne za to zasićenje. Zaključak je: gubitak napona uslijed reakcije armature redovita je pojava ispravno dimenzioniranih istosmjernih strojeva.

Još nas zanima koliko je djelovanje reakcije armature pri različitim opterećenjima. Ako je protudjelovanje pri nazivnoj struji armature zanemarivo (na linearnom dijelu krivulje), onda ga, dakako, nema ni pri manjim opterećenjima, ali se može pojaviti prilikom preopterećenja. Ako je ono pri

nazivnoj struji vrlo jako (rad u blizini koljena krivulje), tad znatno opada pri manjim opterećenjima, a znatno raste pri preopterećenjima. Može se uzeti za računanje, bez zahtjeva na osobitu točnost, da je:

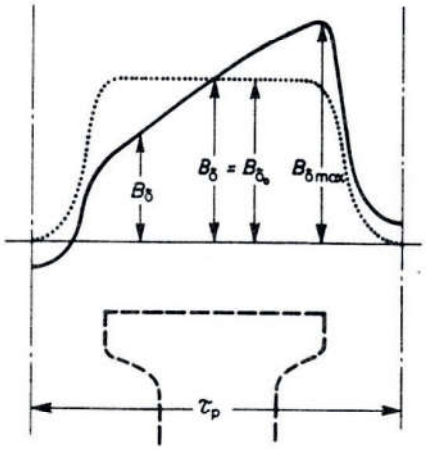
$$V_{zas} \doteq V_{zasn} \left(\frac{I_a}{I_{an}}\right)^2, \tag{3}$$

$$V_{dod} \doteq V_{dodn} \left(\frac{I_a}{I_{an}}\right)^2, \tag{4}$$

pri čemu indeks n u raznim veličinama označava nazivno stanje. Relacije (3) i (4) za približno računanje vrijede samo kad su struje armature manje od približno 125% nazivne.

4.3.2. Povećanje gubitaka u željezu zbog reakcije armature

Obrazložili smo već da je armatura istosmjernog stroja zapravo njegov izmjenični dio i tek djelovanjem sistema kolektor-četkice dobivamo na stezaljkama statora istosmjerne veličine. U vodičima armature teku izmjenične struje, a željezom armature prostire se izmjenično magnetsko polje. Zbog toga se gubici u željezu armature dadu promatrati na sasvim jednak način kao kod izmjeničnih strojeva. Gubici su, dakle, proporcionalni nekoj a-toj potenciji frekvencije rotora $(pn/60)^a$ i kvadratu maksimalne indukcije u željezu $B^2_{Fe max}$. U praznom hodu pod polnom papučom imamo konstantnu indukciju zračnog raspora $B_{\delta 0}$. U zubima armature, gdje se magnetski tok zgusne zbog bolje magnetske vodljivosti željeza, opet je indukcija konstantna na istoj visini zubi. Djelovanjem poprečnog polja pojavljuje se iskrivljenje magnetskog polja pod polom, kako je već prikazano na slici 4. Tad u zračnom rasporu indukcija B_δ nije više konstantna, već njezin iznos ovisi o položaju pod polom; na mjestu najvećeg zasićenja poprima ona najveći iznos, označen na slici 7. s $B_{\delta max}$. Takav raspored



Sl. 7. Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu opterećenoga istosmjernog stroja

polja preslikava se i na zube armature, pa je porast maksimalne indukcije u zubima približno proporcionalan povećanju iznosa maksimalne indukcije u zraku.

Prema tome, gubici u željezu zubi porastu približno, zbog reakcije armature, u skladu s jednadžbom (3):

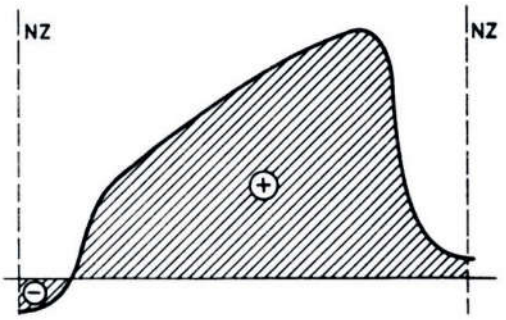
$$P_{\mathrm{Fez}} = P_{\mathrm{Fezo}} \left(\frac{B_{\mathrm{zmax}}}{B_{\mathrm{zo}}} \right)^2 \doteq P_{\mathrm{Fezo}} \left(\frac{B_{\delta \mathrm{max}}}{B_{\delta \mathrm{o}}} \right)^2, \tag{5}$$

pri čemu su: P_{Fez} gubici u željezu zubi općenito, a P_{Fezo} u praznom hodu. B_{zo} je maksimalna vrijednost indukcije u zubu u praznom hodu, a B_{zmax} pri opterećenom stroju.

Na gubitke u željezu jarma armature nema poprečno polje nekog posebnog utjecaja, izuzevši onaj zbog promjene ukupnog toka, a taj je neznatan. Povećani gubici u željezu armature imaju još jednu neugodnu stranu. Oni, na žalost, nastaju na najnepovoljnijem mjestu u željezu stroja, tj. tik uz izolaciju armaturnog namota. Budući da time, s jedne strane, povisuju temperaturu neposredne okoline namota, a, s druge strane, povećavaju ukupnu toplinu koju valja odvesti do rashladnih površina stroja, to je njihov utjecaj na smanjenje snage stroja znatno veći nego što je njihov adekvatni dio u ukupnim gubicima stroja.

4.3.3. Pomak neutralne zone zbog reakcije armature

Nastane li pomak električne neutralne zone zbog opisanog djelovanja poprečnog polja, a četkice ostaju u svome starom položaju koji odgovara neutralnoj zoni u praznom hodu, nastupa dvostruko negativni učinak na rad stroja. Prvo, dolazi do daljnjeg gubitka induciranog napona E. Taj je, kako znamo prema jednadžbi (4.1 – 1), proporcionalan prostornom integralu indukcije preko polnog koraka, s tim što su granice polnog koraka položaji četkica koje dovode napon do kolektora. Ukupni tako definirani magnetski tok mjerodavan za iznos induciranog napona bi bio na slici 8. jednak razlici površina označenih s »+« i »–«. Razlog je tome što se pojedini vektori napona svitaka u grani koju ograničavaju četkice međusobno poništavaju. Na sreću, svici kojima pripadaju ti vektori leže u međupolnom prostoru, gdje je indukcija neznatna, pa je tako nastali gubitak induciranog napona obično posve neznatan te se ne uzima u račun. Na slici 8. taj



Sl. 8. Uz tumačenje o smanjenju induciranog napona zbog pomaka neutralne zone nastaloga djelovanjem reakcije armature

je detalj nerealno povećan s namjerom boljeg uočavanja. Drugo negativno djelovanje proizlazi iz naponskog stanja svitka koji komutira, tj. u kojem se prilikom prolaska ispod četkice treba da promijeni smjer struje. Kad četkice leže u električnoj neutralnoj zoni, na svitak koji komutira ne djeluje glavno magnetsko

polje jer mu je iznos jednak nuli, pa ne može u svitku inducirati nikakav napon. Uslijed pomaka neutralne zone komutira svitak u takvom položaju da ga još zahvaća glavno magnetsko polje, koje u njemu inducira neki napon. Zbog toga nastupa promjena struje u nepovoljnome naponskom stanju svitka. Posljedica je: loša komutacija – iskrenje. Detaljnije će o toj problematici biti riječ u poglavlju o komutaciji.

4.3.4. Porast napona među lamelama zbog reakcije armature

Lamele kolektora uzbuđenoga istosmjernog stroja kojem rotor rotira točke su početaka i krajeva vektora napona svitaka. Među njima vlada stanovita razlika potencijala, pa su međusobno izolirane. Taj napon među lamelama ne smije biti po volji velik; njega ograničavaju razni razlozi.

Općenito se srednja vrijednost napona među susjednim lamelama (srednja vrijednost napona jednog svitka) izračunava kao:

$$e_{\mathrm{ksr}} = \frac{2pU}{k}, \tag{6}$$

pri čemu je U napon stroja, p broj pari polova, a k je broj kolektorskih lamela. Tu se kao još dopuštena (najveća) vrijednost e_{ksr} uzima od 16 do 18 V [L. 14, 34, 54, 8]. Zanimljivo je pitanje kako se dolazi do te granične vrijednosti. U praznom hodu stroja stvarni će se napon među susjednim lamelama mijenjati ovisno o položaju promatranog napona svitka prema magnetskom polju; bit će, dakle (zbog $e_{\mathrm{k}} = w_{\mathrm{s}} Blv$), proporcionalan indukciji. Svicima kojih se strane nalaze blizu neutralne zone bit će on malen u skladu s raspodjelom indukcije pod polom (vidi npr. sl. 4.1 – 2), a svicima kojima su strane pod polovima bit će veći i može se dobro ocijeniti sa:

$$e_{\mathrm{k}} = \frac{e_{\mathrm{ksr}}}{\alpha} = \frac{2pU}{k\alpha}, \tag{7}$$

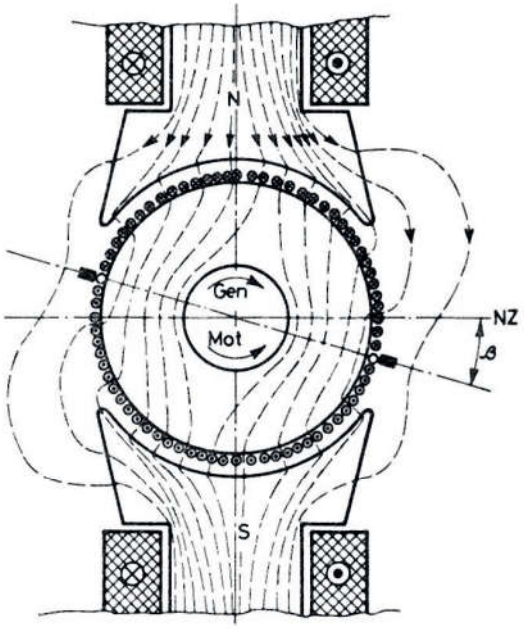
gdje je α faktor prekrivanja pola. Budući da je vrijednost faktora prekrivanja α za stroj s pomoćnim polovima (prema podacima iz odjeljka 4.1) od 0,6 do 0,72 to bi se vrijednost dopuštenog napona među lamelama kretala od 22 do 30 V. Kako je vrijednost istosmjernog napona pri kojoj se još održava električni luk negdje oko 24 do 26 V, što ovisi o više fizikalnih osobina atmosfere u kojoj se luk stvori, postaje jasno odakle potječu (približne) brojke dopuštenih vrijednosti napona među lamelama. Dakle, stroju u praznom hodu napon je među svim lamelama pod polovima jednak jer je konstantna indukcija pod polom B_δ, kojoj je taj napon proporcionalan. Kad nastupi deformacija magnetskog polja zbog reakcije armature, promijenit će se napon među lamelama u skladu s promjenom indukcije u točkama pod polom kojima prolaze pripadni svici (vidi sl. 7). Među nekim lamelama vlada napon manji od onoga u praznom hodu, a među nekima veći. Najveći je među onim lamelama svici kojih upravo prolaze kroz položaj najveće indukcije $B_{\delta\max}$, a taj je mjerodavan za fizikalna zbivanja. Porast o kojem je riječ vrlo je neugodan. On zna na nečistom kolektoru izazvati i iskrenje, a, što je još gore, podržava luk kad se pojavi iskrenje uslijed teške komutacije čak i uz

potpuno čist kolektor. Zahvati li takav luk cijeli kolektor, zovemo ga vatrom na kolektoru (kružna vatra na kolektoru!), a ona izaziva i najteža razaranja u pogonu. Upravo tu kružnu vatru podržava i širi već obrazloženi porast napona na lamelama uzrokovan reakcijom armature. To je za velike i jako iskorišćene strojeve najneugodnija posljedica reakcije armature.

4.3.5. Pomak četkica

Kad se saberu sve negativnosti reakcije armature, postaje razumljivo da je njezino suzbijanje ili kontroliranje jedna od glavnih zadaća graditelja stroja. Mjera za suzbijanje ima više. Zajedničko im je, prije svega, da sve poskupljuju stroj i kvare mu neka druga svojstva, a osim toga ni jedna mjera nije univerzalna, tj. ne suzbija sve posljedice ili, čak, dok jedne suzbija, druge pojačava. Tek kombinacija više mjera i zahvata može u stroju u potpunosti odstraniti sve ono loše što reakcija armature sa sobom donosi. Samo je po sebi razumljivo da to suzbijanje reakcije armature ima svoju ekonomičnost. Za manje strojeve, gdje su i prilike za komutaciju povoljnije, ne isplati se ići na provedbu svih mogućih mjera jer je to skupo i ne donosi prednosti. Naprotiv, za velike strojeve, gdje raste iskorišćenje materijala stroja, gdje su prirodni uvjeti komutacije sve teži s porastom veličine stroja, isplati se sve poduzeti jer pogon stroja postaje zbog reakcije armature nemoguć ili ne zadovoljava uvjetima i zahtjevima koji se pred njega postavljaju. Očito je da su posljedice reakcije armature i među bitnim činiteljima ograničenja mogućnosti gradnje strojeva vrlo velikih snaga, na što ćemo se još detaljno vratiti u 9. poglavlju. Pređimo sada na same postupke za suzbijanje reakcije armature.

Prva je od mjera suzbijanja posljedica reakcije armature pomak četkica u stvarnu neutralnu zonu. Pomaknemo li četkice stroju opterećenome konstantnom strujom armature za kut β (vidi sl. 9), suzbit ćemo posljedice reakcije armature



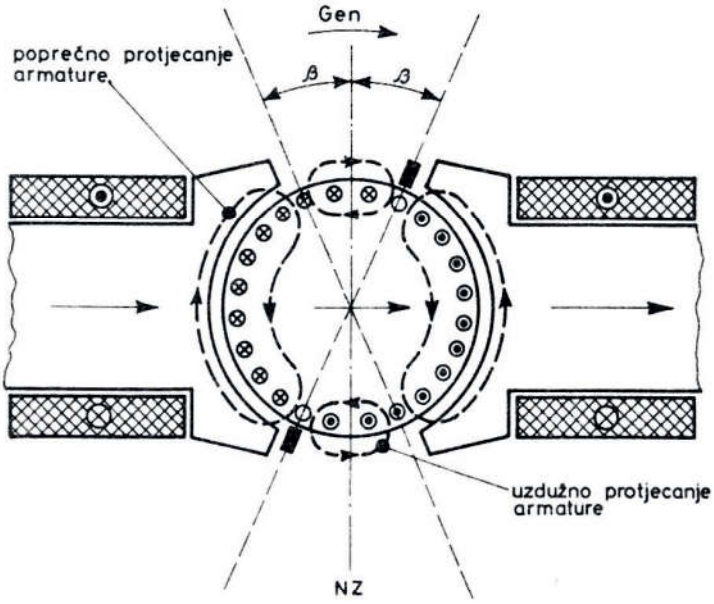
Sl. 9. Pomak četkica iz geometrijske u stvarnu neutralnu zonu istosmjernoga opterećenog stroja

koje bi nastale zbog pomaka neutralne zone. Ali taj zahvat uopće ne djeluje na ostale negativnosti reakcije armature, štoviše on neke dapače i povećava, a osim toga uzrokuje i neke druge nove nedostatke u radu stroja. Pokušajmo ih razmotriti redom.

a) Pomak četkica u novu neutralnu zonu vrijedi samo za jednu određenu struju armature. Kut β mijenja se s opterećenjem jer se mijenja strujni oblog. Tako je poboljšanje zbog pomaka četkica jako ograničeno.

b) Pomak četkica za kut β razuman je samo za strojeve koji nemaju pomoćne polove. O pomoćnim polovima, koji se normalno postavljaju u neutralnu zonu, bit će više rečeno. Danas se samo najmanji strojevi grade bez pomoćnih polova, pa odavde još jedno ograničenje.

c) Magnetsko polje nastalo zbog struje u armaturi kad su četkice pomaknute za kut β, ima osim poprečne još i uzdužnu komponentu, što se lijepo vidi na slici 10. Uzdužna komponenta ili, kako je češće nazivamo, uzdužno magnetsko polje



Sl. 10. Uzdužno i poprečno protjecanje armature pri pomaku četkica iz geometrijske neutralne zone

reakcije armature ima smjer suprotan onome glavnoga magnetskog polja i izravno ga ruši. Time se znatno povećava gubitak induciranog napona zbog reakcije armature. Amperzavoje (magnetski napon) uzdužnog protjecanja reakcije armature po paru polova lako računamo iz strujnog obloga:

$$V_č = 2k_ž s \frac{D_a}{D_k} A \quad [A], \tag{8}$$

pri čemu je A strujni oblog pri struji I_a, $k_ž$ broj lamela koje obuhvaća kut β, s širina jedne lamele, a D_a i D_k su promjeri armature i kolektora.

Relaciji (8) ne treba tumačenje jer je sama po sebi jasna. Želimo li pronaći rezultantno protjecanje koje nastaje u stroju, uz upotrebu jednadžbe (3) vrijedi:

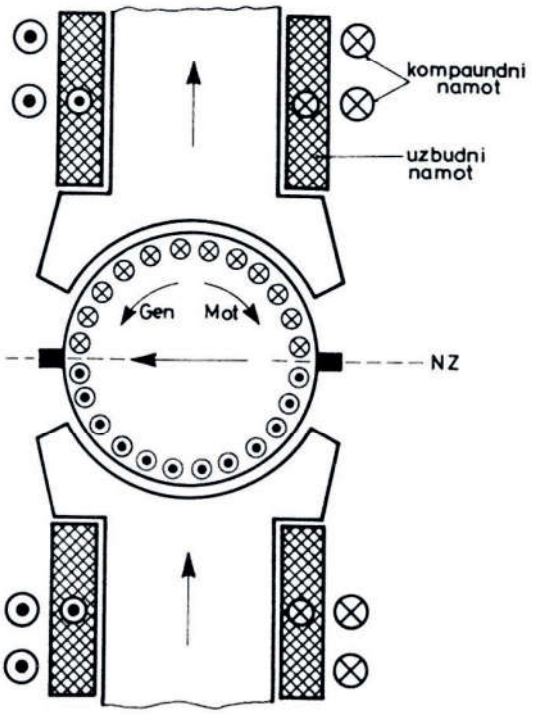
$$\Theta_r = \Theta_0 - V_{zas} \left(\frac{I_a}{I_{an}}\right)^2 \mp V_č \frac{I_a}{I_{an}}. \tag{9}$$

Ta će jednadžba dobro poslužiti i za okolnosti gdje iz bilo kojih razloga pomičemo četkice, pri čemu predznak plus u trećem pribrojniku desne strane znači pomak četkica u smislu suprotnome od smjera vrtnje za generator, a za motor obrnuto.

Pomakom četkica u novu neutralnu zonu, kao mjerom za suzbijanje reakcije armature, možemo se, prema dosad izloženome, služiti samo za male strojeve bez pomoćnih polova, što je gotovo bez praktičkog značenja.

4.3.6. Kompaundni namot

Dodamo li na glavne polove poseban namot od malo zavoja velikog presjeka i spojimo ga između četkica i stezaljki stroja tako da njime teče struja armature, ugradili smo stroju kompaundni namot. Pri tome bi struja armature prolazeći kompaundnim namotom trebalo da stvara magnetsko polje istoga smjera onome glavnoga uzbudnog namota. Princip djelovanja prikazuje slika 11. Budući da



Sl. 11. Skica smještaja i princip djelovanja kompaundnog namota istosmjernog stroja

kompaundni namot djeluje u istom smislu kao i glavni uzbudni namot, on može po iznosu nadoknaditi gubitak dijela induciranog napona E izazvan reakcijom armature. Valja ga samo ispravno dimenzionirati. Prednost mu je, dalje, u tome

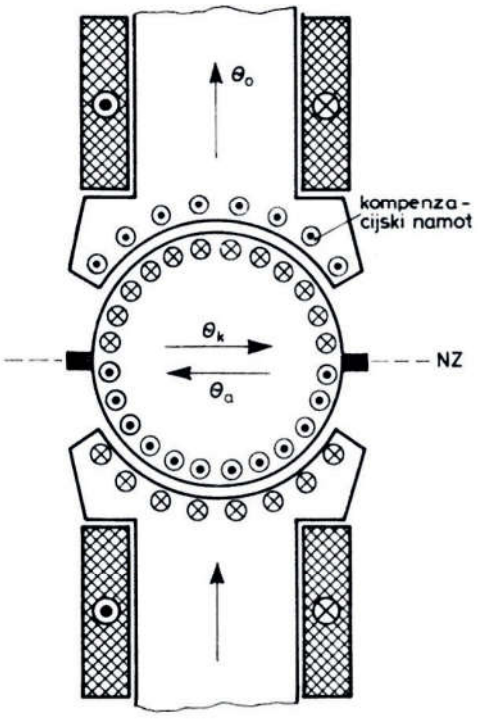
što je jeftin jer zahtijeva neznatno povećanje stroja zbog potrebnog prostora i relativno malo bakra, a lako ga je izvesti. Djeluje, u svakom slučaju, stabilizirajuće na motor jer jača glavni magnetski tok Φ_{gl}.

Najveći je nedostatak kompaundnog namota njegova jednostranost u pogledu poništavanja posljedica reakcije armature. On vrlo malo djeluje na problematiku gubitaka u željezu, na položaj neutralne zone i napon među lamelama. Dapače, on zapravo neznatno povećava gubitke u željezu i povisuje najveću vrijednost napona među lamelama, jer jačajući glavni magnetski tok povećava i maksimalnu vrijednost indukcije pod polom! Povećava, dalje, neznatno ukupne gubitke stroja i zagrijavanje uzbudnog namota, zbog toga što je ugrađen pored njega. Na generator on djeluje destabilizirajuće jer, kad je nešto prejak, povisuje s porastom tereta napon generatoru.

Uzevši ukupno, bilanca djelovanja kompaundnog namota je pozitivna, te se često ugrađuje manjim, srednjim pa i velikim strojevima, pogotovo kad mu se osim opisanog djelovanja katkad dodjeljuju još i neki drugi zadaci u radu istosmjernog stroja.

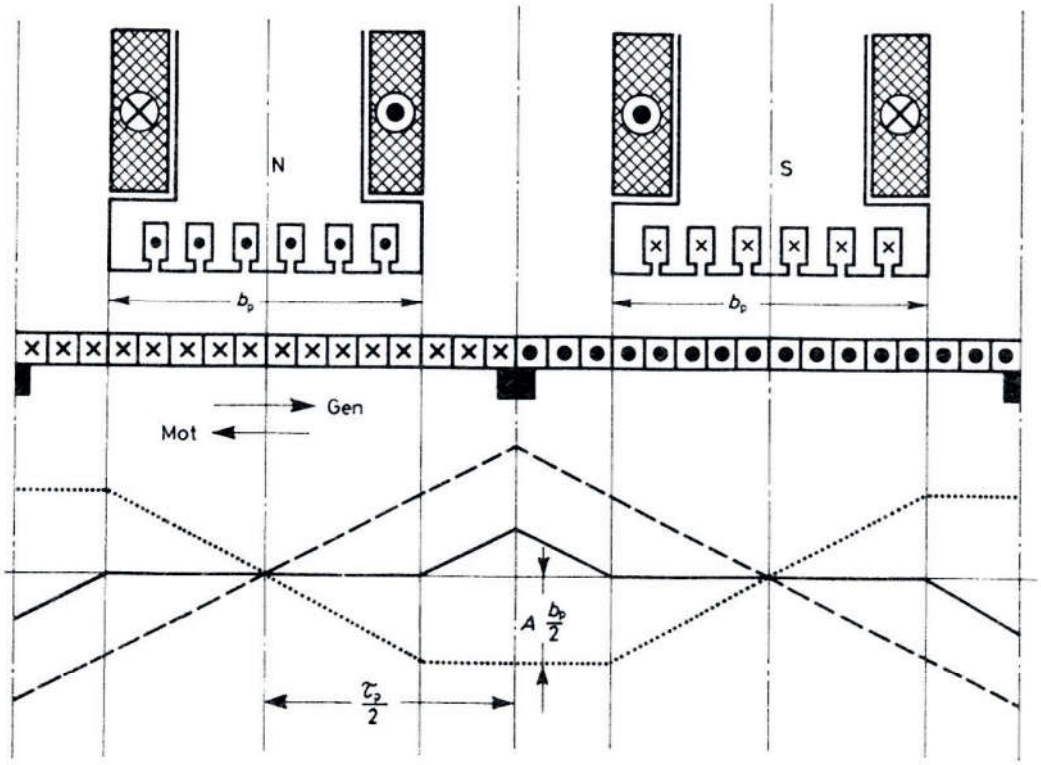
4.3.7. Kompenzacijski namot

Uvođenjem kompenzacijskog namota u stroj pokušava se uvesti takav namot kojega bi protjecanje po mogućnosti potpuno poništilo poprečno magnetsko polje armature. U tu svrhu izrađuju se u polnim papučama utori i u njih se smješta kompenzacijski namot. On se također spaja između četkice i stezaljki stroja, tako da njime teče struja armature, jednako kao i u kompaundnom namotu (vidi načelnu skicu na sl. 12). Broj utora i vodiča u utoru kompenzacijskog namota



Sl. 12. Skica smještaja i djelovanja kompenzacijskog namota

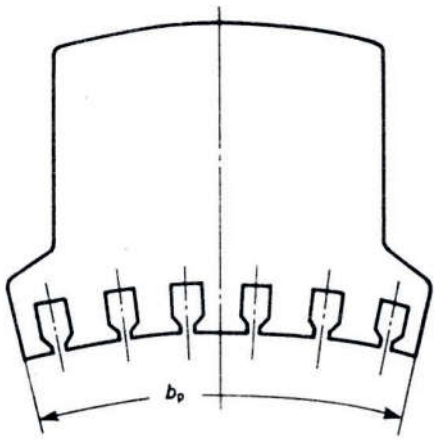
određuje se tako da njegov strujni oblog bude jednak strujnom oblogu armature, ali sa strujama suprotna smjera. Rezultat se najbolje vidi na slici 13, gdje su, uz prikazani raspored namota, crtana samo ta dva protjecanja. Crtkana je krivulja protjecanje armature, točkasto izvučena krivulja označava protjecanja kompenza-



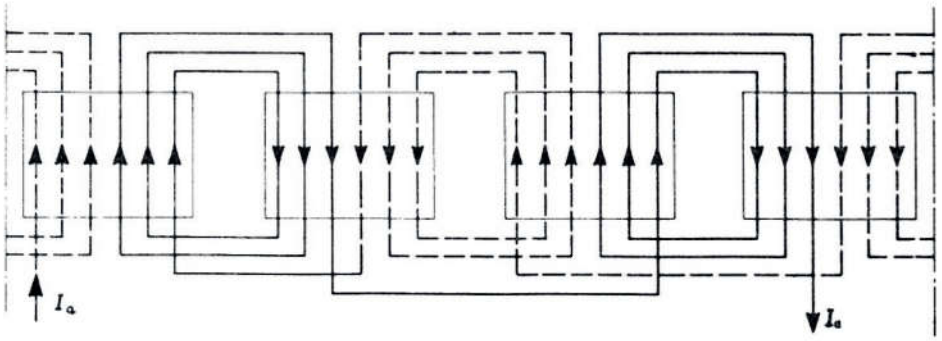
Sl. 13. Raspodjela protjecanja namota armature i kompenzacijskog namota

cijskog namota, a krivulja izvučena punom linijom njihovo je zajedničko protjecanje, koje treba pribrojiti protjecanju glavnih polova. Vidimo da je u zračnom rasporu pod polom nestalo bilo kakva utjecaja reakcije armature na protjecanje glavnih polova. To znači da se kompenzacijskim namotom dade poništiti većina posljedica reakcije armature. Budući da je pod polovima uklonjeno iskrivljenje magnetskog polja, to nestaje i porast gubitaka u željezu i povišenje napona među lamelama. Dalje se praktički potpuno uklanja i gubitak napona zbog gubitka magnetskog toka uslijed pomaka neutralne zone. Poništenje djelovanja reakcije armature i njezinih posljedica bilo bi i teorijski potpuno kad ne bi u međupolnom prostoru, gdje nema kompenzacijskog namota, ostalo smanjeno djelovanje reakcije armature, što se vidi na slici 13. Ono je, međutim, vrlo slabo zbog vrlo visokoga magnetskog otpora u međupolnom prostoru magnetskog kruga, pa i zbog opadanja ukupnoga uzbudnog djelovanja vodiča armature, koje je smanjeno baš djelovanjem kompenzacijskog namota.

Glavni je nedostatak kompenzacijskog namota njegova visoka cijena. Na slici 14. prikazan je presjek glavnog pola s utorima za kompenzacijski namot, a na slici 15 razvijena je shema kompenzacijskog namota koja odgovara polu sa slike 14.



Sl. 14. Presjek (lim) glavnog pola s utorima za kompenzacijski namot



Sl. 15. Shema ulaganja kompenzacijskog namota; odgovara skici pola sa slike 14.

Odmah su jasni razlozi visoke cijene. Potrebno je mnogo prostora, mnogo materijala, skupi alati za utore u polu i mnogo posla za izradu. Zato se kompenzacijski namot izvodi samo tamo gdje nas težina pogona i posljedice reakcije armature prisiljavaju na to, a to je pri gotovo svim velikim strojevima i onima s čestim preopterećenjima u obliku udaraca struje.

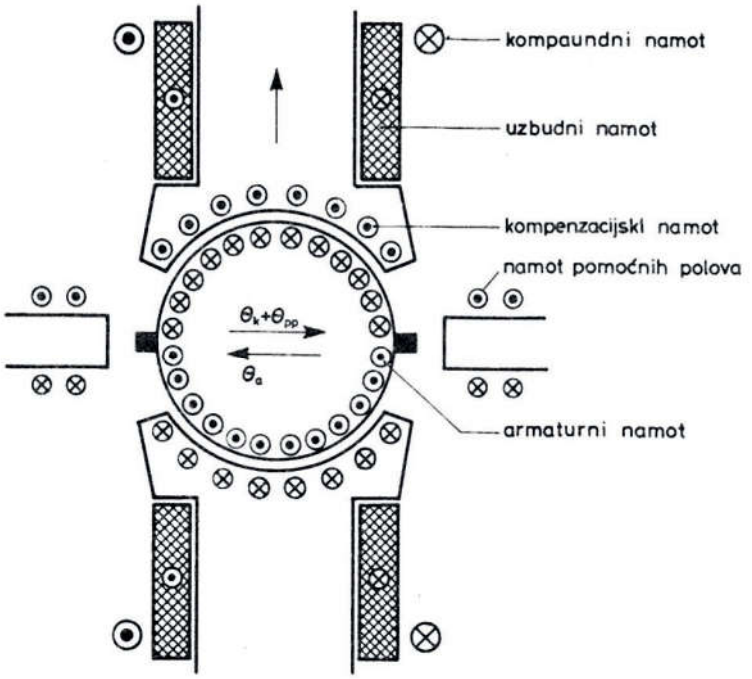
4.3.8. Pomoćni polovi

Pomoćnim polovima nije glavni zadatak da rješavaju probleme reakcije armature, nego probleme komutacije. Ali oni ujedno rješavaju i posljedice reakcije armature u međupolnom prostoru, pa ih uvodimo već ovdje.

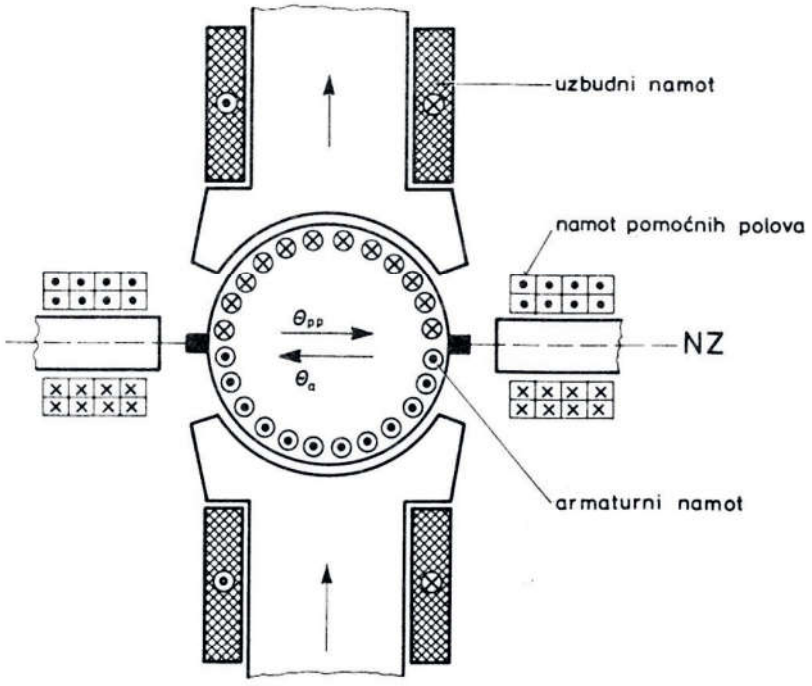
Pomoćni su polovi relativno uski polovi smješteni u prostor između glavnih polova, i to točno u neutralnu zonu. Oni nose namot od relativno malo zavoja većeg presjeka, kojim teče struja armature. S armaturom su spojeni u seriju na jednak način kao kompenzacijski i kompaundni namot. Slika 16. sadrži shematski raspored svih dosad uvedenih namota i polova, tako da položaj i djelovanje pomoćnih polova postanu jasniji. Namot pomoćnog pola djeluje na rad stroja u istom smislu kao kompenzacijski namot, ali mu je djelovanje praktički ograničeno samo na prostor među glavnim polovima.

Potpuno poništavanje reakcije armature ili njezinih posljedica očito zahtijeva mnogo troškova, pa se gradnja stroja u verziji na slici 16. poduzima samo kad je pogon stroja bez toga nemoguć, dakle za izuzetno teško opterećene strojeve

najvećih snaga. Pri tome je posebno skupa izvedba s kompenzacijskim namotom, i zato je razumljivo da se najčešće stroj gradi bez njega. Najčešća je, dakle, izvedba stroja (za snage veće od 1 kW) koji uz osnovni uzbudni i armaturni namot ima još samo namot pomoćnih polova. Takav stroj i njegove namote nalazimo na slici 17.

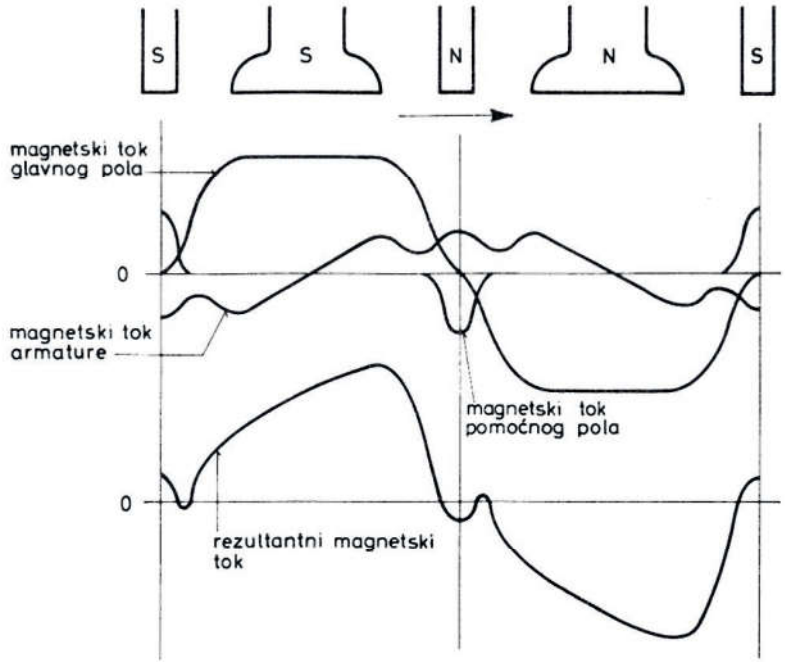


Sl. 16. Načelni raspored i djelovanje svih namota istosmjernog stroja, za primjer stroja koji je građen sa svim namotima



Sl. 17. Načelni raspored i djelovanje namota najčešće varijante istosmjernog stroja, tj. stroja s namotima uzbude, pomoćnih polova i armature

Ne smijemo smetnuti s uma da je djelovanje pomoćnog pola u fizikalnom smislu dvojako. Samom pojavom željeza u prostoru među glavnim polovima povećava se magnetska vodljivost tog dijela magnetskog kruga, pa se mijenja i oblik magnetskog polja u tom prostoru bez obzira na to odakle ta polja potječu. Zbog toga bi se u tom dijelu povećalo i magnetsko polje nastalo zbog reakcije armature kad ne bi i protjecanje samih pomoćnih polova djelovalo u tom prostoru, ali u suprotnom pravcu, i sasvim poništilo djelovanje poprečnog protjecanja armature. Na slici 18. nacrtana su spomenuta fizikalna zbivanja za stroj koji uz



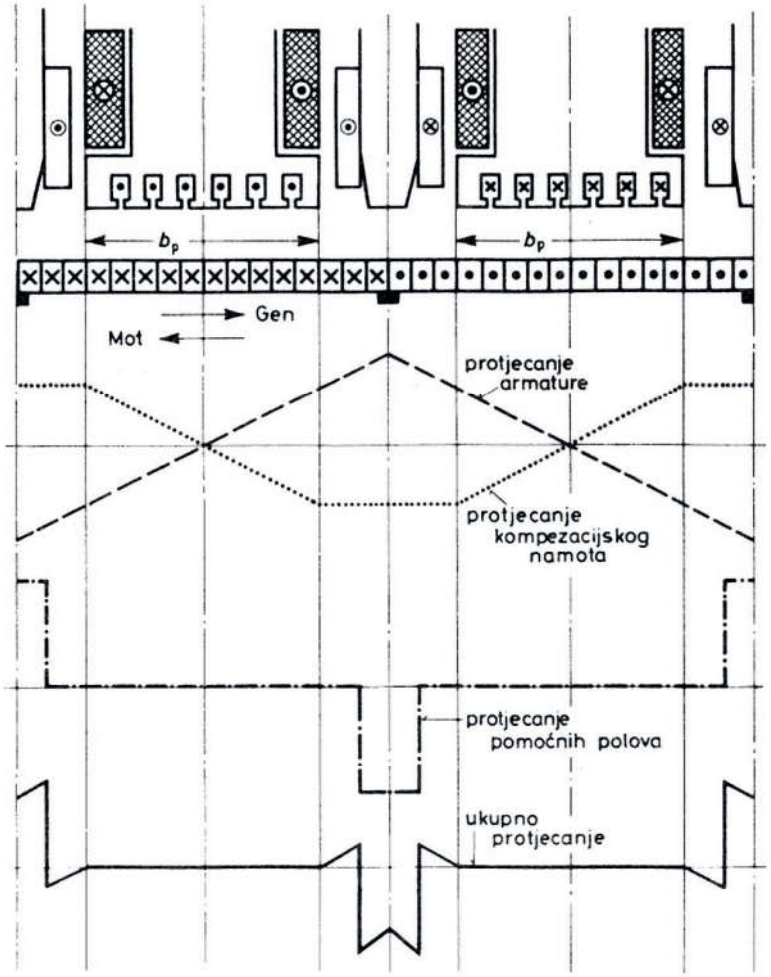
Sl. 18. Raspodjela magnetskog polja (toka) istosmjernog stroja s glavnim i pomoćnim polovima (prema sl. 17)

namote armature i glavnih polova ima još i namote pomoćnih polova, dakle za stroj sa slike 17. Za nas je važan zaključak da je jedna od funkcija pomoćnog pola poništavanje djelovanja reakcije armature u prostoru među glavnim polovima.

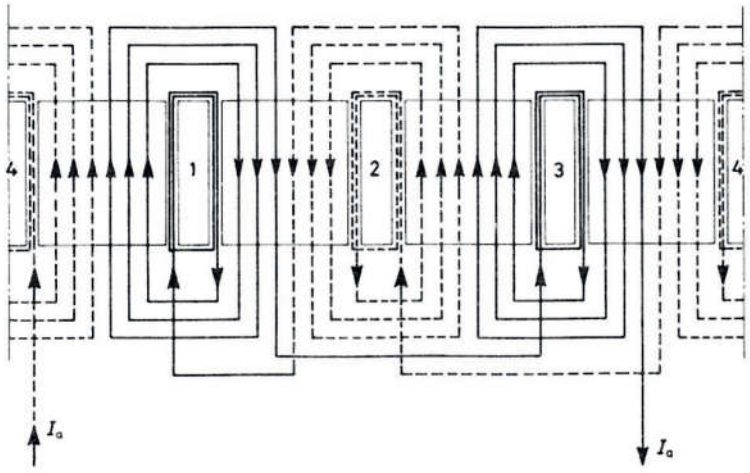
Sad se već jasno nazire i potpuno rješavanje problema koje nameće reakcija armature za stroj kojem je to prijeko potrebno. To je stroj s pomoćnim polovima i kompenzacijskim namotom. Na slici 19. prikazano je njihovo zajedničko djelovanje, a zbrojena su i ukupna protjecanja stroja. Zapaža se da je utjecaj reakcije armature potpuno nestao. Dapače, u neutralnoj zoni prevladava protjecanje u smislu suprotnome od onoga koje bi izazvala reakcija armature, što se za okolinu neutralne zone vidi i na slici 18. Taj višak djelovanja pomoćnih polova potreban je iz komutacijskih razloga, a bit će obrazložen u poglavlju o komutaciji.

Kompenzacijski namot i namot pomoćnih polova protjecani su istom armaturnom strujom, pa se u gradnji oba izvode kao jedan namot. Shemu sadrži

slika 20. To ima i dublje razloge jer oni stvaraju jedno zajedničko protjecanje, poprečno, ali smisla suprotnoga armaturnome. Kako armaturno protjecanje treba poništiti u punom iznosu i čak nadvladati (zašto, o tome poslije), to suprotno



Sl. 19. Raspodjela protjecanja uzbudnog i kompenzacijskog namota i namota pomoćnih polova. Ukupno rezultantno protjecanje prikazuje najdonja skica. Zanemareni su rubni efekti koncentriranog namota pomoćnih polova.



Sl. 20. Shema povezivanja kompenzacijskog namota i namota pomoćnih polova

protjecanje mora biti jednakog iznosa i onda kad ga stvaraju samo pomoćni polovi i u slučaju kad ga zajednički uzrokuju kompenzacijski namot i namot pomoćnih polova.

Trebalo bi, na koncu, sistematizirati pregled uobičajenih kombinacija izvedbi strojeva s obzirom na razne mogućnosti suzbijanja reakcije armature.

U praksi se izvode strojevi u ovim varijantama:

a) bez pomoćnih polova i bez kompenzacijskog namota (strojevi do cca 1 kW snage);

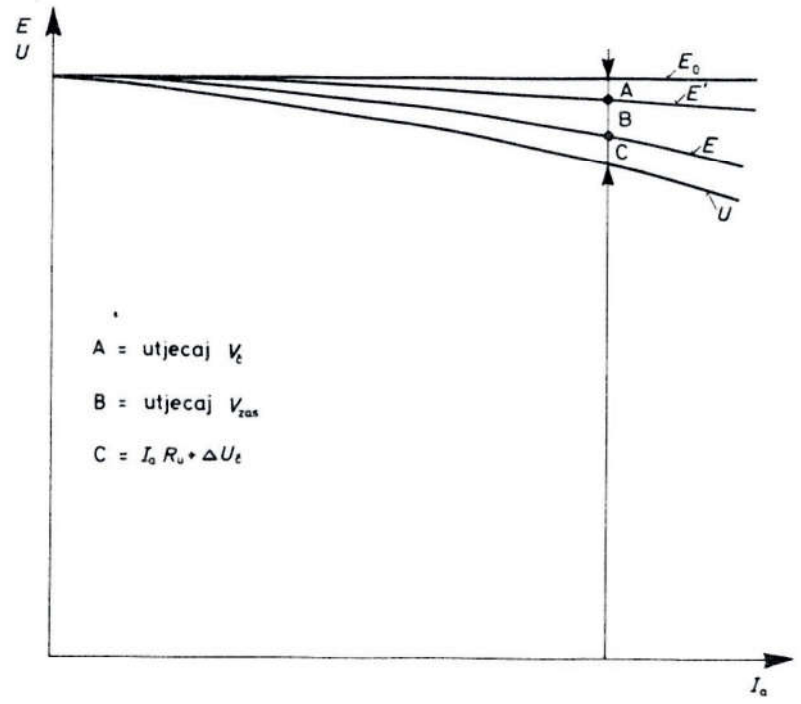
b) samo s pomoćnim polovima (većina strojeva);

c) s pomoćnim polovima i kompenzacijskim namotom (najopterećeniji strojevi).

Kompaundni namot može biti u sve tri varijante, ali obično kao stabilizacijski namot s obzirom na vanjsku karakteristiku. Nikada se ne gradi stroj samo s kompenzacijskim namotom. Kad se uspoređuju varijante b) i c) zbog potrebe poprečnog protjecanja određenog iznosa, za obje je za jednako djelovanje u međupolnom prostoru potreban jednak ukupni broj zavoja. To znači, ako treba kod stroja, recimo, pet zavoja po polu, onda će u varijanti b) namot pomoćnih polova imati pet zavoja, a kompenzacijskog namota nema, a u varijanti c) oba imaju ukupno pet zavoja po polu – recimo namot pomoćnih polova dva, a kompenzacijski namot tri zavoja. Upravo je takav primjer na slici 20.

4.3.9. Odnosi između induciranog napona i napona na stezaljkama

Mogli bismo neposredno iznijetim izlaganjima završiti odjeljak o reakciji armature kad ne bi bilo izvanredno korisno vratiti se upravo u ovom stadiju razmatranja na pitanje naponskih odnosa u stroju. Već smo u odjeljku 4.1. načeli to pitanje i dobili kao rezultat relacije (4.1–8) i (4.1–9), koje i ovdje vrijede u cijelosti, samo uz nove poglede na inducirani napon. Napon koji se inducira u praznom hodu nazovimo E_0. Napon naveden u relacijama (4.1–8) i (4.1–9) nije, dakle, E_0, tj. nije induciran samo glavnim tokom definiranim u praznom hodu, nego magnetskim tokom koji zajednički određuju uzbuda glavnih polova i opterećenje stroja uz zasićenje željeza i eventualni pomak četkica. Načinimo predodžbu plastičnijom na primjeru vanjske karakteristike generatora. Ona nam za neki konkretni generator pokazuje promjenu napona U ovisno o struji armature I_a. Neka naš razmatrani generator ima uzbudu glavnih polova koja ne ovisi o zbivanjima u stroju. Neka stroj bude zasićen i neka četkice budu pomaknute iz neutralne zone praznog hoda za neki kut β u neku novu neutralnu zonu koja odgovara jednome određenom opterećenju. Rezultat je na slici 21. E_0 je konstantno sve dok je brzina vrtnje konstantna. Pod teretom uzdužno protjecanje (četkice su pomaknute!) armature ruši tok, pa bi vrijedila krivulja E' kad ne bi djelovali i fiktivni amperzavoji zasićenja V_{zas} i još dalje rušili magnetski tok. Tako se zapravo inducira napon koji pada s teretom. I tek sad možemo uzeti u obzir stvarne padove napona u stroju da bismo na stezaljkama dobili napon U.



Sl. 21. Utjecaj uzdužnog protjecanja armature $V_č$, fiktivnog protjecanja zbog zasićenja V_{zas} i padova napona u stroju na vanjsku karakteristiku istosmjernoga generatora

Nakon uvođenja pojmova kompaundnog i kompenzacijskog namota, te namota pomoćnih polova, postao je jasniji i pojam otpora armature u proširenom smislu, tj. R_u, koji smo već prije uveli. Sad ga možemo i potpuno odrediti:

$$R_u = R_a + R_s + R_k + R_{pp} \tag{10}$$

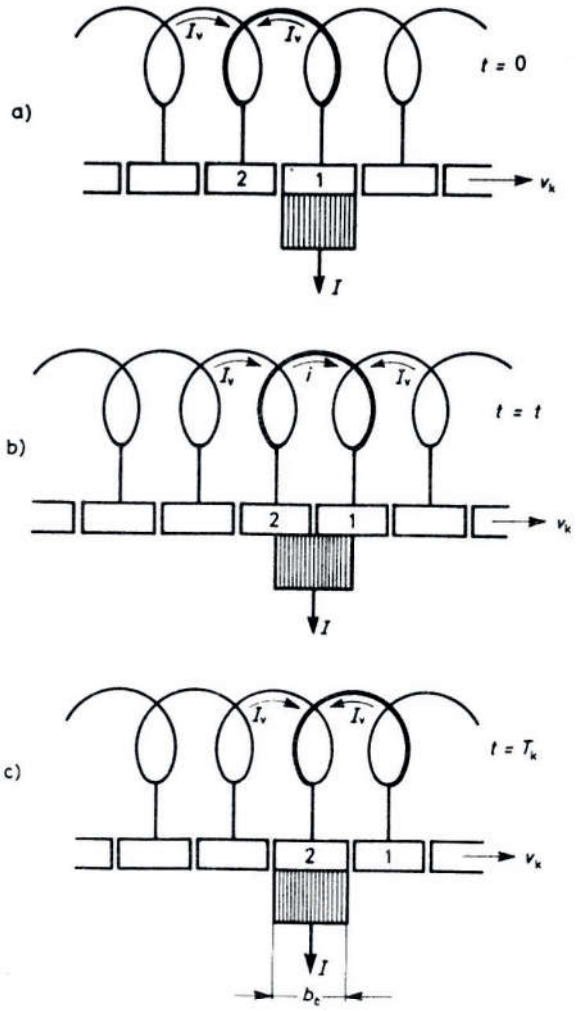
pri čemu je R_a otpor armaturnog namota, R_s otpor kompaundnog (serijskog namota), R_k otpor kompenzacijskog namota i R_{pp} otpor namota pomoćnih polova.

4.4. Osnove komutacije

Jednostavna osnovna slika procesa komutacije nam je poznata. Već u drugom poglavlju, u kojem je prikazana osnovna fizikalna slika, postalo je jasno da je u principu riječ o promjeni polariteta induciranog napona svitka kad on prolazi neutralnom zonom. U neutralnoj zoni četkica kratko spaja svitak, što ne znači neku teškoću jer je iznos indukcije na mjestu gdje se nalazi svitak jednak nuli. Kad promatrana lamela iziđe ispod četkice, prešao je svitak u drugu granu namota, pa se u njemu inducira napon smjera suprotnoga onome koji je imao dok je bio s druge strane četkice. Takva je slika pojave u praznom hodu. Pod teretom je ta pojava zamršenija. Do nailaska svitka pod četkicu teče u njemu struja one grane namota kojoj svitak u tom trenutku pripada. Nakon prolaska ispod lamele svitak pripada drugoj grani namota, pa u njemu teče struja smjera suprotnoga onome koji je imala dok je svitak bio u prethodnoj grani namota. Za vrijeme dok je svitak kratko spojen, tj. dok četkica prekriva odgovarajuće lamele, mora struja

u svitku najprije pasti na nulu, a zatim porasti u suprotnom smjeru. Na slici 1. vide se tri karakteristična trenutka takva procesa.

Iz izlaganja još nije jasno odakle izviru teškoće komutacije, koje smo već više puta spominjali. Te teškoće dolaze pri komutaciji u nepovoljnim uvjetima, a očituju se u iskrenju pod četkicama. To iskrenje može oštetiti ili četkice ili



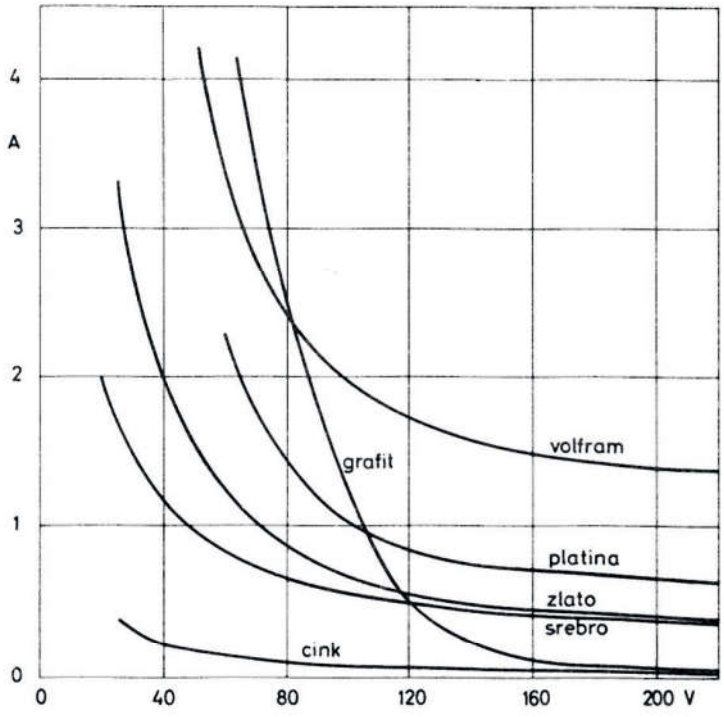
Sl. 1. Tri karakteristična trenutka u procesu komutacije

kolektor, ili će se čak pretvoriti u dugačke lukove, koji znaju sasvim onesposobiti stroj. Zbog toga se nastoji pogon istosmjernog stroja postići bez iskrenja na kolektoru, pa se tek takav pogon smatra ispravnim. Hoće li se pri komutiranju pojaviti iskrenje ili ne, ovisi o mnogim okolnostima. Gotovo su svi razlozi koji dovode kolektor do iskrenja ili mehaničkog ili električkog karaktera. Najčešći mehanički razlozi su neokruglost i istrošenost kolektora, te njegove vibracije, što uzrokuje poskakivanje četkica po kolektoru. Zatim dolaze: neuglačanost četkica, izderanost ili izjedenost površine četkica ili kolektora uzrokovane prašinom, nečistoćom ili lošom atmosferom u kojoj stroj radi. Uzrok može biti i u lošem vođenju četkica u držačima četkica, neispravnom pritisku ili smjeru pritiska na

četkice itd. Nas u prvom redu zanimaju električki uzroci koji, uz mehanički potpuno ispravan stroj, mogu dovesti do iskrenja. Poznavanje tih razloga nam omogućuje da gradimo stroj tako da nema tog nedostatka ili da znamo granice u kojima možemo iskorištavati izgrađeni stroj.

Prije svega, odredimo pobliže samu pojavu iskrenja. Male kugličaste iskrice bjelkastoga, plavkastog ili crvenkastog sjaja manje su opasne. Nešto jače žućkaste iskre brzo potamne površinu kolektora. Najopasnije su dugačke streličaste iskre, koje brzo uništavaju kolektor. Ako su one zelenkastog sjaja, koji nas upozorava na lokalno pregrijavanje bakra, uzroci su mehaničkog karaktera, a ako su pretežno žućkaste, onda su posrijedi električki uzroci.

Sve su te iskre u osnovi električni lukovi. Ako su jake i dugo traju (a tad su i dugačke!) riječ je i o usputnom izgaranju materijala. Ti lukovi ili iskre pretežno se pojavljuju na odlaznom bridu četkice, što je prirodno, jer kad lamela napušta četkicu, nastupa pojava identična otvaranju ili isklapanju električnoga strujnog kruga. Hoće li pri iskapčanju nekog kruga doći do luka, ovisi uglavnom o kvaliteti i obliku kontakta te o naponskim i strujnim prilikama u procesu iskapčanja. Prvi uvjet, kvaliteta kontakta, odredio je već davno materijal četkice. Osnova je ugljen, bilo da je amorfan, bilo da je grafit ili elektrografit, čist ili pomiješan s metalima (metalnom prašinom). Taj izbor rezultat je, prije svega, relativno dobrih svojstava ugljena u pogledu stvaranja električkog luka ovisno o struji i naponskim prilikama pri iskapčanju. Usporedba s nekim drugim vodičima na slici 2. to jasno pokazuje. Problem struje svodi se na problem njezine gustoće pod četkicama. Ima neka granica srednje gustoće struje koju četkica može podnijeti s obzirom na svoja opća svojstva, a posebno s obzirom na komutaciju. Tu se vrijednost od približno



Sl. 2. Granične struje kontakata uz koje nema iskre prilikom otvaranja kontakta

10 A po cm^2 površine četkice pokazala ispravnom, uz odstupanja koja ovise o kvaliteti četkice, o čemu će biti još riječi. Za komutaciju je važno kakva su odstupanja od te srednje vrijednosti na pojedinom mjestu pod četkicom jer prevelika gustoća struje na bilo kojem mjestu uzrokuje nagorijevanje četkice, zatim luk itd. Posebno je važno da na odlaznom bridu ne dolazi do prevelikih gustoća struje jer onda »iskapčamo« veliku struju u našem »strujnom krugu«, tj. pojavljuje se iskrenje. Ako su još i naponske prilike nepovoljne, onda se luk i lakše stvara i dulje vremena održava. Električke prilike koje dovode do loše komutacije možemo istražiti samo nešto dubljom analizom sklopa četkica-lamele-svitak u komutaciji, makar se zbog kratkoće ponegdje zadovoljili samo kvalitativnom fizikalnom slikom bez dubljeg ulaženja u proračune.

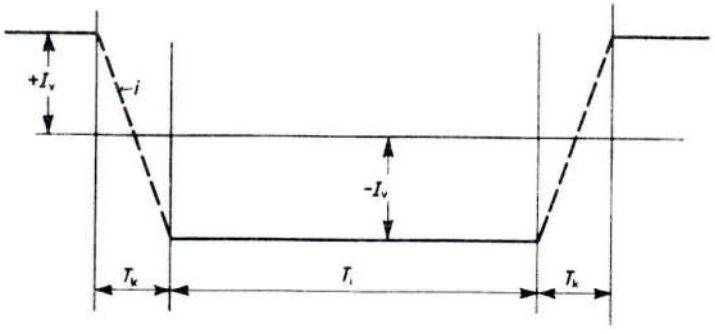
Razmatranje procesa komutacije dade se u osnovi provoditi primjenom bilo klasične, bilo energetske teorije komutacije. U slučaju klasične teorije proces se komutacije razmatra kao ukapčanje i iskapčanje induktivnoga strujnog kruga pomoću kontakta četkica-kolektor, a u slučaju energetske teorije komutacija razmatra se cjelokupni složeni elektromehanički dinamički proces.

4.4.1. Klasična teorija komutacije

Pri promatranju komutacijskih procesa klasičnom teorijom komutacije postavljamo ove pretpostavke:

a) sva kontaktna površina kolektor-četkica ravnomjerno vodi struju;
b) prelazni otpor četkica-kolektor ($R_č$) ne ovisi o gustoći struje i veličini kontaktne površine.

Razmotrimo uvodno tok struje u jednom svitku pri čemu pretpostavimo širinu četkice jednaku širini jedne lamele (vidi sl. 1), a zanemarimo debljinu međuizolacije. Od trenutka kad lamela svitka iziđe ispod izlaznog brida jedne četkice do trenutka kad ona naiđe pod ulazni brid druge četkice, teče svitkom struja vodiča I_v ili, što je isto, struja grane. Označimo to trajanje konstantne struje s T_i (sl. 3). Vrijeme koje proteče od ulaska lamele pod ulazni brid četkice do izlaska lamele ispod izlaznog brida četkice označimo s T_k. U vremenu T_k (trajanje komutacije) mijenja se struja od vrijednosti $+I_v$ na vrijednost $-I_v$. Vremenski tok promjene struje i u svitku za trajanja komutacije ne poznajemo zasad, pa je on objekt našeg razmatranja. Svrha nam je da ustanovimo gustoću struje na



Sl. 3. Vremenski tok struja u jednom svitku

pojedinom mjestu četkice – a osobito na izlaznom bridu, u raznim trenucima komutacije. Odatle ćemo zaključiti kakva se kvaliteta komutacije može očekivati. Zato je na slici 3. tok struje i za trajanja T_k označen isprekidano jer ga ne znamo unaprijed.

Vremenski tok struje svitka u komutaciji istražit ćemo pomoću Kirchhoffovih zakona ako uzmemo u obzir sve elemente koji na tu struju utječu. Među te elemente ubrajaju se inducirani naponi u tom krugu:

a) inducirani napon samoindukcije, koji nastaje zbog promjene struje svitka na vlastitom induktivitetu svitka (u općem slučaju kad istodobno komutira više svitaka ispod istog para četkica, dodaje se induciranom naponu samoindukcije još i inducirani napon zbog međuinduktivnog djelovanja svih svitaka koji komutiraju);
b) inducirani napon nastao djelovanjem poprečnog polja armature (kad stroj ima pomoćne polove taj inducirani napon nastaje od rezultantnog polja koje stvaraju protjecanje pomoćnih polova i protjecanje armature);
c) inducirani napon uzrokovan glavnim uzbudnim poljem.

U zamci kojom teče struja i (vidi sl. 4) prisutni su ovi otpori:

a) otpor svitka u komutaciji R_s;
b) otpori dovoda sa svitka na lamelu R_v, u koje uključujemo i otpor lamele;
c) prelazni otpor četkica-kolektor $R_č$.

Na slici 4. prikazan je svitak koji komutira u nekom trenutku t, nakon što ga je četkica kratko spojila. Vidi se sa slike da je trajanje komutacije T_k proporcionalno širini četkice $b_č$ jer je svitak kratko spojen od trenutka kad lamela 1 dodirne četkicu do trenutka kad četkica napusti lamelu 2. Ako su v_a i v_k obodne brzine, a D_a i D_k su promjeri armature i kolektora, vrijedi na osnovi proporcionalnosti da je:

$$T_k = \frac{b_č}{v_k} = \frac{b_č}{v_a}\frac{D_a}{D_k} = \frac{b'_č}{v_a}. \tag{1}$$

Površinu četkice označimo sa $S_č$, a dijelove površine što u promatranom trenutku dotiču lamele 1 i 2, sa S_1 i S_2. Tad vrijedi:

$$S_1 = S_č \frac{t}{T_k} \tag{2}$$

$$S_2 = S_č \frac{T_k - t}{T_k}.$$

Prelazni otpori između lamela 1 i 2 i četkice su:

$$R_1 = R_č \frac{S_č}{S_1}$$

$$R_2 = R_č \frac{S_č}{S_2}. \tag{3}$$

Ako napišemo za struje i_1 i i_2, koje s lamela 1 i 2 prelaze na četkicu, vezu sa strujom I_v, dobit ćemo, na osnovi prvoga Kirchhoffova zakona primijenjenoga na čvorišta gdje se izvodi izdvajaju prema lamelama:

$$\begin{aligned} i_1 &= I_v - i \\ i_2 &= I_v + i. \end{aligned} \tag{4}$$

S tako definiranim elementima mogli bismo započeti proračun. No za samo razumijevanje korisnije nam je napraviti više zanemarenja, koja su inače fizikalno nedopustiva, ali pomoću kojih ćemo bolje uočiti utjecaj pojedinog elementa na komutaciju. Poslije možemo zanemarene elemente vratiti u dobivene slike i tako postepeno širiti pogled u pojavu. Zanemarimo najprije sve inducirane napone, tako da dobijemo čistu otporsku komutaciju, jer u promatranoj petlji ostaju samo otpori. Da olakšamo prvi korak, zanemarimo i otpore R_s i R_v, pa pretpostavimo da su prisutni samo prelazni otpori R_1 i R_2 u zamci u kojoj se pojava odvija. Za zamku po drugome Kirchhoffovu zakonu vrijedi:

$$i_1 R_1 - i_2 R_2 = 0.$$

Postepenom primjenom jednadžbi (4), (3) i (2) dobivamo:

$$I_v R_1 - i R_1 - I_v R_2 - i R_2 = I_v (R_1 - R_2) - (R_1 + R_2) = 0$$

$$i = I_v \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} = I_v \frac{R_č \frac{S_č}{S_1} - R_č \frac{S_č}{S_2}}{R_č \frac{S_č}{S_1} + R_č \frac{S_č}{S_2}} = I_v \frac{\frac{T_k}{t} - \frac{T_k}{T_k - t}}{\frac{T_k}{t} + \frac{T_k}{T_k - t}}$$

Uredimo li posljednji izraz, izlazi:

$$i = I_v \left(1 - 2 \frac{t}{T_k}\right), \tag{5}$$

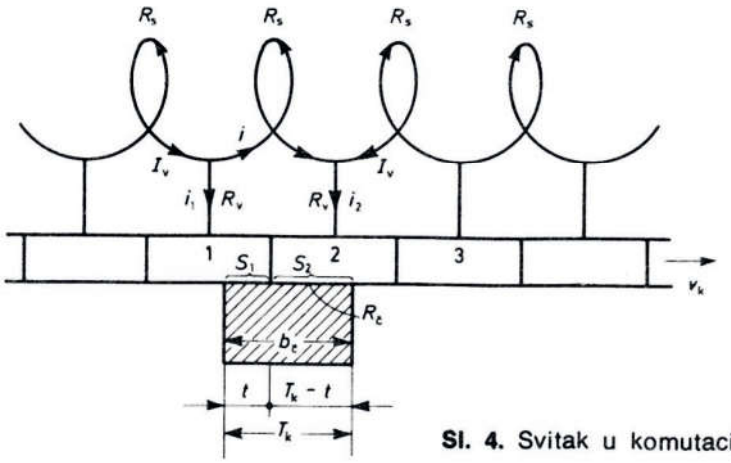
a to je jednadžba pravca. Kod takve bi se komutacije struja svitka u komutaciji mijenjala kao na slici 5, pa tu komutaciju možemo nazvati pravocrtnom. Iz slike 5. zapažamo, da je pri pravocrtnoj komutaciji gustoća struje pod četkicom i vremenski i prostorno konstantna, pa bismo takvom komutacijom mogli biti uglavnom zadovoljni.

Vratimo se sad na otporsku komutaciju, tj. ne zanemarimo ni jedan radni otpor u zamci. U tom slučaju vrijedit će za obilazni napon zamke (sl. 4):

$$i_1 R_v + i_1 R_1 - i_2 R_2 - i_2 R_v - i R_s = 0.$$

Sličnim izvodom koji smo proveli za relaciju (5) dobivamo za struju svitka u komutaciji:

$$i = I_v \frac{1 - 2 \frac{t}{T}}{1 + \frac{R_s + 2R_v}{R_č} \cdot \frac{t}{T_k} \left(1 - \frac{t}{T_k}\right)}. \tag{6}$$



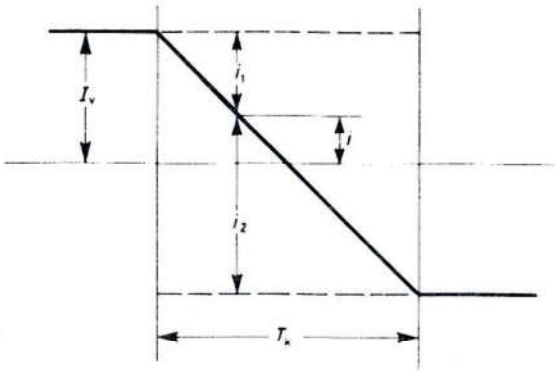
Sl. 4. Svitak u komutaciji

Taj bi izraz bio jednak izrazu (5) kad ne bi bilo drugog člana u nazivniku. U svakom trenutku, gdje za t vrijedi $0 < t < T_k$, taj je drugi član nazivnika numerički veći od nule, tj. nazivnik je veći od jedinice, pa na temelju toga možemo odrediti (kvalitativno) karakter toka struje i:

za $t = \frac{T_k}{2}$ $i = 0$ jednako kao na slici 5;

za $t < \frac{T_k}{2}$ i je pozitivno i manje nego na slici 5;

za $t > \frac{T_k}{2}$ i je negativno i po apsolutnom iznosu manje nego na slici 5.



Sl. 5. Pravocrtna komutacija

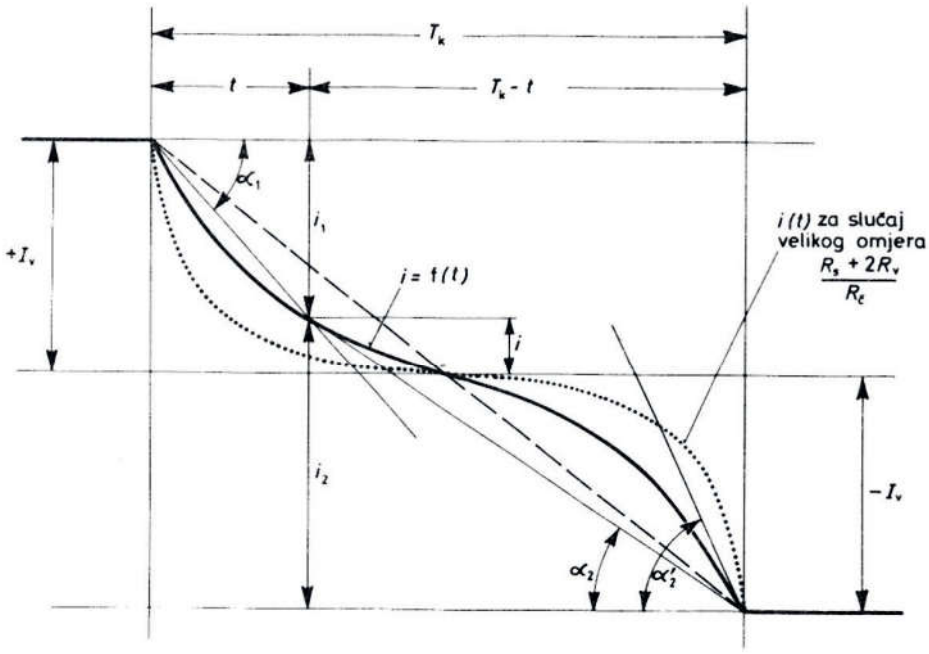
Tok struje i se iskrivi (vidi sl. 6). a iskrivi se to više prema onome sa slike 5. što je veći omjer $\frac{R_s + 2R_v}{R_č}$ iz jednadžbe (6). Taj omjer karakterizira opći slučaj otporske komutacije.

Gustoće struje pod četkicama računamo uz pomoć slike 6. i jednadžbe (2) na ovaj način:

$$\Gamma_1 = \frac{i_1}{S_1} = \frac{T_k\, i_1}{S_č\, t} = k_č \frac{i_1}{t} = k_č \operatorname{tg} \alpha_1$$

$$\Gamma_2 = \frac{i_2}{S_2} = \frac{T_k\, i_2}{S_č\, (T_k - t)} = k_č \frac{i_2}{(T_k - t)} = k_č \operatorname{tg} \alpha_2, \qquad (7)$$

gdje je $k_č = T_k/S_č$ konstantna veličina, a α_1 i α_2 su kutovi označeni na slici 6. Odaberemo li za trenutak promatranja $t \sim T_k$, gustoću struje na izlaznom bridu četkice nam predočuje veličina tangensa kuta α'_2 (vidi sl. 6), što ga u toj točki

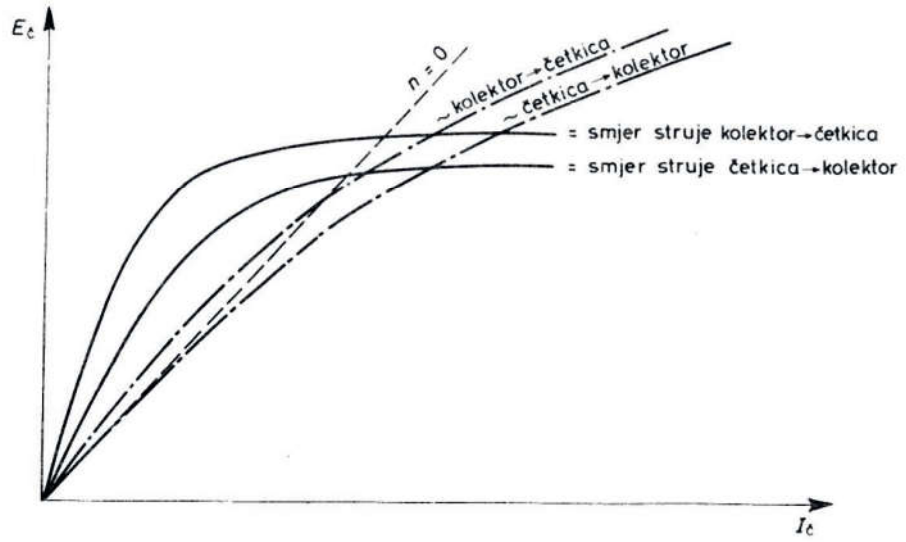


Sl. 6. Promjena struje u svitku pri otporskoj komutaciji

zatvara tangenta na struju $i = f(t)$ i produženi pravac struje $-I_v$. Ako raste karakteristični omjer $\frac{R_s + 2R_v}{R_č}$ i teži prema beskonačnosti, raste kut α'_2 i teži prema 90°, a njegov tangens također raste i teži prema beskonačnosti. S porastom karakterističnog omjera raste i gustoća struje na izlaznom bridu četkice, pa evo jednoga od mogućih uzroka loše komutacije. Otpor svitka R_s i otpori spojnih dijelova R_v iz tehničkih i ekonomskih razloga imaju svoju prirodnu veličinu, pa se ne mogu po volji podešavati. Da karakteristični omjer ne bude neugodno velik, ne smije prelazni otpor četkica $R_č$ biti malen! Za dobru komutaciju mora četkica imati relativno veliki prelazni otpor $R_č$. To je jedan od uvjeta dobre komutacije, pa je ponekad moguće spriječiti iskrenje stroja samo uzimanjem četkica koje imaju veći prelazni otpor.

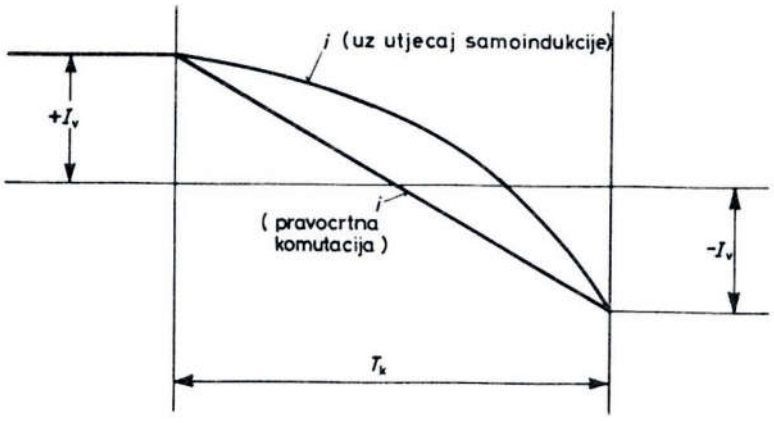
Prelazni otpor četkice ima i jedno neugodno svojstvo. On se mijenja s opterećenjem kad se stroj vrti, a konstantan je samo kad stroj stoji. Na slici 7. nacrtane su karakteristike prelaznih otpora četkica koji se razlikuju s obzirom na smjer struje. Osim toga se razlikuju vrijednosti prelaznih otpora kod izmjeničnih i istosmjernih kolektorskih strojeva. Neugodno je što s porastom opterećenja prelazni otpor $R_č$ pada, pa zato raste karakteristični omjer $\frac{R_s + 2R_v}{R_č}$. Zbog toga se povećava gustoća struje na izlaznom bridu, a s njom i vjerojatnost iskrenja, ne samo zbog povećanja tereta nego i zbog porasta karakterističnog omjera otpora.

Želimo li napustiti zanemarenja i pretpostaviti da na svitak u komutaciji djeluju sve stvarne fizikalne veličine, trebali bismo na osnovi drugoga Kirchhoffova zakona u zamku uvesti inducirane napone uzrokovane magnetskim poljima koja djeluju u zoni komutacije i koja smo već nabrojali. Time bi se naš račun toliko komplicirao da bismo izgubili fizikalni pregled nad utjecajem novouvedenih elemenata. Zato radije razmotrimo kako bi djelovalo na svitak magnetsko polje nastalo zbog vlastite indukcije svitka koji komutira, uz zanemarenje ostalih elemenata. Za vrijeme T_k promijenit će se struja u svitku od



Sl. 7. Ovisnost prelaznog otpora četkica o gustoći i smjeru struje

iznosa $+I_v$ na $-I_v$, uz zasad nepoznatu funkcionalnu ovisnost $i\ (t)$. Tu vremensku promjenu struje prati i vremenska promjena magnetskog toka, pa se kao posljedica u svitku inducira napon samoindukcije e_s, koji želi održati stanje u svitku nepromijenjenim. Struja se, dakle, opire promjeni stvaranjem protunapona. Zbog toga promjena struje u svitku vremenski zaostaje za onom koju bi imala bez djelovanja samoindukcije, tj. struja zaostaje za onom strujom koja bi rezultirala iz pravocrtne komutacije. Približan prikaz daje slika 8. Takva



Sl. 8. Utjecaj samoindukcije na komutaciju

odstupanja struje od pravocrtne komutacije nazivamo *potkomutacijom*. Djelovanje samoindukcije je dakako štetno jer uzrokuje daljnje povećanje gustoće struje pod izlaznim bridom četkice, tj. dovodi do loše komutacije. Na žalost, taj je utjecaj jači, dakle i opasniji, od utjecaja maloga prelaznog otpora četkica, pa ga moramo svakako suzbiti. Upoznajmo se pobliže s naponom samoindukcije. On je prema Faradayevu zakonu:

$$e_s = -w_s \frac{d\Phi_s}{dt} = -L_s \frac{di}{dt}, \tag{8}$$

gdje je Φ_s rasipni tok svitka, a L_s je induktivitet svitka u komutaciji.

Iznose napona samoindukcije u pojedinim trenucima e_s i njegov maksimalni iznos e_{smax} ne znamo jer ne znamo kvantitativno $i(t)$, a mogli bismo matematički dobiti rezultat tek rješavanjem diferencijalne jednadžbe zamke svitka u komutaciji, koju bismo postavili uzevši u obzir sve otpore i inducirane napone što se pojavljuju pri komutaciji. Umjesto toga zadovoljimo se izračunavanjem srednje vrijednosti tog napona e_{ssr}, koji dobivamo uz pretpostavku linearnog toka struje i.

Rasipni tok iznosi:

$$\Phi_s = \xi b'_č A l,$$

pri čemu je ξ koeficijent proporcionalnosti samoinduktiviteta koji obuhvaća ukupno rasipanje svitka u utoru, rasipanje glava svitka i rasipanje u zračnom rasporu; vrijednost $\xi \cdot l$ nam fizikalno predstavlja magnetsku vodljivost jedne strane svitka, a kreće se u granicama $\xi = (4 - 6 - 8) \cdot 10^{-6}$ $[\frac{Vs}{Am}]$; veći se iznosi odnose na manje strojeve, i obrnuto. Za srednji napon samoindukcije dobivamo uvrštavanjem u jednadžbu (8):

$$e_{ssr} = \frac{2 w_s \xi b'_č A l}{T_k}.$$

Uz pomoć relacije (1) izlazi:

$$e_{ssr} = 2 w_s \xi v_a A l \ [V]. \tag{9}$$

Napon samoindukcije svitka u komutaciji znatno pogoršava komutaciju, pa bi on kod malo većih strojeva čak onemogućio rad kad ga ne bismo mogli suzbiti. On se suzbija tako da se na svitak djeluje magnetskim poljem koje izaziva inducirani napon suprotan induciranom naponu samoindukcije, pa tako neutralizira njegovo djelovanje. To magnetsko polje stvaraju pomoćni polovi, koje smo već prije uveli u odjeljku o reakciji armature. Njihova je glavna zadaća da omoguće ispravnu komutaciju. Magnetsko polje pomoćnih polova izaziva u svitku u komutaciji inducirani napon e_{pp} u iznosu:

$$e_{pp} = 2 B_{\delta pp} l v_a W_s. \tag{10}$$

Pretpostavimo da treba poništiti samo djelovanje napona samoindukcije. Izjednačimo li izraze (9) i (10), izlazi:

$$e_{ssr} = 2 v_a w_s \zeta A l = e_{pp} = 2 B_{\delta pp} l v_a w_s,$$

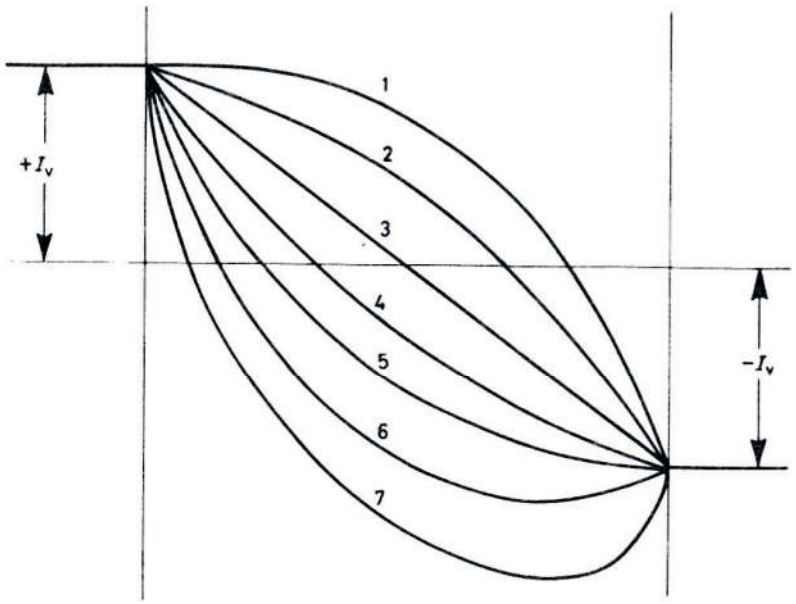
a odatle:

$$B_{\delta pp} = \xi A. \tag{11}$$

Tako dobivamo uvjet za dimenzioniranje magnetskog polja pomoćnih polova ako želimo da nam se sasvim poništi djelovanje samoindukcije svitka. Zapravo, dimenzioniramo djelovanje pomoćnih polova nešto jače, iz ovih razloga:

a) Želimo poništiti i djelovanje magnetskog polja reakcije armature u neutralnoj zoni, koje je istog smisla kao i djelovanje magnetskog polja nastaloga samoindukcijom;

b) Želimo da struja komutacije ima tok po krivulji 4 ili 5 na slici 9, tako da se gustoća struje na izlaznom bridu četkice što više smanji. Slika 9. jasno prikazuje vezu između pomoćnih polova i kvalitete komutacije. Krivulje 1 i 2 govore o preslabim pomoćnim polovima i lošoj komutaciji, tj. o potkomutaciji. Krivulje 4 i 5 predočuju optimalno stanje, a 6 i 7 stanje pri prejakom djelovanju pomoćnih polova, što dovodi do *natkomutacije*, a ona može također izazvati iskrenje kao i potkomutacija.



Sl. 9. Krivulje komutacije

Pomoćni su polovi protjecani strujom armature i namot im je spojen u seriju s armaturnim namotom, tako da magnetsko polje pomoćnih polova ostaje pri svakom teretu proporcionalno magnetskom polju nastalome djelovanjem struje armature. To će vrijediti samo kad magnetski krug pomoćnih polova nije zasićen. Budući da je komutacija otežana upravo pri preopterećenjima i udarcima struje, pomoćni se polovi tako grade da ni uz preopterećenja od 60 do 200 % ne nastane zasićenje u njihovu magnetskom krugu. Prilikom gradnje stroja namjena stroja odlučuje kako će se dimenzionirati pomoćni polovi, tj. do kojega strujnog preopterećenja moraju pomoćni polovi ostati nezasićeni.

Prema iznijetome i prema izlaganju o zajedničkom djelovanju kompenzacije i pomoćnih polova (vidi odjeljak 4. 3), potrebno protjecanje pomoćnih polova možemo ovako računati:

$$\Theta_{pp} = \Theta_a - \Theta_{ko} + V_{komut}, \tag{12}$$

gdje je V_{komut} magnetski napon kruga pomoćnih polova. Za nezasićeni magnetski krug pomoćnih polova smije se zanemariti magnetski napon feromagnetskih dijelova kruga, a tad se rezultantno protjecanje (pomoćnih polova, armature i kompenzacije) troši samo na magnetski napon zračnog raspora pomoćnih polova. Koristeći se izrazom (11) dobivamo:

$$\xi A = B_{\delta pp} = \mu_0 H_{\delta pp} = \mu_0 \frac{V_{komut}}{2\delta_{pp}},$$

iz čega dalje nastaje:

$$V_{komut} = 2\delta_{pp} \frac{A\xi}{\mu_0} \text{ [A]}. \tag{13}$$

Magnetski napon kruga pomoćnih polova prema izrazu (13) odgovarao bi pravocrtnoj komutaciji (krivulja 3 na sl. 9). Za ostvarenje optimalne komutacije (krivulja 4 i 5 na sl. 9) magnetski napon kruga pomoćnih polova mora biti nešto viši nego što izlazi prema izrazu (13). Obično se zajedničko protjecanje namota pomoćnih polova i kompenzacijskog namota dimenzionira tako da indukcija pod pomoćnim polovima – vidi izraz (11) – bude od 8 do 25% veća od vrijednosti ξA:

$$B_{\delta pp} = (1{,}08 - 1{,}25)\,\xi A. \tag{14}$$

Faktor povećanja ovisi, dakako, o mogućnosti izvedbe odgovarajućeg broja zavoja pomoćnih polova, koji mora, po prirodi stvari biti cijeli broj. Taj višak protjecanja u praksi se ostvaruje uglavnom izvedbom namota pomoćnih polova, a ne izvedbom kompenzacijskog namota (za strojeve s kompenzacijskim namotom) jer se izvedbom kompenzacijskog namota nastoji ostvariti prije svega jednako protjecanje kompenzacijskog namota i namota armature u zračnom rasporu pod glavnim polom, i to na širini polnog nastavka glavnog pola. Za stroj bez kompenzacijskog namota to se pitanje uopće ne postavlja jer je namot pomoćnog pola jedini namot kojim se ostvaruje protudjelovanje samoindukciji svitka u komutaciji. Ako nakon takva dimenzioniranja stroj iskri zbog toga jer je ipak došlo do potkomutacije ili natkomutacije, obavljaju se prilikom ispitivanja stroja u ispitnoj stanici korekcije zračnog raspora pomoćnih polova δ_{pp} vađenjem ili umetanjem podložnih limova između jarma statora i pomoćnih polova sve, dok se nađe prava vrijednost indukcije pod pomoćnim polovima.

Iz cijelog izlaganja lako je uvidjeti da se, unatoč mogućnosti uspješnog podešavanja ukupnoga magnetskog stanja pod pomoćnim polovima, ipak mora ograničiti iznos e_{ssr}. Najvažniji je razlog tome da ne možemo graditi po volji jako velike (zasićenje!) i skupe pomoćne polove, a osim toga, iako se dade u neutralnoj zoni napraviti savršena kompenzacija protjecanja po iznosu, ne može se iz geometrijsko-konstrukcijskih razloga napraviti savršena kompenzacija po prostornom obliku polja. Ako tako nastali *ostaci* polja imaju relativno visoku indukciju, izazvat će oni teškoće pri komutaciji. U literaturi se mogu pronaći razni podaci o tome koliki iznos smiju imati e_{ssr} ili e_s. Najčešće se u literaturi za strojeve opće namjene nalaze ove dopuštene srednje vrijednosti napona samoindukcije:

– za stroj bez kompenzacijskog namota

$$e_{ssr} \leq 5 \text{ [V]}; \tag{15}$$

– za stroj s kompenzacijskim namotom

$$e_{ssr} \leqslant 8\ [\mathrm{V}]. \tag{16}$$

Pri tome se misli na pogonsko stanje stroja u radu s nazivnim opterećenjem.

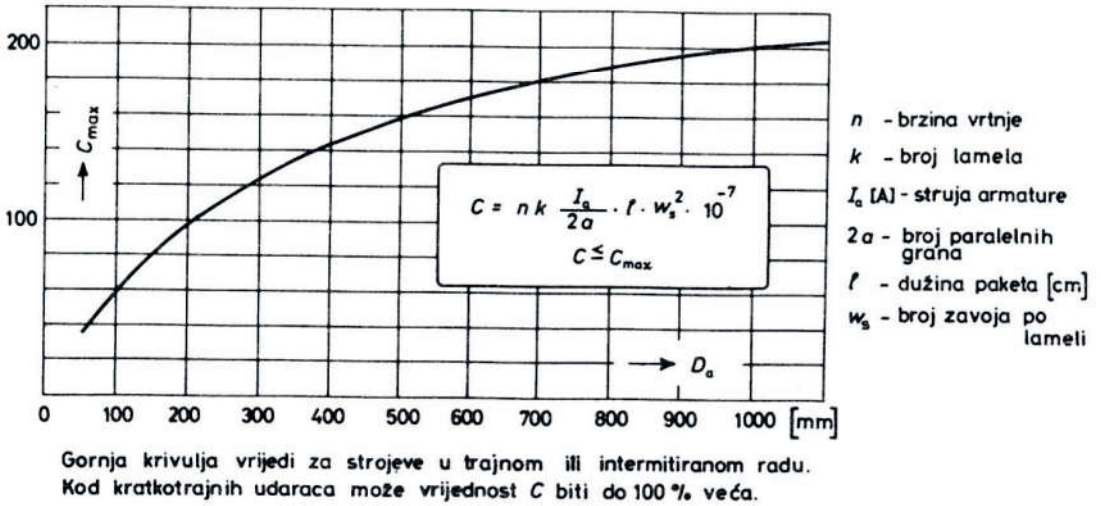
Za napon samoindukcije $e_s(t)$, prema tome i za njegovu maksimalnu vrijednost e_{smax}, nezgoda je još i u tome što je točniji proračun tih veličina kompliciran. To se donekle može reći i za e_{ssr} jer se točnija vrijednost ξ iz relacije (9) ne da sasvim jednostavno pronaći. Zbog toga se u praksi nekih proizvođača, za strojeve koji nisu komutacijski znatno napregnuti, primjenjuje jedna relativno stara, mnogo jednostavnija metoda provjere ispravnosti stroja s obzirom na napon samoindukcije. Već 1902. uveo je Lener pojam parametra, koji je nazvao *C–vrijednost* i računao ga je po formuli:

$$C = 3 w_s l A v_a 10^{-6}.$$

Tvrdio je pri tome da je iskustvo na većim strojevima pokazalo dobru komutaciju za $C < 200$ u trajnom radu. Usporedi li se ta formula s formulom (9) za proračun srednje vrijednosti napona samoindukcije, vidi se da su u obje relacije zastupljene sve veličine koje se mogu bitno mijenjati. Različite su samo konstante ili veličine praktički konstantna iznosa. Znači da obje formule daju numerički mjeru za istu pojavu uz različita mjerila i dimenzije. Danas je iskustvo s upotrebom C – vrijednosti kao mjerila za napon samoindukcije napredovalo pa se C – vrijednost radije piše kao:

$$C = nk \frac{I_a}{2a} l w_s^2 10^{-7} \tag{17}$$

s brzinom vrtnje n u okretajima na minutu i dužinom stroja l u [cm]. To je i numerički potpuno ista formula kao prije navedena jer je nastala iz prethodne zamjenom fizikalnih veličina za strujni oblog A i obodnu brzinu v_a. Slika 10.



Sl. 10. Ovisnost *C*-vrijednosti o promjeru rotora

pokazuje do kojih su C – vrijednosti iskustva pokazala dobru komutaciju u trajnom radu ovisno o promjeru armature. Za udarna opterećenja može se kao dopustiva C – vrijednost uzeti dvostruka vrijednost prema krivulji na slici 10.

4.4.2. Komutacija i namot

U dosadašnjim razmatranjima komutacije, u kojima je širina četkice bila jednaka širini lamele kolektora, raspravljali smo o svitku u komutaciji. Kad četkica prekriva više lamela, u komutaciji sudjeluje istodobno dio namota armature. Da bismo znali o kojem je dijelu namota riječ, moramo razlikovati pojam *strana svitka* (w_s zavoja spojenih između dvije lamele u komutaciji) od pojma *svitak* (u strana svitaka uloženih u jedan utor).

Dosad se nismo obazirali na pitanje kolika mora biti širina četkice, tj. koliko će lamela četkica prekrivati. Na slici 4. nacrtana je četkica širine jedne lamele. Ako za trenutak razmotrimo kako bi u takvu odnosu širine lamele i četkice komutirao, recimo, petljasti dvovojni namot, vidimo da bi četkica prekrivala lamele koje pripadaju galvanski odvojenim strujnim krugovima. Četkica, dakle, mora biti šira za takav slučaj. S malo razmišljanja možemo doći do zaključka kako je uopće dobro da četkica bude šira od jedne lamele, i to u svakom slučaju. Sa širinom lamele raste i trajanje komutacije T_k. Struja koja se nezavisno od širine lamele uvijek mijenja za iznos $2I_v$, kod šire lamele sporije se mijenja (di/dt!) pa je trenutni iznos napona samoindukcije, prema jednadžbi (9), manji, i time je komutacija bolja. Da budemo precizni, sjetimo se da su lamele međusobno izolirane i da debljina te izolacije, koju označimo s j, ulazi u račun prekrivanja. Zato radije operiramo s *korakom lamele* kao pojmom; označujemo ga s τ_k, pri čemu je:

$$\tau_k = b_l + j$$

$$\tau_k = \frac{D_k \cdot \pi}{k}. \tag{18}$$

Omjer između širine četkice i koraka lamele kolektora nazovimo geometrijskim prekrivanjem četkica i označimo ga s β_g, tj.:

$$\beta_g = \frac{b_č}{\tau_k} = \frac{b_č}{b_l + j}. \tag{19}$$

Za razmatranje procesa komutacije zanimljivije je prekrivanje četkica u električkom smislu, tj. ono prekrivanje pri kojem četkica stvarno kratko spaja strane svitka u komutaciji. Iz geometrijskog položaja strane svitka u komutaciji za razne vrste namota armature (u analizu kojih nećemo ovdje ulaziti) dobivamo širinu četkice u električkom smislu $b_{či}$, tj.:

$$b_{či} = b_č - j + (1 - \frac{a}{p})\tau_k, \tag{20}$$

pa će onda prekrivanje četkica u električkom smislu biti:

$$\beta = \frac{b_{\check{c}i}}{\tau_k}. \tag{21}$$

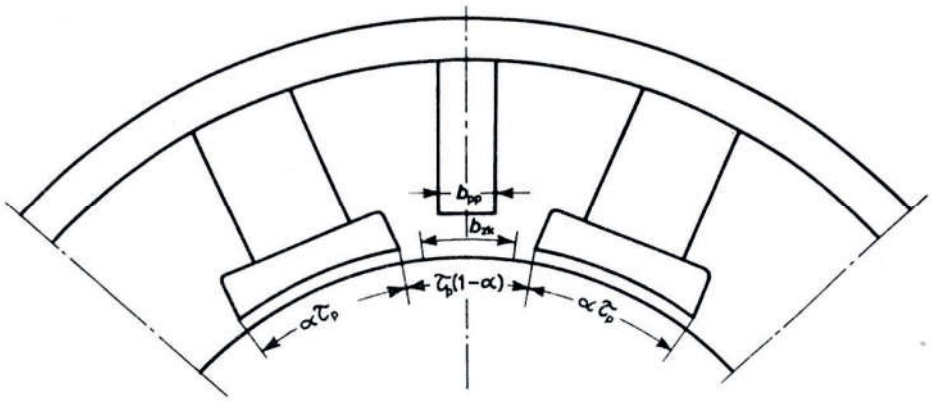
Usporedbom izraza od (19) do (21) vidi se da je samo za najjednostavniji namot, tj. jednovojni petljasti namot, geometrijsko i električko prekrivanje jednako. Radi jednostavnijeg tumačenja, problematiku prekrivanja četkica razmotrit ćemo na jednovojnome petljastom namotu. Uočili smo jake razloge za to da prekrivanje četkica učinimo $\beta > 1$. Pri tome četkica kratko spaja više od jedne strane svitka, u što se lako uvjerimo zamislimo li na slici 4. četkicu, recimo, dva ili više puta širom nego što je ucrtano. Dakle, komutira istodobno više strana svitaka. Pažljivim računom moguće je dokazati da i za tu novu situaciju vrijedi sve što je dosad rečeno i izvedeno za komutaciju s četkicom širine lamele ($b_č = \tau_k$), promatra li se uvijek samo jedna strana svitka, osim jedne razlike. Veličina ξ, koja se pojavljuje u jednadžbi (9) i poslije, ne označava više samo vlastito rasipno djelovanje jedne strane svitka u komutaciji nego i međuinduktivno djelovanje svih strana svitaka koje komutiraju pod jednom četkicom.

U praksi se prekrivanje četkice uzima $\beta = 2{,}5-5$ i vrlo se nerado ide bilo ispod, bilo iznad tog omjera. Pri manjem prekrivanju obično je trajanje komutacije T_k prekratko, a pri većemu postane preširoka zona na obodu stroja gdje se odvija komutacija, jer komutira mnogo strana svitaka najednom. Tu zonu zovemo *komutacijskom zonom*. Za prekrivanje se četkica, osim toga, izbjegava da omjer prekrivanja β bude cijeli broj, pri čemu je posebno opasno $\beta = u$, tj. kad četkica prekriva upravo onoliko lamela koliko ima strana svitka u jednom utoru. Da to protumačimo, pretpostavimo da je $u = 3$ i $\beta = 3$, tj. četkica je široka točno koliko i tri koraka lamele, pa prekriva točno tri lamele istodobno ($b_č = 3\tau_k$). Tokom vrtnje stroja ponavlja se nakon svakoga utorskog koraka raspored kad četkica točno pokriva upravo tri strane svitka iz istog utora. Zato je međuinduktivno djelovanje u tim položajima mnogo jače nego kad četkica pokriva strane svitaka koje leže u raznim utorima. U tom je položaju i napon samoindukcije prema jednadžbi (9) viši nego u drugima, pa je vjerojatno da će i kod stroja koji ne iskri nastati sitno iskrenje, i to samo na lameli što upravo u tom trenutku napušta četkicu, tj. na svakoj trećoj lameli. Kažemo da svaka treća (svaka u-ta) lamela pocrni zbog tog efekta, a zbog njega se upravo ta lamela i više troši. Nakon nekog vremena može nastupiti iskrenje cijelog kolektora, sad već iz mehaničkih razloga nastalih kao posljedica opisane pojave.

Problem prekrivanja kod viševojnih namota nešto je kompliciraniji, pa nećemo ovdje u njega zalaziti.

U uvodnim razmatranjima govorili smo o tome da se komutacija obavlja u neutralnoj zoni. To je vrlo neprecizno rečeno. To bi moglo biti egzaktno samo kad bi širina četkice bila jednaka nuli ($b_č = 0$) i kad bi se struja u beskonačno kratkom vremenu mogla promijeniti za iznos $2I_v$. Budući da to nije moguće, korigirajmo pojmove sad kad smo pojavu nešto bolje upoznali. Ostavimo naziv *neutralna zona* za aksijalnu ravninu u kojoj je iznos magnetskog polja jednak nuli i koja u

radijalnom smjeru nema dimenzije, kako smo to i prije učinili. Za zonu gdje stroj komutira, u prostoru među glavnim polovima, koristimo se već uvedenima izrazom *komutacijska zona*. To je prostor kojem je neutralna zona simetrala (kod normalnih namota!), a u radijalnom smjeru se od nje prostire na jednu i drugu stranu. Komutacijska zona ima, za razliku od neutralne zone, širinu u radijalnom smjeru, koju mjerimo na obodu rotora. Tako definiranu širinu komutacijske zone označimo oznakom b_{zk}, kako je to učinjeno na slici 11.



Sl. 11. Širina komutacijske zone u odnosu prema dimenzijama glavnih i pomoćnih polova

Strane svitka u komutaciji kojih su lamele kratko spojene ne smiju se nalaziti u prostoru u kojem je magnetsko polje glavnih polova jako. Sa slike 11. jasno izlazi da za širinu komutacijske zone mora biti održano:

$$b_{zk} < \tau_p(1-\alpha)$$

jer strana svitka ne smije komutirati pod glavnim polom. Dalje, nije dobro da je komutacijska zona uža od širine pomoćnih polova, zbog toga što želimo postići i prostornu kompenzaciju polja u komutacijskoj zoni, kako je to prije objašnjeno. Prema tome, za odnose dimenzija vrijedi (vidi sl. 11):

$$b_{pp} < b_{zk} < \tau_p(1-\alpha). \tag{22}$$

Točno je poznavanje širine komutacijske zone, dakle, važno za dimenzioniranje širine i glavnih i pomoćnih polova. U svakom slučaju, želimo postići da ta širina nije velika, da ne moramo jako smanjivati širinu polne papuče glavnih polova, jer to vodi do izravnog gubitka snage stroja. Najužu komutacijsku zonu daje jednovojni namot uz dijametralni korak svitka. Tad je ona jednaka širini četkice $b_č$, dakako reducirane na obod armature, gdje ionako reduciramo sve dimenzije koje se odnose na ova razmatranja.

Prema tome će za ovaj slučaj vrijediti:

$$b_{zk} = \frac{D_a}{D_k} b_č . \tag{23}$$

Rijetkost je da se stroj može izvesti uz pretpostavke koje daju izvedenu relaciju. Nakon geometrijskog razmatranja, provedenoga za bilo kakav normalni namot, dolazi se do opće jednadžbe za širinu komutacijske zone. To razmatranje nećemo provoditi jer je riječ samo o geometriji, nego ćemo dati samo rezultat, koji glasi:

$$b_{zk} = \tau_k \frac{D_a}{D_k}\left[u\left(1 + \left|\frac{N}{2p} - \frac{y_1}{u}\right|\right) - \frac{a}{p}\right] + \frac{D_a}{D_k} b_č. \tag{24}$$

Drugi dio izraza na desnoj strani teorijska je minimalna širina komutacijske zone, a prvi je dio proširenje te zone, zbog geometrijskih odstupanja namota prema jednovojnom namotu s dijametralnim korakom. Pri konkretnom dimenzioniranju nekoga istosmjernog stroja nastoje se namot i širina polova tako podesiti da širina komutacijske zone b_{zk} iz relacije (24) bude približno jednaka srednjoj aritmetičkoj vrijednosti između veličina b_{pp} i $\tau_p\,(1-\alpha)$. Tada se postižu povoljni odnosi magnetskih polja koja djeluju u komutacijskoj zoni. Ovim smo razlaganjem ujedno obrazložili odakle dolazi drugi bitni razlog za ograničenje širine polnih papuča glavnih polova istosmjernog stroja.

Pri upotrebi manjkavih namota prema potpoglavlju 3.5, treba biti oprezan pri baratanju širinom zone komutacije b_{zk}. Relacija za izračunavanje (24) vrijedi i za te namote, samo neutralna zona nije više u svakom trenutku simetrala komutacijske zone. Naprotiv, ona to postaje samo u jednom trenu za vrijeme zakretanja armature za 180 električkih stupnjeva. Geometrijska nesimetričnost uzrokovana mrtvim svicima i lamelama izaziva kod svakog položaja rotora prema statoru drukčiji položaj komutacijske zone prema neutralnoj zoni. Taj se položaj tokom vrtnje kontinuirano mijenja, osim kad mrtvi svitak ili lamela prolaze kroz neutralnu zonu. Tad komutacijska zona preskoči iz jednoga krajnje nesimetričnog položaja u drugi, tj. u onaj s druge strane neutralne zone. Lako je uvidjeti da ta ukupna šetnja komutacijske zone iznosi jedan korak lamele τ_k, preračunato na obodu armature. Zato se kod strojeva s manjkavim namotima ne računa sa stvarnom širinom komutacijske zone b_{zk}, već se uzimaju u obzir i granice do kojih komutacijska zona dolazi prilikom svoje šetnje oko neutralne zone. Dakle, za strojeve s manjkavim namotom valja računati kao da komutacijska zona iznosi:

$$b'_{zk} = b_{zk} + \tau_k \frac{D_a}{D_k} \tag{21}$$

jer se tek time osigurava ispravno dimenzioniranje polova, što vuče svoj korijen iz poznavanja položaja u kojima nastupa komutacija.

U poglavlju o namotima spomenuli smo prednosti stepeničastog namota pri dimenzioniranju i komutaciji istosmjernog stroja. Sad smo u stanju te prednosti i protumačiti. Iz potpuno geometrijskih razloga moguće je korak svitka stepeničastog namota učiniti bližim dijametralnome nego što je to slučaj za druge namote. Zbog toga mu je komutacijska zona uža nego drugim namotima. Drugi je razlog u tome što je pri stepeničastom namotu međuinduktivno djelovanje među svicima koji komutiraju manje jer su povratne strane svitaka u raznim utorima. Zato je koeficijent ξ, koji smo uveli jednadžbom (9) i proširili u pasusu iza jednadžbe (21),

manji za stepeničasti nego za odgovarajući obični namot. A onda je manji i napon samoindukcije, što je jasno na osnovi relacije (9). Obje iznesene prednosti stepeničastog namota znatno utječu na smanjenje problema komutacije. Zato se veliki strojevi redovno grade sa štapnim stepeničastim namotom.

4.5. Komutacija u statičkom stanju stroja

U prethodnom dijelu upoznali smo se s osnovnom problematikom komutacije i ulogom pomoćnih polova. Budući da je danas komutacija, zbog povećanog iskorištenja strojeva (u mehaničkome, termičkom i potencijalnom smislu), jedan od osnovnih problema u gradnji istosmjernih strojeva, potrebno je proširiti znanja o njoj. U ovom odjeljku detaljnije ćemo razmotriti skup elektromagnetskih pojava koje nastaju u stranama svitaka namota armature u procesu komutacije, tj. pri prijelazu tih strana svitaka iz jedne grane namota u drugu. Ako se elektromagnetske pojave odvijaju nepovoljno, nastupit će iskrenje četkica, koje u stanovitim uvjetima eksploatacije ne smije prekoračiti granice dopuštene propisima. Pri tome valja razlikovati dopušteno iskorištenje u trajnom radu od onoga pri trenutnom preopterećenju.

Razmatranje elektromagnetskih pojava u procesu komutacije provest ćemo na osnovi klasične teorije komutacije. Podsjetimo se da su u statičkom stanju napon, struja armature, magnetski tok glavnih i pomoćnih polova i brzina vrtnje konstantne veličine, pa iščezava utjecaj vrtložnih struja u magnetskom krugu. U svitku pri komutaciji nastaje inducirani napon e_{pp} uzrokovan magnetskim tokom pomoćnih polova (u fazi sa strujom pomoćnih polova) i inducirani napon samoindukcije e_s (u fazi sa strujom armature).

4.5.1. Napon samoindukcije

Prošireno razmatranje napona samoindukcije svitka u komutaciji, i određivanje njegove vrijednosti provest ćemo za dvoslojni namot, najčešće upotrebljavan za namote armature istosmjernih strojeva.

U odjeljku 4.4. već smo se upoznali sa širinom četkice u električkom smislu (tzv. idealna širina četkice), prema izrazu (4.4–20), i prekrivanjem četkica, prema izrazu (4.4–21), tj.:

$$b_{\check{c}i} = b_{\check{c}} - j + (1 - \frac{a}{p})\ \tau_k \qquad (4.4-20)$$

$$\beta = \frac{b_{\check{c}i}}{\tau_k}. \qquad (4.4-21)$$

Spomenimo još neke odnose kojima se koristi pri zasnivanju namota armature. Namot armature izvodi se kao obični (nestepeničasti) ($\frac{y_1}{u}$ = cijeli broj) ili kao stepeničasti ($\frac{y_1}{u} \neq$ cijeli broj). Obični namot može biti dijametralan ($y_1 = \frac{k}{2p}$) ili nedijametralan (skraćeni ili produženi) namot ($y_1 \neq \frac{k}{2p}$). Geometrijski odnos između polnog koraka i koraka svitka y_1 izražen brojem kolektorskih lamela nazivamo skraćenjem (ili produženjem) namota, tj.:

$$\varepsilon = |\frac{k}{2p} - y_1|. \qquad (1)$$

Iz izraza (1) vidi se da pri dijametralnom namotu skraćenje namota iznosi $\varepsilon = 0$. Za stepeničasti namot različita su skraćenja namota za kraći i duži svitak.

Skraćenje namota za kraći svitak bit će:

$$\varepsilon_k = \left|\frac{N}{2p} - y_{1N}\right| u, \tag{2}$$

a za duži svitak:

$$\varepsilon_l = |u - \varepsilon_k|, \tag{3}$$

pri čemu je N broj utora armature, u broj strana svitaka u utoru, a y_{1N} cijeli dio od $\frac{y_1}{u}$, tj. korak kraćeg svitka mjeren brojem utora.

Napon samoindukcije strane svitka u komutaciji iznosi:

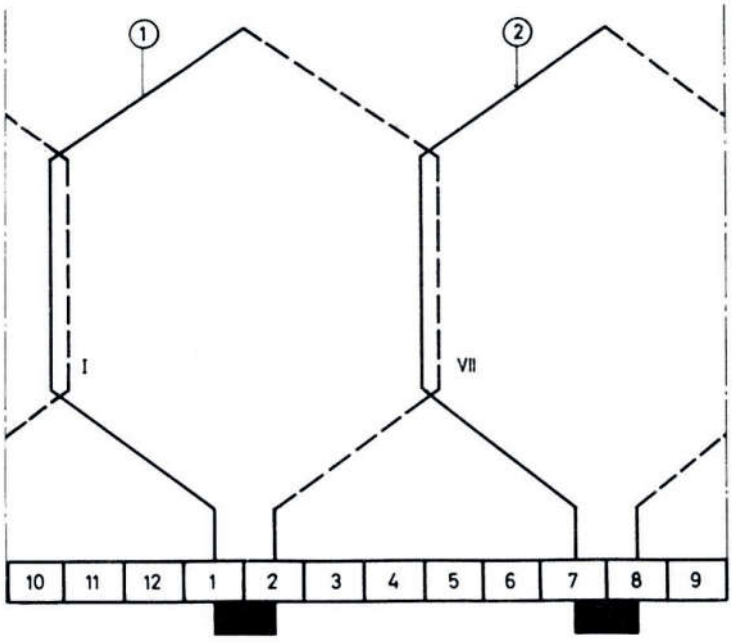
$$e_s = -L_{ak}\frac{di}{dt} = -(L_u + L_{gz} + L_g)\frac{di}{dt}. \tag{4}$$

U jednadžbi (4) je s L_{ak} označen ukupni rasipni induktivitet (samoinduktivitet i međuinduktivitet) strane svitka u komutaciji, a L_u, L_{gz} i L_g su rasipni induktiviteti utora glave zuba i glava namota.

Razmotrimo najprije određivanje rasipnih induktiviteta za najjednostavniji namot armature koji imamo kod dijametralnog namota ($\varepsilon = 0$) s jednom stranom svitka u utoru ($u = 1$) i kad još prekrivanje četkica iznosi $\beta = 1$. Takav namot uz $N = 12$ i $2p = 2$ prikazan je na slici 1. Pri tome nema utjecaja međuinduktiviteta drugih strana svitaka na promatranu stranu svitka u komutaciji, a gornji dio svitka 1 i donji dio svitka 2 nalaze se u istim utorima; na našem primjeru slike 1. u utorima I i VII. Rasipni induktivitet utora tad iznosi:

$$L_u = \mu_0 w_s^2 l_{\check{z}} (\lambda_g + \lambda_d + 2\lambda_m)\ 10^{-3}\ [\mathrm{H}], \tag{5}$$

pri čemu je w_s broj zavoja strane jednog svitka u komutaciji (broj zavoja između susjednih kolektorskih lamela), $l_{\check{z}}$ dužina paketa armature [mm], a μ_0 permeabilitet zraka [Hm^{-1}].



Sl. 1. Položaj strana svitaka u komutaciji

Dalje, λ_g je jedinična vodljiva vrijednost rasipanja (ili specifična rasipna vodljivost) gornjega, λ_d donjeg sloja svitka u utoru, dok λ_m označava jediničnu vodljivu vrijednost rasipanja zbog međuinduktivne veze gornjeg i donjeg sloja svitka u utoru.

Srednja vrijednost jedinične vodljive vrijednosti rasipanja strane svitka u utoru približno se uzima:

$$\lambda_u = \frac{\lambda_g + \lambda_d + 2\lambda_m}{4} \quad [1]. \tag{6}$$

Tada će rasipni induktivitet utora biti:

$$L_u = \mu_o w_s^2 l_ž 4 \lambda_u 10^{-3} [H]. \tag{7}$$

Rasipni induktivitet glave zuba pri tome iznosi:

$$L_{gz} = \mu_o w_s^2 l_ž 4 \lambda_{gz} 10^{-3} [H], \tag{8}$$

pri čemu je λ_{gz} jedinična vodljiva vrijednost rasipanja glave zuba.

Za rasipni induktivitet glave namota dobivamo:

$$L_g = \mu_o w_s^2 2 l_g \lambda_{gnk} 10^{-3} [H], \tag{9}$$

pa λ_{gnk} označava jediničnu vodljivu vrijednost rasipanja glave namota, a l_g je dužina glave namota vodiča [mm].

Razmotrimo, dalje, kako se mijenjaju rasipni induktiviteti L_u, L_{gz} i L_g kad pri promjeni parametara namota (ε, β, u), sve u odnosu prema dijametralnom namotu ($\varepsilon = 0$) s jednom stranom svitka u utoru ($u = 1$) i prekrivanjem četkica $\beta = 1$.

Kad dijametralnom namotu ($\varepsilon = 0$) s jednom stranom svitka u utoru ($u = 1$), prikazanome na slici 1, povećamo prekrivanje četkica ($\beta > 1$), strane svitaka iz susjednih utora koje istodobno komutiraju ne stvaraju u utorskom dijelu ulančeni rasipni magnetski tok s promatranom stranom svitka u komutaciji i rasipni se induktiviteti L_u i L_{gz} ne mijenjaju. Na glavi namota, gdje se rasipni magnetski tok zatvara zrakom, susjedne strane svitka ulančuju svoj rasipni magnetski tok s promatranom stranom svitka u komutaciji i rasipni se induktivitet povećava. Samo zbog toga, ukupni rasipni induktivitet raste.

U primjeru utora s jednom stranom svitka ($u = 1$), prekrivanjem četkica $\beta = 1$ i skraćenim ili produženim namotom ($\varepsilon \neq 0$), ulančeni rasipni magnetski tok strane svitka u komutaciji se smanjuje u utorskom dijelu (zbog slabljenja ili čak nepostojanja međuinduktivne veze između gornjeg i donjeg sloja namota, ovisno o broju utora i polova) i smanjuju se rasipni induktiviteti L_u i L_{gz}. Iščezavanje međuinduktivne veze vidi se npr. kad je na slici 1. korak svitka $y_1 = 5$. Ulančeni rasipni magnetski tok glava namota i rasipni induktivitet L_g se ne mijenjaju. Dakle, ukupni se rasipni induktivitet smanjuje.

Za utor s više strana svitaka ($u > 1$), uz prekrivanje četkica $\beta = 1$ pri dijametralnom namotu ($\varepsilon = 0$), ulančeni rasipni magnetski tok promatrane strane svitka u komutaciji i rasipni induktiviteti L_u i L_{gz} ne mijenjaju se (za utor istih dimenzija). Ulančeni se rasipni magnetski tok glava namota praktički ne mijenja, pa nema ni promjene ukupnoga rasipnog induktiviteta.

Za utor s više strana svitaka ($u > 1$) uz skraćeni namot ($\varepsilon \neq 0$), i kad četkica prekriva više lamela ($\beta > 1$), povećava se ulančeni rasipni magnetski tok promatrane strane svitka u komutaciji na utorskom dijelu (zbog porasta međuinduktivnog djelovanja strana svitaka istog utora koje komutiraju istodobno). Zato se povećavaju rasipni induktiviteti L_u i L_{gz}.

Pri tome je ovakav utjecaj pojedinog parametra na ulančeni rasipni magnetski tok: s porastom broja u (strana svitka u utoru) i prekrivanja četkica β ulančeni se rasipni magnetski tok povećava, a s porastom skraćenja namota ε on se smanjuje. Ulančeni se rasipni magnetski tok glava namota povećava, i to uglavnom zbog porasta prekrivanja četkica. Dakle, ukupni se rasipni induktivitet povećava.

Iz provedene kvalitativne analize očito je da se rasipni induktivitet na dijelu utora, za opći slučaj namota armature pri raznim vrijednostima u, ε i β, može prikazati kao rasipni induktivitet jednostavnog namota s $u = 1$, $\varepsilon = 0$ i $\beta = 1$ pomnožen nekim koeficijentom ulančenja. Taj koeficijent [L37] označava se oznakom $\frac{\rho}{4}$, pa se izrazi (7) i (8) mogu jednostavno pomnožiti njime. Kad promatramo jednu stranu svitka u komutaciji, koeficijent ulančenja $\rho = \mathrm{f}\ (u,\ \varepsilon,\ \beta)$ uzima u obzir međuinduktivno djelovanje ostalih strana svitaka koje istodobno komutiraju. On je omjer ulančenoga rasipnog magnetskog toka promatrane strane svitka u komutaciji (na utorskom dijelu) namota s konkretnim vrijednostima u, β, i ε prema ulančenome rasipnom toku namota s $u = 1$, $\beta = 1$ i $\varepsilon = 0$. U skladu s prethodnim tumačenjem, koeficijent se ulančenja ρ povećava s porastom u i β, a smanjuje se s porastom ε. Rasipni induktivitet glava namota za opći slučaj namota armature pri raznim vrijednostima u, ε i β, mijenja se linearno proporcionalno prekrivanju četkica β i promjeni geometrijskih veličina glave namota ovisno o izvedbi namota.

Prije napisani izrazi (7), (8) i (9) za rasipni induktivitet utora, glave zuba i glave namota pri namotu s $u = 1$, $\beta = 1$, $\varepsilon = 0$, za opći slučaj namota s raznim vrijednostima u, ε i β, prelaze u:

$$L_{\mathrm{u}} = \mu_0 w_{\mathrm{s}}^2 l_{\dot{\mathrm{z}}} \rho \lambda_{\mathrm{u}} 10^{-3}\ [\mathrm{H}] \tag{10}$$

$$L_{\mathrm{gz}} = \mu_0 w_{\mathrm{s}}^2 l_{\dot{\mathrm{z}}} \rho \lambda_{\mathrm{gz}} 10^{-3}\ [\mathrm{H}] \tag{11}$$

$$L_{\mathrm{g}} = \mu_0 w_{\mathrm{s}}^2 2 \beta l_{\mathrm{g}} \lambda_{\mathrm{gnk}} 10^{-3}\ [\mathrm{H}]. \tag{12}$$

Pri pravocrtnoj komutaciji, uz trajanje komutacije $T_{\mathrm{k}} = \frac{b_{\check{\mathrm{c}}\mathrm{i}}}{v_{\mathrm{k}}}$, promjena struje u jedinici vremena iznosit će:

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = -\frac{I_{\mathrm{a}}}{a}\frac{V_{\mathrm{k}}}{b_{\check{\mathrm{c}}\mathrm{i}}} = -\frac{I_{\mathrm{a}} D_{\mathrm{k}} \pi n}{60 a b_{\check{\mathrm{c}}\mathrm{i}}}\ [\mathrm{As}^{-1}]. \tag{13}$$

Uvrstimo li izraze od (10) do (13) u jednadžbu (4), nakon sređivanja dobivamo opći izraz za napon samoindukcije strane svitka u komutaciji:

$$e_{\mathrm{ssr}} = 0{,}658\ \frac{I_{\mathrm{a}} D_{\mathrm{k}}}{a b_{\check{\mathrm{c}}\mathrm{i}}}\ n w_{\mathrm{s}}^2 [\rho l_{\dot{\mathrm{z}}} (\lambda_{\mathrm{u}} + \lambda_{\mathrm{gz}}) + 2\beta l_{\mathrm{g}} \lambda_{\mathrm{gnk}}] 10^{-10}\ [\mathrm{V}]. \tag{14}$$

U izrazu (14) s a je označen broj pari paralelnih grana armaturnog namota, D_{k} je promjer klizne plohe kolektora, n je brzina vrtnje, a ρ označava koeficijent ulančenja $\rho = \mathrm{f}(u,\ \beta,\ \varepsilon)$, koji se određuje prema izrazima (17), (18) i (22), ovisno o izvedbi namota armature.

Budući da koeficijent ulančenja ρ zastupa prosječni utjecaj svih strana svitaka koje istodobno komutiraju s promatranom stranom svitka u komutaciji, to je izračunata vrijednost napona samoindukcije prema izrazu (14) srednja (vremenski prosječna) vrijednost.

Koeficijent ulančenja ρ za razne izvedbe namota armature, bez ulaženja u detalje, određuje se [L34, str. 477] na ovaj način:

a) Za obične (nestepeničaste) namote najprije se izračunavaju vrijednosti:

$$x_m = 1 + \frac{2}{\mu\beta} \sum_{n=1}^{+} (u - n)(\beta - n) \tag{15}$$

$$x'_m = \frac{2}{u\beta}\left\{u(\beta - \varepsilon)_+ + \sum_{n=1}^{+}(u - n)(\beta - |\varepsilon - n|) + \sum_{n=1}^{+}(u - n)(\beta - \varepsilon - n)\right\}. \tag{16}$$

Oznake plus u indeksima i gornjim granicama suma izraza (15) i (16) znače da se uzimaju samo pozitivne vrijednosti.

Za *dijametralan namot* ($\varepsilon = 0$) koeficijent ulančenja bit će:

$$\rho = 4x_m\,[1]. \tag{17}$$

Za *skraćeni ili produženi namot* ($\varepsilon \neq 0$) koeficijent ulančenja iznosi:

$$\rho = \frac{x_m(\lambda_g + \lambda_d) + x'_m\lambda_m}{\lambda_u}\,[1]. \tag{18}$$

b) Za stepeničaste namote najprije se izračunavaju vrijednosti:

$$x_w = 1 + \frac{2}{u\beta}\left\{\sum_{n=1}^{+}(u_k - n)(\beta - n) + \sum_{n=1}^{+}(u_l - n)(\beta - n)\right\} \tag{19}$$

$$x_o = \frac{1}{u\beta}\left\{\sum_{n=1}^{u_l}\sum_{m=0}^{u_k - 1}(\beta - n - m)_+ + \sum_{n=1}^{u_k}\sum_{m=0}^{u_l - 1}(\beta - n - m)_+\right\} \tag{20}$$

$$\begin{aligned} x_g = \frac{2}{u\beta}\Bigg\{ & u_k \sum_{n=0}^{u_l}(\beta - |\varepsilon_k - n|)_+ + \sum_{n=1}^{+}(u_k - n)(\beta - \varepsilon_k - n) + \\ & + \sum_{n=1}^{+}(u_k - n)(\beta - |\varepsilon_k - u_l - n|) + u_l \sum_{n=0}^{u_k}(\beta - |\varepsilon_l - n|)_+ + \\ & + \sum_{n=1}^{+}(u_l - n)(\beta - |\varepsilon_l + n|) + \sum_{n=1}^{+}(u_l - n)(\beta - |\varepsilon_l - u_k - n|)\Bigg\}. \end{aligned} \tag{21}$$

U relacijama od (15) do (21) u_k je broj strana svitaka kraćeg a u_l dužeg koraka u jednom sloju utora dok su ε_k, ε_l skraćenja namota za kraći i duži svitak. Dalje, oznake plus u indeksima i gornjim granicama suma znače da se uzimaju samo oni članovi kojima su svi faktori pozitivni, dakle samo pozitivni član ako je to član sa samo jednim faktorom.

Za *stepeničasti namot* koeficijent će ulančenja biti:

$$\rho = \frac{(x_w + x_o)(\lambda_d + \lambda_g) + x_g\lambda_m}{\lambda_u}\,[1]. \tag{22}$$

Jedinične vodljive vrijednosti rasipanja gornjeg λ_g i donjeg λ_d sloja svitka, te međuinduktivne veze λ_m gornjeg i donjeg sloja svitaka namota armature, za primjere triju oblika utora koji se najčešće upotrebljavaju (prema sl. 2.) iznose:

1. za utor prema slici 2.a:

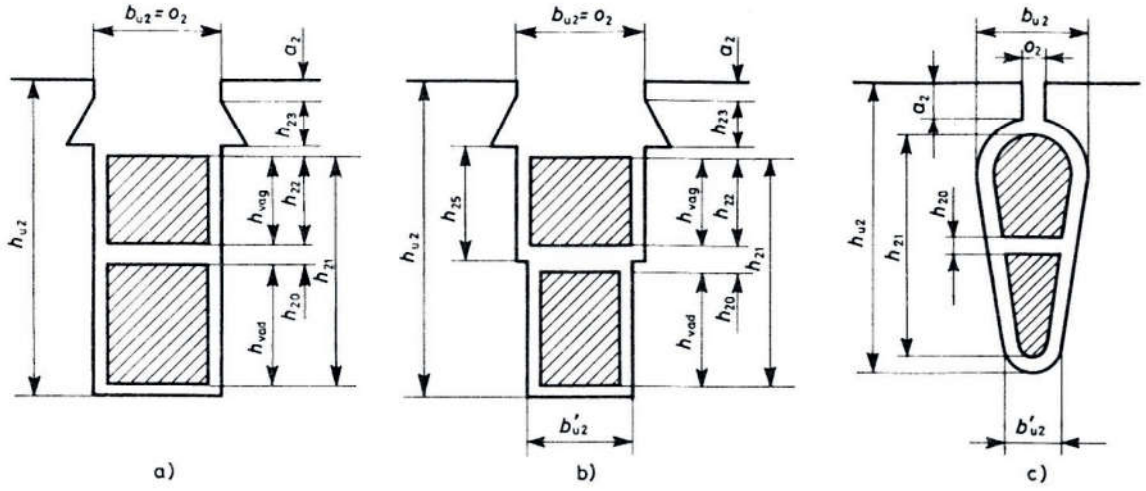
$$\left.\begin{aligned} \lambda_g &= \frac{h_{vag}}{3b_{u2}} + \frac{h_{22} + h_{23} + a_2}{b_{u2}}\,[1] \\ \lambda_d &= \frac{h_{vad}}{3b_{u2}} + \frac{h_{vag} + h_{20} + h_{22} + h_{23} + a_2}{b_{u2}}\,[1] \\ \lambda_m &= \frac{h_{vag} + h_{vad}}{4b_{u2}} + \frac{h_{22} + h_{23} + a_2}{b_{u2}}\,[1]; \end{aligned}\right\} \tag{23}$$

2. za utor prema slici 2.b:

$$\left.\begin{aligned} \lambda_g &= \frac{h_{vag}}{3b_{u2}} + \frac{h_{22} + h_{23} + a_2}{b_{u2}} \; [1] \\ \lambda_d &= \frac{h_{vad}}{3b'_{u2}} + \frac{h_{vag} + h_{20} + h_{22} + h_{23} + a_2}{b_{u2}} \; [1] \\ \lambda_m &= \frac{h_{vad}}{4b'_{u2}} + \frac{h_{vag}}{4b_{u2}} + \frac{h_{22} + h_{23} + a_2}{b_{u2}} \; [1]; \end{aligned}\right\} \quad (24)$$

3. za utor prema slici 2.c:

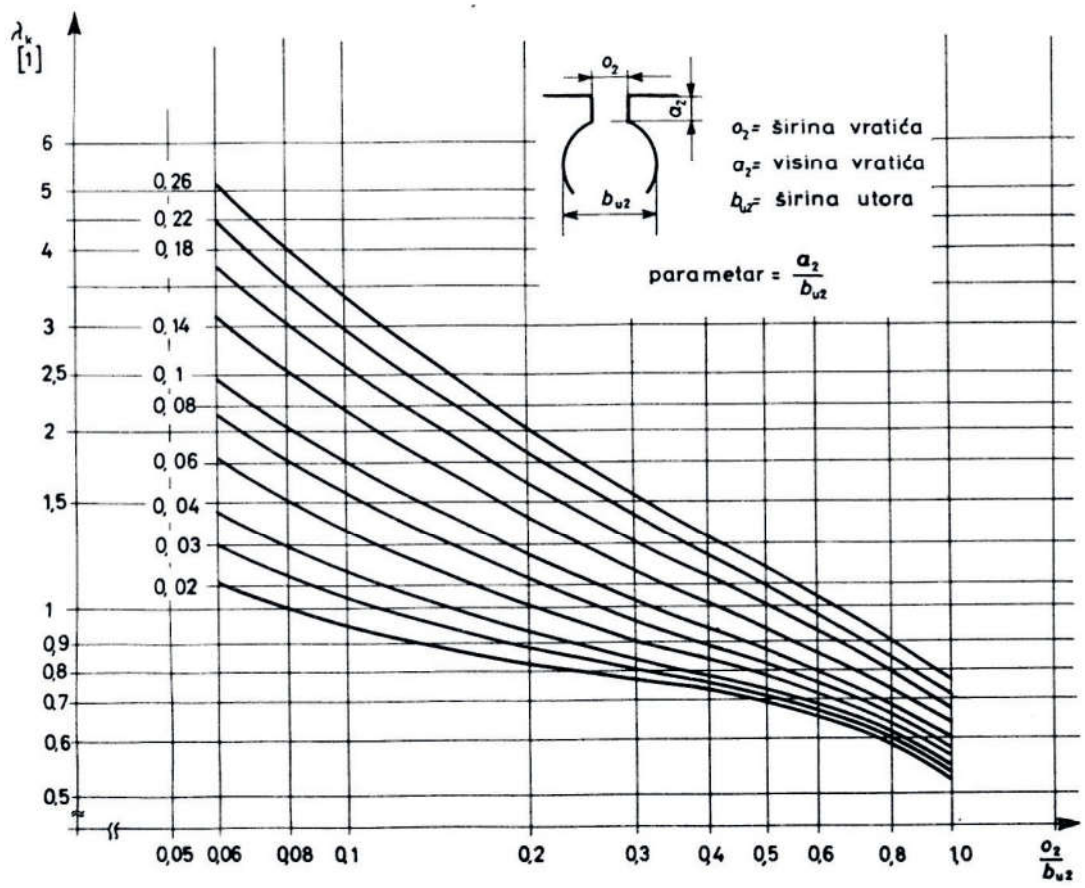
$$\left.\begin{aligned} \lambda_g &= \frac{h_{21}}{6b_{u2}} - \frac{h_{20}}{3b_{u2}} + \lambda_k \; [1] \\ \lambda_d &= \frac{h_{21}}{3(b_{u2} + b'_{u2})} + \frac{2h_{20}}{b_{u2} + b'_{u2}} + \frac{h_{21} - h_{20}}{2b_{u2}} + \lambda_k \; [1] \\ \lambda_m &= \frac{h_{21} - h_{20}}{4b_{u2}} + \lambda_k \; [1]. \end{aligned}\right\} \quad (25)$$



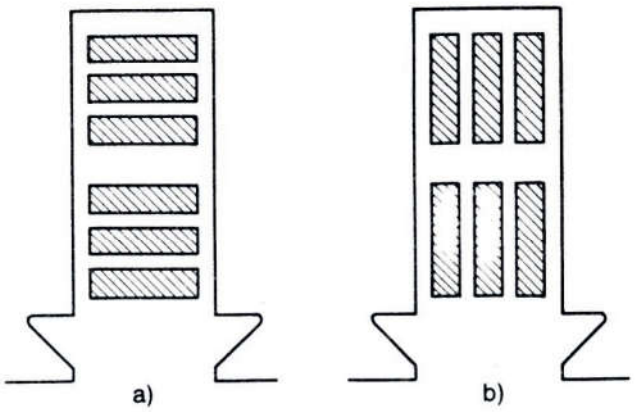
Sl. 2. Oblik utora armature

Pribrojnik λ_k u izrazima (25) jedinična je vodljiva vrijednost rasipanja vrha utora, a vrijednosti $\lambda_k = f(o_2, a_2, b_{u2})$ prikazane su na slici 3.

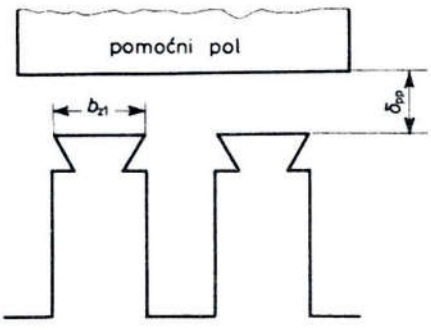
Jedinične vodljive vrijednosti rasipanja utora prema izrazima od (23) do (25) vrijede za izvedbe vodiča namota armature kojima je dopustivo zanemariti utjecaj vrtložnih struja na smanjenje rasipnoga magnetskog toka u utoru. Utjecaj se vrtložnih struja dade zanemariti pri okruglim vodičima koji se redovito ulažu u poluzatvorene utore (sl. 2.c) i profilnim vodičima koji su u utor položeni vodoravno, kao na slici 4.a. Pri vodičima vertikalno položenim u utoru (sl. 4.b), utjecaj se vrtložnih struja može zanemariti kad je svaki vodič izveden od izoliranih dionih vodiča s prepletom, a kod nižih frekvencija rotora i onda kad su oni samo od izoliranih dionih vodiča bez prepleta. Detaljnije tumačenje utjecaja vrtložnih struja u vodičima namota armature na komutaciju bit će dano naknadno.



Sl. 3. Jedinična vodljiva vrijednost rasipanja vrha utora λ_k



Sl. 4. Smještaj vodiča u utoru armature



Sl. 5. Tumačenje uz rasipni induktivitet glave zuba

Jedinična vodljiva vrijednost rasipanja glave zuba [L 14], uz oznake na slici 5, iznosi:

$$\lambda_{gz} = \frac{b_{z1}}{2\delta_{pp}} + 0{,}3 \ [1]. \tag{26}$$

pri čemu je b_{z1} širina zuba armature na vrhu, δ_{pp} zračni raspor pod sredinom pomoćnog pola.

Jedinična vodljiva vrijednost rasipanja glave namota, kad je bandaža glava namota od nemagnetskog materijala, bit će $\lambda_{gnk} \doteq 0{,}5$. Točnija vrijednost dobiva se [L 34, str. 494] prema izrazu:

$$\lambda_{gnk} = \sqrt{\frac{0{,}01\,u\,(l_g + \tau_p)}{0{,}5\,u\,(h_{21} - h_{20}) + \beta H'_m - \delta_g}} \tag{27}$$

pri čemu su H'_m širina svitka (u strana svitaka) u glavi namota, i δ_g razmak svitaka u glavi namota.

U odjeljku 4.4. određena je srednja vrijednost napona samoindukcije, prema izrazu (4.4–9), korištenjem koeficijenta proporcionalnosti samoinduktiviteta ξ, tj.:

$$e_{ssr} = 2w_s \xi v_a A l. \tag{4.4–9}$$

Pri tome smo vrijednost koeficijenta ξ mogli odabrati u relativno širokim granicama, pa su i srednje vrijednosti napona samoindukcije bile približne. U izrazu (14) uzeli smo u obzir više parametara koji utječu na komutaciju, zato smo točnije dobili srednju vrijednost napona samoindukcije. Točniju vrijednost (i fizikalno značenje) koeficijenta proporcionalnosti samoinduktiviteta ξ određujemo ako izjednačimo izraze za srednju vrijednost napona samoindukcije (4.4–9) i (14), tj.:

$$2w_s \xi v_a A l = 0{,}658\,\frac{I_a D_k}{a b_{či}}\, n w_s^2\,[\rho l_ž(\lambda_u + \lambda_{gz}) + 2\beta l_g \lambda_{gnk}] \cdot 10^{-10}.$$

Kad uvrstimo poznate izraze:

$$A = \frac{I_a w_a}{a D_a \pi}, \quad v_a = \frac{D_a \pi n}{60}, \quad \tau_k = \frac{D_k \pi}{k}, \quad \beta = \frac{b_{či}}{\tau_k},$$

te nakon matematičkog sređivanja i uređenja jedinica izlazi:

$$\xi = \frac{0{,}628}{\beta l}\left[\rho l_ž(\lambda_u + \lambda_{gz}) + 2\beta l_g \lambda_{gnk}\right] \cdot 10^{-6}\left[\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}\right]. \tag{28}$$

Dosadašnja razmatranja procesa komutacije provedena su uz pretpostavku pravocrtne komutacije. Upoznajmo se sada sa stvarnim stanjem promjene struje u stranama svitaka koji komutiraju. Na slici 6. predočeni su oscilogrami struje strana svitaka u komutaciji (I, II i III) koje pripadaju jednom utoru ($u = 3$). Pri tome se krivulje 1 odnose na potkomutaciju uz određeni stupanj iskrenja (kuglaste iskre na praktički svim četkicama), krivulje 2 na tamnu komutaciju (bez iskrenja), a krivulje 3 na natkomutaciju uz isti stupanj iskrenja kakav je pri potkomutaciji. Promjena slike komutacije od potkomutacije do natkomutacije provođena je oduzimajući i dodavajući struju namotu pomoćnih polova uz konstantnu struju armature. Na prikazanim oscilogramima strana svitka I prva ulazi u komutaciju, a strana svitka III posljednja izlazi iz komutacije.

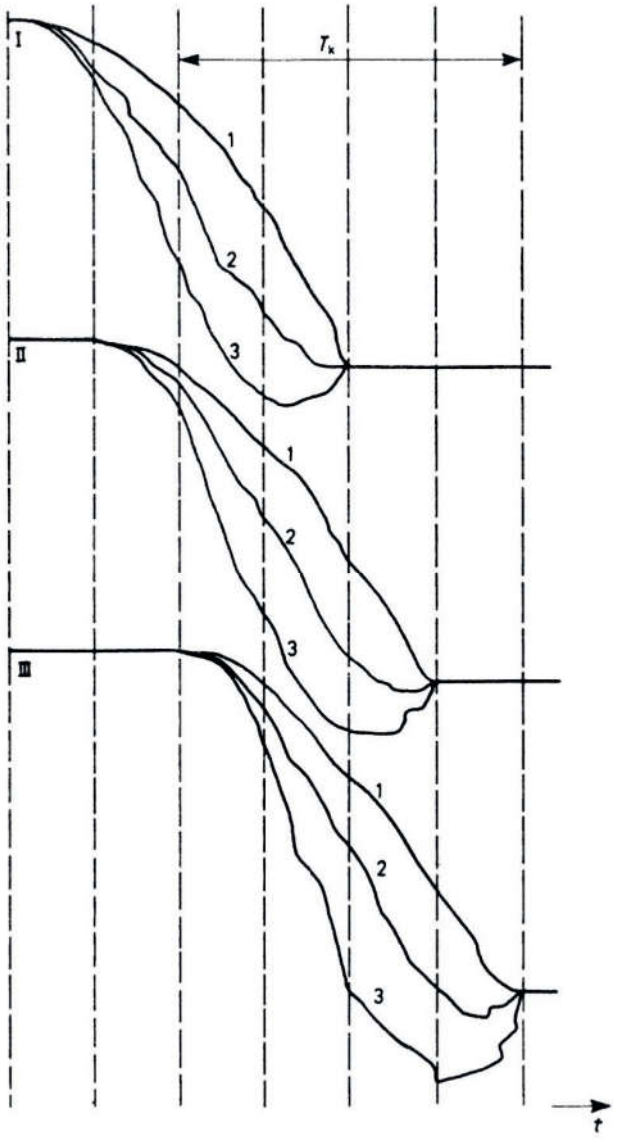
Iz snimljenih krivulja promjene struje u procesu komutacije uočavamo:

a) nagib krivulja promjene struje prilikom ulaska strana svitaka u komutaciju (gustoća struje na dolaznom bridu četkice) ne razlikuje se bitno u potkomutaciji i natkomutaciji, čime se objašnjava činjenica da redovito nema problema s iskrenjem na dolaznom bridu četkica;

b) stvarno vrijeme trajanja komutacije manje je od teorijskoga i iznosi 70–90 % vremena T_k, a to se tumači nesavršenim mehaničkim kontaktom između četkice i kolektora;

c) sve strane svitaka jednog utora nemaju jednaku promjenu struje u procesu komutacije, tj. nemaju istu sliku komutacije. Strana svitka u utoru koja posljednja napušta četkicu

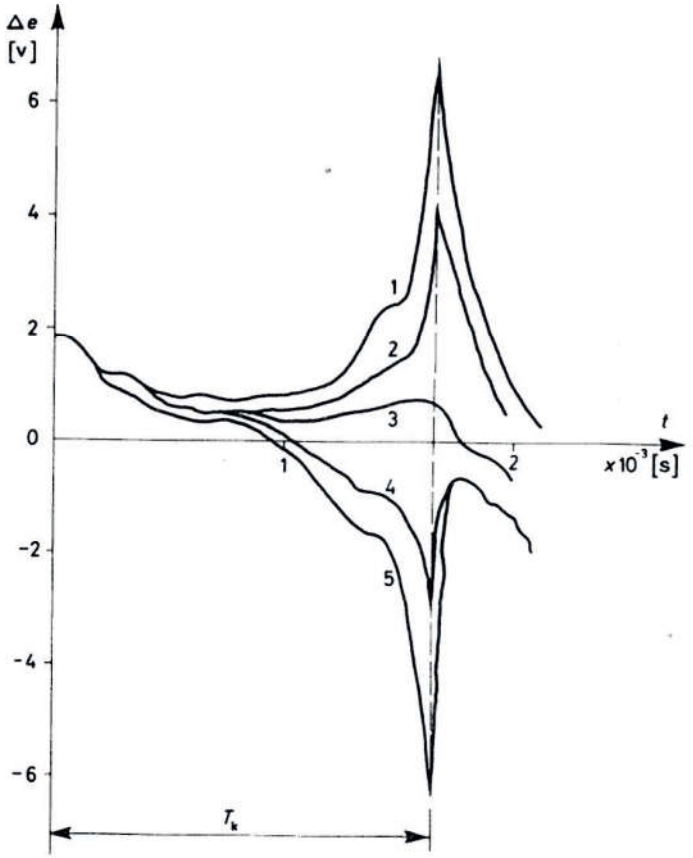
određuje ne samo karakter komutacije već i stupanj iskrenja (vizualnom ocjenom iskrenja, zbog akomodacije oka, ne razlikuju se strane svitka), jer posljednja strana svitka u utoru preko međuinduktivne veze prima na sebe svu energiju nedovršene komutacije drugih strana svitaka istog utora. Može se reći da optimalna komutacija nastaje pri uvjetima kad je brzina promjene ukupne struje utora (gornjeg i donjeg sloja) jednaka nuli neposredno prije isteka vremena komutacije posljednje strane svitka, a vrijednost struje posljednje strane svitka jednaka vrijednosti struje grane u koju treba ući ta strana svitka.



Sl. 6. Promjena struje u komutacijskom procesu

U odjeljku 4.4. razjašnjeno je da za optimalnu komutaciju mora srednja (vremenski prosječna) vrijednost napona e_{pp} induciranoga magnetskim tokom pomoćnih polova biti nešto veća od srednje (vremenski prosječne) vrijednosti napona samoindukcije e_{ssr}. Potrebno povećanje srednje vrijednosti napona e_{pp} prema e_{ssr} izračunat ćemo poznavajući trenutne odnose napona $e_{pp}(t)$ i $e_s(t)$. Trenutne vrijednosti odnosa napona $e_{pp}(t)$ i $e_s(t)$ strane svitka u komutaciji možemo odrediti snimanjem razlike napona e_{pp} i e_s prilikom

prolaska strane svitka kroz komutacijsku zonu. Na slici 7. [L 54] prikazane su krivulje $\Delta e = e_{pp} - e_s$ jedne strane svitka u utoru, i to one koja posljednja napušta četkicu. Pri tome krivulje 1 i 5 vrijede za natkomutaciju i potkomutaciju uz određeni stupanj iskrenja (kuglaste iskre na praktički svim četkicama), krivulje 2 i 4 za granični slučaj pri kojem prestaje tamna komutacija i krivulja 3 za optimalnu komutaciju.



Sl. 7. Razlika napona $e_{pp}-e_s$ strane svitka u komutaciji

Iz snimljenih krivulja napona Δe očito je da je u prvom dijelu trajanja komutacije vrijednost napona Δe pozitivna ($e_{pp} > e_s$) bez obzira na potkomutaciju ili natkomutaciju, a razlika se u potkomutaciji ($e_s > e_{pp}$) i natkomutaciji ($e_{pp} > e_s$) pojavljuje tek u drugoj polovici trajanja komutacije. Pri optimalnoj komutaciji vrijednost je napona Δe pozitivna ($e_{pp} > e_s$) u cijelom periodu trajanja komutacije.

Razni autori koji detaljnije razmatraju problematiku komutacije navode različite podatke odnosa napona e_{pp} i e_{ssr}. Tako [L 14] daje $e_{pp} = e_{ssr} + 0{,}5$ (V), [L 54] predlaže $e_{pp} = (1{,}15 \div 1{,}2)e_{ssr}$, [L 20] $e_{pp} = e_{ssr}$ i [L 34] $e_{pp} = e_{ssr}$. Provedena analiza ispitanih istosmjernih strojeva proizvodnje »Rade Končara« pokazuje da za većinu strojeva vrijedi odnos $e_{pp} = e_{ssr}$, a za neke bi moralo biti $e_{pp} = (1{,}1 \div 1{,}25)e_{ssr}$ ovisno o konstrukcijskoj izvedbi magnetskog kruga pomoćnih polova. Iz spomenutih razloga, za daljnja razmatranja magnetskog kruga pomoćnih polova pretpostavit ćemo da je napon $e_{pp} = e_{ssr}$.

Upoznajmo se sada detaljnije s utjecajem vrtložnih struja u vodičima namota armature na proces komutacije. Zbog vremenske promjene struje za trajanja komutacije, u vodičima armaturnog namota nastaju vrtložne struje kojima se smanjuje rasipni magnetski tok utora, a time i ukupni ulančeni rasipni magnetski tok strana svitaka u komutaciji, iz čega dalje izlazi smanjenje napona samoindukcije.

Prigušno djelovanje vrtložnih struja na rasipni magnetski tok utora proistječe iz razmatranja elektromagnetskog polja vodiča u utoru [L 34, str. 273] pretpostavivši beskonačnu permeabilnost željezne jezgre. To se djelovanje vrtložnih struja uzima u obzir korekcijom jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja utora. To, dakako, vrijedi samo na onom dijelu utora gdje su smješteni vodiči. Koeficijentom $\varphi(\xi')$ množe se članovi izraza (23) i (24) koji se odnose na samoinduktivitet uz prostorno promjenjivo protjecanje, a koeficijentom $\psi(\xi')$ članovi istih izraza koji se odnose na samoinduktivitet i međuinduktivitet s prostorno nepromjenjivim protjecanjem. To vrijedi za oblike utora na slikama 2.a i 2.b uz dvoslojni namot, vertikalni smještaj vodiča u utoru i puni (ne dioni) vodič. Dobivamo:

– za utor na slici 2.a

$$\left.\begin{aligned} \lambda_g &= \frac{h_{vag}}{3b_{u2}}\varphi(\xi') + \frac{h_{22}+h_{23}+a_2}{b_{u2}}\ [1] \\ \lambda_d &= \frac{h_{vad}}{3b_{u2}}\varphi(\xi') + \frac{h_{vag}}{b_{u2}}\psi(\xi') + \frac{h_{20}+h_{22}+h_{23}+a_2}{b_{u2}}\ [1] \\ \lambda_m &= \frac{h_{vag}+h_{vad}}{4b_{u2}}\psi(\xi') + \frac{h_{22}+h_{23}+a_2}{b_{u2}}\ [1]; \end{aligned}\right\} \quad (29)$$

– za utor na slici 2.b

$$\left.\begin{aligned} \lambda_g &= \frac{h_{vag}}{3b_{u2}}\varphi(\xi') + \frac{h_{22}+h_{23}+a_2}{b_{u2}}\ [1] \\ \lambda_d &= \frac{h_{vad}}{3b'_{u2}}\varphi(\xi') + \frac{h_{vag}}{b_{u2}}\psi(\xi') + \frac{h_{20}+h_{22}+h_{23}+a_2}{b_{u2}}\ [1] \\ \lambda_m &= \frac{h_{vad}}{4b'_{u2}}\psi(\xi') + \frac{h_{vag}}{4b_{u2}}\psi(\xi') + \frac{h_{22}+h_{23}+a_2}{b_{u2}}\ [1]. \end{aligned}\right\} \quad (30)$$

Pri tome su $\varphi(\xi')$, i $\psi(\xi')$ koeficijenti prigušenja ovisni o brojnoj visini vodiča [L 34]:

$$\left.\begin{aligned} \varphi(\xi') &= \frac{3}{2\xi'}\,\frac{\operatorname{sh}2\xi' - \sin 2\xi'}{\operatorname{ch}2\xi' - \cos 2\xi'}\ [1] \\ \psi(\xi') &= \frac{1}{\xi'}\,\frac{\operatorname{sh}\xi' + \sin\xi'}{\operatorname{ch}\xi' + \cos\xi'}\ [1], \end{aligned}\right\} \quad (31)$$

a ξ' je brojna visina vodiča [1], a iznosi:

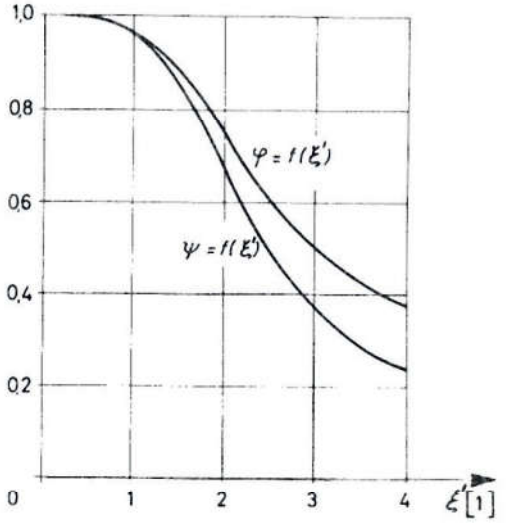
$$\xi' = \frac{h_v}{503}\sqrt{\frac{b_{Cu2}\,\varkappa_{h1} f_f}{b_{u2}}\,\frac{255}{235+\vartheta}}\ [1]. \quad (31.a)$$

Tu je h_v visina vodiča (ne dionih) odgovarajućeg sloja namota [mm], b_{Cu2} ukupna širina bakra vodičâ utora, a b_{u2} širina utora odgovarajućeg sloja namota [mm]. Dalje je $\varkappa_{h1}$ električka vodljivost vodiča pri 20°C $[\frac{Sm}{mm^2}]$, ϑ srednja temperatura vodiča u pogonski toplom stanju [°C] i f frekvencija u rotoru, tj.:

$$f = \frac{pn}{60}\ [Hz].$$

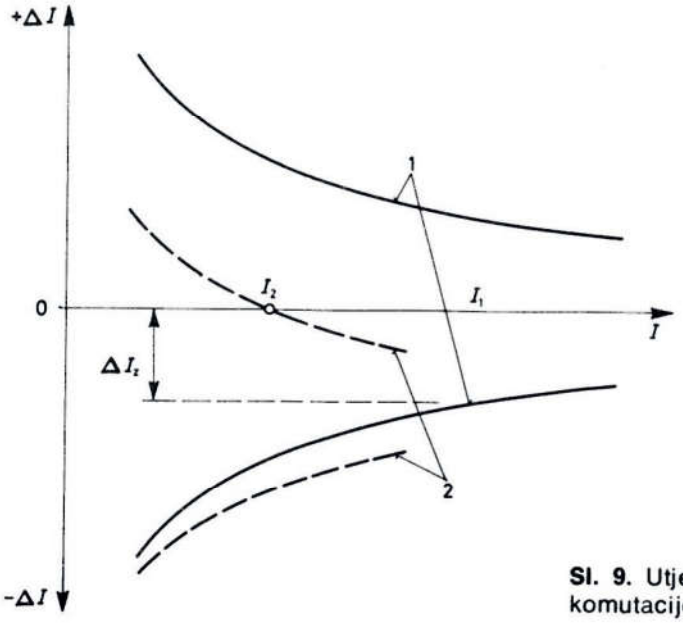
Vrijednost koeficijenta φ i ψ, ovisno o brojnoj visini vodiča prema izrazima (31), prikazuje slika 8.

Utjecaj vrtložnih struja na komutaciju posebno je zanimljiv u primjeru motora sa širim područjem podešavanja brzine vrtnje. S porastom brzine vrtnje povećava se vrijednost vremenske promjene struje svitka u komutaciji. Za trajanja komutacije razvijaju se zbog toga veće vrtložne struje u vodičima namota armature, smanjuje se rasipni magnetski tok utora, opada induktivitet utorskog dijela vodiča i posljedično se smanjuje napon samoindukcije. Smanjenje napona samoindukcije (u odnosu prema njegovu linearnom povećanju s porastom brzine vrtnje) uz istodobno linearno povećanje induciranog napona od magnetskog toka pomoćnih polova, dovodi do ubrzanja komutacije. Dakle, motor se s povećanjem brzine vrtnje ponaša kao da ima prejake pomoćne polove, a to, s jedne strane, znači pomak zone tamne komutacije, a, s druge strane, težnju prema nestabilnosti.



Sl. 8. Ovisnost $\varphi = f(\xi')$ i $\lambda = f(\xi')$

Na slici 9. predočene su zone tamne komutacije $\Delta I = f(I)$, pri čemu krivulje 1 vrijede za nižu, a krivulje 2 za višu brzinu vrtnje. Krivulje 2 imaju užu zonu tamne komutacije uz određenu vrijednost struje zbog porasta napona samoindukcije s rastom brzine vrtnje, i to je normalna pojava. Pomak krivulja 2 u odnosu prema osi apcisa uzrokovan je promjenom



Sl. 9. Utjecaj vrtložnih struja na zonu tamne komutacije

stupnja prigušnog djelovanja vrtložnih struja i znači manju dopuštenu struju zbog promjenjenih uvjeta komutacije pri povećanoj brzini vrtnje. Tako, na primjeru iz slike 9. uz tamnu komutaciju sa strujom I_1 pri nižoj brzini vrtnje, dopuštena struja, uz tamnu komutaciju, pri povećanoj brzini vrtnje iznosi I_2.

Pomak simetrale zone tamne komutacije ΔI_z (razlika struje armature i namota pomoćnih polova uz nepromijenjen zračni raspor magnetskog kruga pomoćnih polova) može se odrediti na ovaj način. Za neku struju armature I_a pri promjeni brzine vrtnje od n_1, na n_2, napon strane svitka u komutaciji induciran magnetskim tokom pomoćnih polova mijenja se proporcionalno brzini vrtnje $e_{pp2} = e_{pp1} \frac{n_2}{n_1}$, a napon se samoindukcije ne mijenja proporcionalno brzini vrtnje zbog različitog stupnja prigušnog djelovanja vrtložnih struja. Može se pisati jednadžba:

$$e_{s2} I_a = e_{pp2}(I_a + \Delta I_z).$$

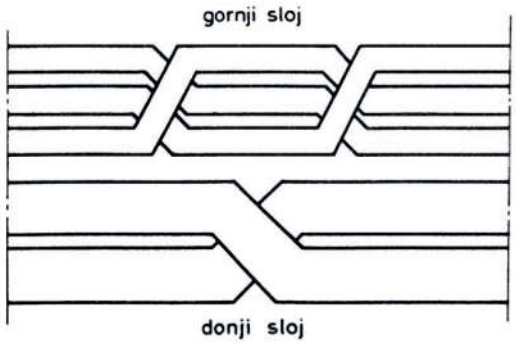
Uvedemo li izraze $e_{pp2} = e_{pp1} \frac{n_2}{n_1}$ i $e_{pp1} = e_{s1}$, te nakon sređivanja, dobivamo:

$$\Delta I_z = \left(\frac{e_{s2}}{e_{s1}\frac{n_2}{n_1}} - 1\right) I_a \quad [\mathrm{A}], \tag{32}$$

pri čemu su e_{s1} i e_{s2} naponi samoindukcije strane svitka u komutaciji pri brzinama vrtnje n_1 i n_2 [V].

Negativna vrijednost struje ΔI_z znači da su pri brzini vrtnje n_2 pomoćni polovi prejaki, tj. da motor ima natkomutaciju.

Poznavajući vrijednost struje ΔI_z može se odrediti najpovoljnija vrijednost zračnog raspora u magnetskom krugu pomoćnih polova za određenu izvedbu vodiča namota armature i za neko područje podešavanja brzine vrtnje.

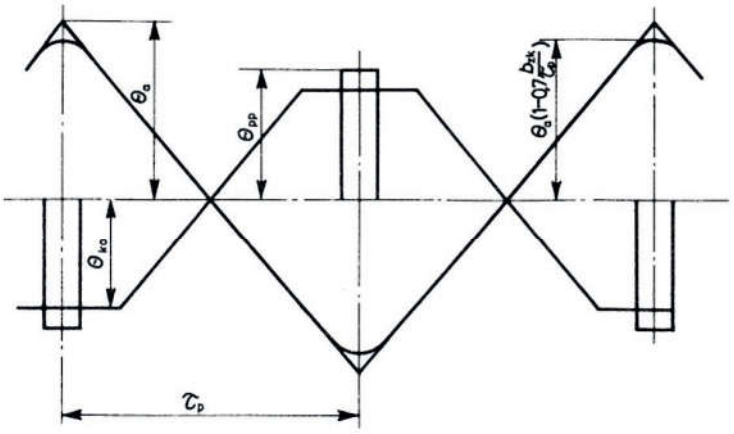


Sl. 10. Preplet dionih vodiča strane svitka

Da bi se ostvarile bolje komutacijske sposobnosti istosmjernog stroja koji radi u nekom području brzina vrtnje, koristi se horizontalno položenim vodičima u utoru (sl. 4.a) ili posebnim izvedbama vertikalno položenih vodiča u utoru armature. Te posebne izvedbe se rade od izoliranih dionih vodiča bez prepleta (za niže frekvencije) ili od izoliranih dionih vodiča s prepletom (za više frekvencije). Na slici 10. prikazana je izvedba s prepletom u gornjem i donjem sloju, pri čemu je uvijek u gornjem sloju veći broj dionih vodiča s većim brojem prepleta, a sam broj prepleta raste s povećanjem frekvencije rotora.

4.5.2. Magnetski krug pomoćnih polova

Magnetski krug pomoćnih polova mora biti nezasićen u svakom režimu rada kako bi uvijek vladala proporcionalnost između napona samoindukcije i napona induciranoga magnetskim tokom pomoćnih polova. U nezasićenome magnetskom krugu dopustivo je zanemariti magnetski napon feromagnetskih dijelova kruga, pa rezultantno protjecanje praktički djeluje samo na svladavanje magnetskog napona zračnog raspora.



Sl. 11. Tumačenje protjecanja u poprečnoj osi stroja

Na slici 11. nalazimo protjecanja u osi pomoćnih polova (u poprečnoj osi stroja), pri čemu je Θ_{ko} protjecanje namota kompenzacije, Θ_{pp} je protjecanje namota pomoćnih polova i Θ_a protjecanje namota armature. Stvarno protjecanje namota armature u poprečnoj osi nešto je manje od iznosa Θ_a zbog promjene strujnog obloga u komutacijskoj zoni. Stvarno protjecanje namota armature u poprečnoj osi iznosi:

$$\Theta_a (1 - 0{,}7 \frac{b_{zk}}{\tau_p}). \tag{33}$$

gdje je b_{zk} širina komutacijske zone, a τ_p polni korak.

Jednadžba protjecanja za poprečnu os stroja glasi:

$$\Theta_{ko} + \Theta_{pp} - \Theta_a (1 - 0{,}7 \frac{b_{zk}}{\tau_p}) = V_{\delta pp}, \tag{34}$$

pri čemu je s $V_{\delta pp}$ označen magnetski napon zračnog raspora pomoćnog pola. Uz:

$$\frac{\Theta_{ko} + \Theta_{pp}}{\Theta_a} - 1 + 0{,}7 \frac{b_{zk}}{\tau_p} = \vartheta'' \tag{35}$$

izraz (34) prelazi u:

$$\vartheta'' \Theta_a = V_{\delta pp}. \tag{36}$$

Magnetski napon zračnog raspora bit će:

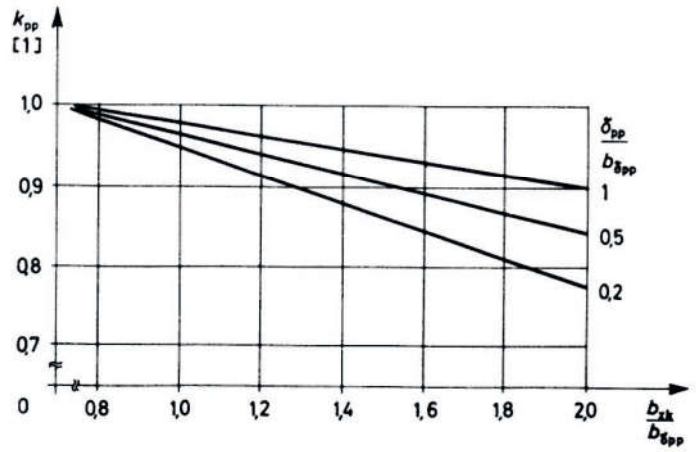
$$V_{\delta pp} = \frac{1}{\mu_0} B_{\delta ppm} \delta_{pp} k_{c3} 10^{-3} \text{ [A po polu]}, \tag{37}$$

pri čemu su $B_{\delta ppm}$ indukcija zračnog raspora pomoćnog pola u osi pola [T], k_{c3} Carterov koeficijent pod pomoćnim polom [1] i δ_{pp} zračni raspor pomoćnog pola u osi pola [mm].

Srednja (vremenski prosječna) vrijednost napona induciranoga magnetskim tokom pomoćnih polova iznosi

$$e_{pp} = 2B_{\delta ppm} l_{pp} v_a w_s k_{pp} 10^{-3} \text{ [V]}, \tag{38}$$

gdje l_{pp} označuje dužinu jezgre pomoćnog pola [mm], v_a obodnu brzinu armature [ms^{-1}], a k_{pp} je omjer srednje (vremenski prosječne) vrijednosti indukcije u zračnom rasporu pomoćnog pola na širini komutacijske zone prema vrijednosti indukcije u osi pola. Približne vrijednosti omjera [L 14, str. 137] $k_{pp} = f(\frac{b_{pp}}{b_{\delta pp}}; \frac{b_{zk}}{b_{\delta pp}})$ prikazane su na slici 12. Te su



Sl. 12. Ovisnost $k_{pp} = f(\frac{\delta_{pp}}{b_{\delta pp}}; \frac{b_{zk}}{b_{\delta pp}})$

vrijednosti sa slike 12. približne jer ne uzimaju u obzir izvedbu namota armature (dijametralan, obični, stepeničasti, broj strana svitka u utoru, prekrivanje četkica i skraćenje namota). Točniji omjer srednje i maksimalne indukcije u zračnom rasporu pomoćnog pola dobivamo poznavajući prostornu raspodjelu napona samoindukcije e_s i napona e_{pp} induciranog djelovanjem magnetskog toka pomoćnih polova. Određivanje prostorne raspodjele napona e_s i e_{pp} bit će obrazloženo u odjeljku 4.5.3. Uz:

$$\Theta_a = \frac{I_a w_a}{4ap} \text{[A po polu]}, \quad v_a = \frac{D_a \pi n}{60} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right], \quad e_{pp} = e_{ssr} \text{[V]}$$

i uvrstimo li izraze (38) i (37) u (36), izlazi vrijednost zračnog raspora pomoćnog pola (u osi pola):

$$\delta_{pp} = \frac{3{,}28\, \vartheta'' I_a w_a D_a n w_s^2 l_{pp} k_{pp}}{e_{ssr}\, a p k_{c3}} \cdot 10^{-11} \text{[mm]}. \tag{39}$$

U tom je izrazu e_{ssr} srednja vrijednost napona samoindukcije [V], a k_{c3} Carterov koeficijent pod pomoćnim polom [1]. Oznaka ϑ' je relativni pretičak protjecanja namota pomoćnih polova i kompenzacije nad protjecanjem armature, korigiran promjenom protjecanja armature u komutacijskoj zoni [1], a određuje se prema izrazu (35), ili

$$\vartheta'' = 4ap \frac{w_k + w_{pp}}{w_a} + 0{,}7 \frac{b_{zk}}{\tau_p} - 1 \text{ [1]}.$$

Vrijednost zračnog raspora pomoćnog pola izražena jednadžbom (39) odnosi se na *nepodijeljeni zračni raspor*, tj. kad jezgra pomoćnog pola naliježe na jaram statora. Izračunatu vrijednost δ_{pp} prema izrazu (39) treba usporediti s u izrazu (26) pretpostavljenom vrijednosti δ_{pp} prilikom proračuna jedinične vodljive vrijednosti rasipanja glave zuba. Dopuštena razlika između pretpostavljene i izračunate vrijednosti δ_{pp} iznosi 2 %, a za veće razlike proračun valja ponoviti.

Srednju (vremenski prosječnu) vrijednost indukcije u zračnom rasporu pomoćnog pola dobivamo iz izraza (38):

$$B_{\delta pp} = \frac{0{,}15\, e_{pp}}{p\tau_p n w_s (l_{pp} + \delta_{pp})}\ 10^8\ [\mathrm{T}]. \tag{40}$$

Jezgrom pomoćnog pola prolazi magnetski tok zračnog raspora $\Phi_{\delta pp}$ i rasipni magnetski tok Φ_{spp}. Indukcija na vrhu jezgre (kod jarma) pomoćnog pola, pri nepodijeljenome zračnom rasporu, iznosi:

$$B_{pp} = \frac{\Phi_{\delta pp} + \Phi_{spp}}{S_{\check{z}pp}} = \frac{B_{\delta pp}(l_{pp} + \delta_{pp})\, b_{ipp} + \mu_o I_a w_{pp} \Lambda_{pp} \cdot 10^4}{l_{pp} b_{pp} k_{\check{z}}}\ [\mathrm{T}], \tag{41}$$

pri čemu je Λ_{pp} vodljiva vrijednost rasipanja pomoćnih polova, b_{pp} širina jezgre pomoćnog pola na vrhu, b_{ipp} idealna širina u zračnom rasporu pod pomoćnim polom, za koju se pretpostavlja da vodi magnetski tok, a iznosi približno $b_{ipp} = b_{\delta pp} + 2{,}5\delta_{pp}$ [mm]. Dalje, $k_{\check{z}}$ je koeficijent punjenja jezgre pomoćnog pola i w_{pp} je broj zavoja namota pomoćnog pola po polu.

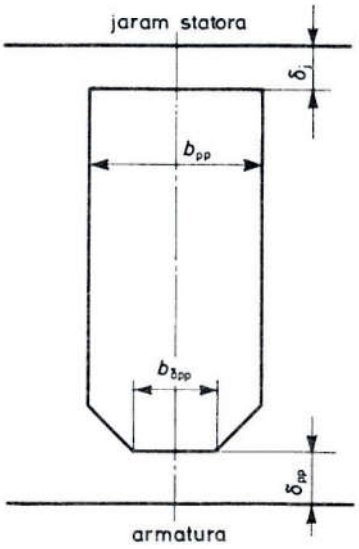
Iz prethodnih izlaganja je razumljivo da širina jezgre pomoćnog pola mora biti odabrana tako kako i kod preopterećenja stroja ne bi bilo magnetskog zasićenja jezgre.

Omjer magnetskog toka koji prolazi jezgrom pomoćnog pola i magnetskog toka zračnog raspora naziva se koeficijentom rasipanja pomoćnog pola i iznosi:

$$\sigma_{pp} = \frac{\Phi_{\delta pp} + \Phi_{spp}}{\Phi_{pp}} = \frac{B_{pp} l_{pp} b_{pp} k_{\check{z}}}{B_{\delta pp}(l_{pp} + \delta_{pp})\, b_{ipp}}\ [1]. \tag{42}$$

Koeficijent rasipanja pomoćnog pola σ_{pp} služi za ocjenu stanja magnetskog kruga pomoćnih polova, a možemo se njime poslužiti i da bismo približno izračunali širinu jezgre pomoćnog pola. Njegova vrijednost nalazi se u području 1,5÷3, a ovisi o izvedbi stroja (kompenzirani, nekompenzirani) i broju polova (međupolni prostor), te o smještaju namota pomoćnog pola (udaljenost od namota armature).

Na smanjenje rasipnoga magnetskog toka pomoćnih polova i na smanjenje magnetskog toka u jezgri pomoćnog pola može se utjecati izvedbom *podijeljenoga zračnog raspora* u magnetskom krugu pomoćnih polova. Prvi zračni raspor δ_{pp} nalazi se između jezgre pomoćnog pola i armature, a drugi zračni raspor δ_j između jezgre pomoćnog pola i jarma statora, kako je to prikazano na slici 13. Podjelom zračnog raspora na dva smanjuje



Sl. 13. Podijeljeni zračni raspor pomoćnog pola

se zračni raspor između jezgre pomoćnog pola i armature, a to ima za posljedicu porast jedinične vodljive vrijednosti rasipanja glave zuba, prema izrazu (26), i, dalje, povećanje srednje (vremenski prosječne) vrijednosti napona samoindukcije strane svitka u komutaciji. Iz izlaganja proistječe da koristeći se podijeljenim zračnim rasporom smanjujemo, s jedne strane, magnetski tok u jezgri pomoćnog pola, a s druge strane, povećamo napon samoindukcije. Može se zaključiti da podijeljeni zračni raspor ima smisla za one strojeve kojima bi nepodijeljeni zračni raspor bio suviše velik. Njegova podjela na dva dijela ne utječe bitno na porast napona samoindukcije, a smanjuje magnetski tok u jezgri pomoćnog pola. Tako se, uz istu širinu jezgre pomoćnog pola, omogućuje veća preopteretivost stroja, jer zasićenje magnetskog kruga pomoćnih polova nastaje kad su veće struje armature.

Pri izvedbi podijeljenoga zračnog raspora pomoćnog pola, prvi zračni raspor (uz armaturu) odabire se u području:

$$\delta_{pp} = (2 \div 3)\delta, \tag{43}$$

pri čemu je δ zračni raspor pod sredinom glavnog pola.

Približno određivanje drugoga zračnog raspora pomoćnog pola (kod jarma statora) provodi se ovom metodom. S odabranom vrijednosti prvoga zračnog raspora δ_{pp} izračunavamo vrijednost indukcije $B_{\delta ppm}$ u prvome zračnom rasporu pod sredinom pola (u osi pola) razmatrajući prostorne raspodjele napona e_s i e_{pp} na način prikazan u odjeljku 4.5.3.

Magnetski napon prvoga zračnog raspora bit će:

$$V_{\delta pp} = \frac{1}{\mu_o} B_{\delta ppm} \delta_{pp} k_{c3} 10^{-3} \text{ [A po polu]}. \tag{37}$$

Za magnetski krug pomoćnih polova, uz oznake protjecanja prema slici 11. i zanemarenje magnetskog napona feromagnetskih dijelova magnetskog kruga, vrijedi jednadžba protjecanja

$$\Theta_{ko} + \Theta_{pp} - \Theta_a\left(1 - 0{,}7\frac{b_{zk}}{\tau_p}\right) = V_{\delta pp} + V_{\delta j},$$

odakle dobivamo magnetski napon drugoga zračnog raspora:

$$V_{\delta j} = \Theta_{pp} - \left[V_{\delta pp} + \Theta_a\left(1 - 0{,}7\frac{b_{zk}}{\tau_p}\right) - \Theta_{ko}\right] \text{ [A po polu]}. \tag{44}$$

Iz magnetskog otpora drugoga zračnog raspora pomoćnog pola vrijedi jednadžba za magnetski napon:

$$V_{\delta j} = \frac{1}{\mu_o} B_{\delta j} \delta_j 10^{-3} = \frac{1}{\mu_o} B_{pp} \frac{b_{pp}}{b_{pp} + 2{,}5\delta_j} 10^{-3},$$

iz čega izlazi vrijednost drugoga zračnog raspora pomoćnog pola:

$$\delta_j = \frac{V_{\delta j} b_{pp}}{\frac{B_{pp} b_{pp}}{\mu_o} 10^{-3} - 2{,}5\ V_{\delta j}} \text{ [mm]}. \tag{45}$$

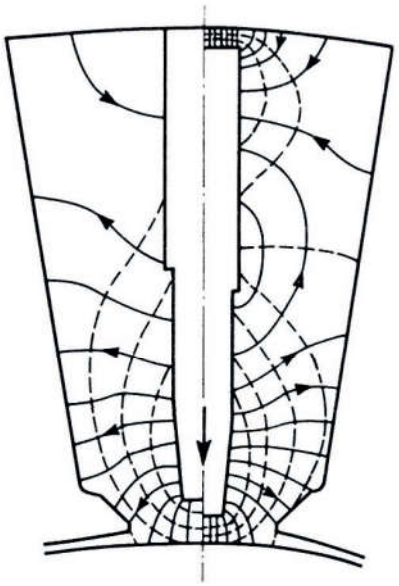
Pri tome je $V_{\delta j}$ magnetski napon drugoga zračnog raspora pomoćnog pola prema izrazu (44) [A po polu], b_{pp} širina jezgre pomoćnog pola kod drugoga zračnog raspora prema slici 13. i B_{pp} je indukcija u jezgri pomoćnog pola [T].

Pri podijeljenome zračnom rasporu B_{pp} iznosi:

$$B_{pp} = \frac{B_{\delta ppm}(l_{pp} + \delta_{pp})(b_{\delta pp} + 2{,}5\delta_{pp}) + \mu_0 \left[V_{\delta pp} + \Theta_a(1 - 0{,}7\frac{b_{zk}}{\tau_p}) - \Theta_{ko} \right] \Lambda_{pp} 10^4}{l_{pp} b_{pp} k_{\check{z}}} \text{ [T]}. \quad (46)$$

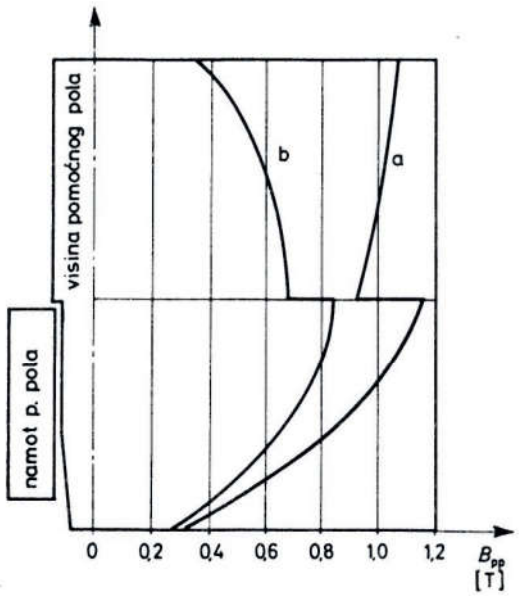
Drugi zračni raspor pomoćnog pola [L 14, str. 144] točnije se izračunava na osnovi poznavanja slike polja u međupolnom prostoru.

Na slici 14. prikazan je prostor između dva glavna pola istosmjernog stroja s ucrtanim magnetskim silnicama (pune linije) i magnetskim ekvipotencijalnim linijama (crtkane linije). Na lijevoj je polovici slike nepodijeljeni zračni raspor pomoćnog pola u iznosu od 28 mm. Na desnoj je polovici slike podijeljeni zračni raspor, i to uz armaturu iznosi 16 mm, a kod jarma statora 12 mm. To je slučaj kad je pomoćni pol samo translatiran za 12 mm od jarma statora u smjeru armature.



Sl. 14. Slika polja međupolnog prostora; lijeva strana – nepodijeljen, desna strana – podijeljen zračni raspor pomoćnih polova

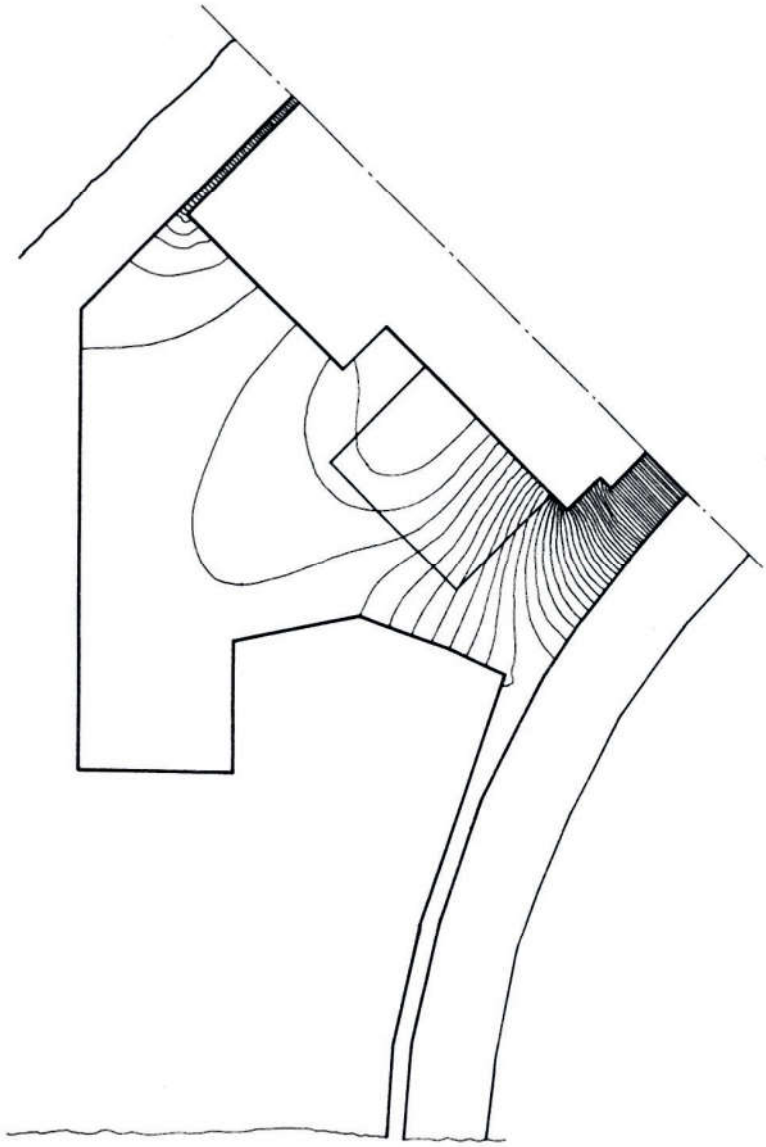
Na slici 15. predočena je raspodjela indukcije u jezgri pomoćnog pola po visini. Vidi se da pri nepodijeljenome zračnom rasporu pomoćnog pola indukcija po visini raste (bez obzira na promjenu presjeka jezgre), a pri podijeljenome zračnom rasporu ostvarujemo



Sl. 15. Raspodjela indukcije u jezgri po visini jezgre pomoćnog pola: a) nepodijeljen; b) podijeljen zračni raspor pomoćnog pola

manje vrijednosti indukcije u jezgri. Tako se maksimalna vrijednost indukcije postiže na dijelu jezgre gdje završava namot (gledano od armature prema jarmu statora). U prostoru iznad namota prema jarmu statora, indukcija se u jezgri smanjuje zbog paralelne vodljivosti drugoga zračnog raspora, što se vidi iz smjera magnetskih silnica na slici 14.

Osim određivanja raspodjele polja u međupolnom prostoru crtanjem silocijevi, na način opisan u [L 34], danas se to obavlja elektroničkim računalom. Na slici 16. nalazimo raspodjelu polja u međupolnom prostoru jednoga četveropolnog stroja dobivenu pomoću elektroničkog računala prema metodi koja se primjenjuje u »Radi Končaru«.

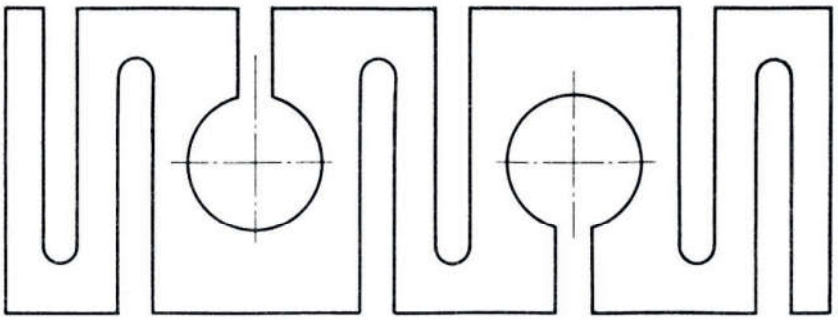


Sl. 16. Slika polja međupolnog prostora

I na kraju valja protumačiti kako se u gradnji izvodi zračni raspor pomoćnih polova. Prvi zračni raspor, između pomoćnog pola i armature, stvarno je zrak. Drugi zračni raspor, između pomoćnog pola i jarma statora, izvodi se pomoću podloga iz nemagnetskog materijala. Pri tome i vijci za učvršćivanje jezgre pola na jaram statora moraju biti od nemagnetskog materijala (redovito mjedi).

Prilikom izvedbe podijeljenoga zračnog raspora pomoćnog pola valja razlikovati kad nemagnetska podloga može biti od električki vodljivog materijala (npr. mjedi), a kad mora biti od električki nevodljivog materijala (npr. izolacije).

Za istosmjerne strojeve koji u radu nemaju brzih vremenskih promjena struje armature dopuštena je podloga od električki vodljivog materijala, pri čemu je poželjno da materijal ima malu električku vodljivost. Za podlogu će tad poslužiti mjed, i to lim za manje vrijednosti, a odljev za veće vrijednosti drugoga zračnog raspora.



Sl. 17. Oblik podloge za drugi zračni raspor pomoćnog pola

Za istosmjerne strojeve koji u radu imaju brze vremenske promjene struje armature podloga ne smije biti od električki vodljivog materijala. U takvoj bi podlozi nastale vrtložne struje, došlo bi do prigušenja i zaostajanja magnetskog toka pomoćnih polova za strujom i, dalje, do potkomutacije i iskrenja na četkicama. Zato se podloge u takvim okolnostima izvode od električki nevodljivog, tj. izolacijskog materijala. Budući da je cijena izolacijskog materijala velike mehaničke čvrstoće relativno visoka, česta je i u tom slučaju podloga od mjedi. Ona tad mora imati posebni oblik kako bi se smanjile vrtložne struje. Na slici 17. primjer je podloge posebna oblika, gdje se vrtložne struje smanjuju prorezima u konstrukciji.

4.5.3. Prostorna raspodjela napona e_s i e_{pp}

U dosadašnjem tumačenju elektromagnetskih pojmova u procesu komutacije upotrebljavali smo pojmove srednje (vremenski prosječne) vrijednosti napona samoindukcije e_{ssr} i napona e_{pp} induciranoga djelovanjem magnetskog toka pomoćnih polova. Za optimalnu komutaciju izvršili smo izjednačenje tih srednjih vrijednosti. No, izjednačenje srednje vrijednosti $e_{ssr} = e_{pp}$ još ne daje garanciju dobre komutacije. Za dobru komutaciju morao bi napon e_{pp} biti jednak naponu e_s u svakom trenutku, i tu se pojavljuje osnovni problem. U toku komutacije oblik se krivulje napona e_s skokovito mijenja (kad pojedine strane svitaka ulaze u komutaciju ili izlaze iz nje), a oblik se krivulje napona e_{pp} mijenja kontinuirano, pa nema mogućnosti potpune kompenzacije trenutne vrijednosti napona e_s naponom e_{pp}.

Oblik krivulje napona e_s ovisi o izvedbi namota (dijametralan, skraćen i stepeničast), broju strana svitaka, prekrivanju četkica, skraćenju namota, idealnoj širini četkice, omjeru promjera armature i kolektora te vrijednostima jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja u komutaciji. Oblik krivulje napona e_{pp} ovisi o izvedbi namota armature (položaj strane svitaka u kojima se inducira napon) i obliku polne papuče pomoćnog pola (raspodjela indukcije u zračnom rasporu).

Za što bolje izjednačenje trenutnih vrijednosti e_s i e_{pp} potrebno je da prostorna raspodjela napona e_{pp} bude takva kako bi između kontinuirane krivulje $e_{pp}(t)$ i skokovito promjenjive krivulje $e_s(t)$ bile što manje razlike, i to za svaku stranu svitka u komutaciji. Valja, dakle, odrediti prostornu raspodjelu napona samoindukcije e_s, a polnoj papuči pomoćnog pola dati takav oblik (radi raspodjele indukcije u zračnom rasporu) da uz zadani položaj strana svitaka inducirani napon $e_{pp}(t)$ odgovara prostornoj raspodjeli napona samoindukcije $e_s(t)$. Apsolutnu trenutnu vrijednost razlike napona strane svitka, koja proizlazi iz oblika krivulja $e_s(t)$ i $e_{pp}(t)$ za trajanja komutacije te strane svitka, nazivamo *nekompenzirani napon strane svitka*, a srednju vrijednost nekompenziranih napona svih u strana svitaka *nekompenziranim naponom svitka*.

Razmotrimo prostornu raspodjelu napona $e_s(t)$ i $e_{pp}(t)$, te određivanje srednjih (vremenski prosječnih) vrijednosti napona e_s i e_{pp} i nekompenziranih napona Δe_{pr}.

4.5.3.1. Prostorna raspodjela napona samoindukcije

Prostornu raspodjelu napona samoindukcije pronalazimo na osnovi prostorne raspodjele jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja, λ_g, λ_d, λ_m, λ_{gz} i λ_{gnk}. Pri tome su potrebne određene predradnje. Budući da se komutacija razmatra uz konstantnu brzinu vrtnje, možemo vremenske veličine zamijeniti geometrijskima po obodu armature, a one s kolektora reducirati na promjer armature. Tako korak lamele kolektora i idealna širina četkice, reducirane na promjer armature, iznose:

$$\tau'_k = \tau_k \frac{D_a}{D_k}, \quad b'_{či} = b_{či} \frac{D_a}{D_k}.$$

Pri postupku utvrđivanja trenutnih vrijednosti napona samoindukcije koristeći se jediničnim vodljivim vrijednostima rasipanja, moramo te jedinične vodljive vrijednosti svesti na jednu dužinu. Budući da se jedinične vodljive vrijednosti rasipanja λ_g, λ_d, λ_m i λ_{gz} odnose na dužinu paketa, a λ_{gnk} na dužinu glave namota, to ćemo λ_{gnk} svesti na dužinu paketa. Izraz (14) vrijedi i za trenutnu vrijednost napona samoindukcije ako koeficijent ulančenja ρ zamijenimo znakom suma, tj.:

$$e_{ssr} = 0{,}658 \frac{I_a D_k}{a b'_{či}} n w_s^2 l_ž [\Sigma(\lambda_u + \lambda_{gz}) + 2\beta \lambda_{gnk} \frac{l_g}{l_ž}] 10^{-10} \text{ [V]}, \tag{47}$$

pri čemu je član $2\beta\lambda_{gnk}\frac{l_g}{l_ž}$ nadomjesna jedinična vodljiva vrijednost rasipanja glave namota.

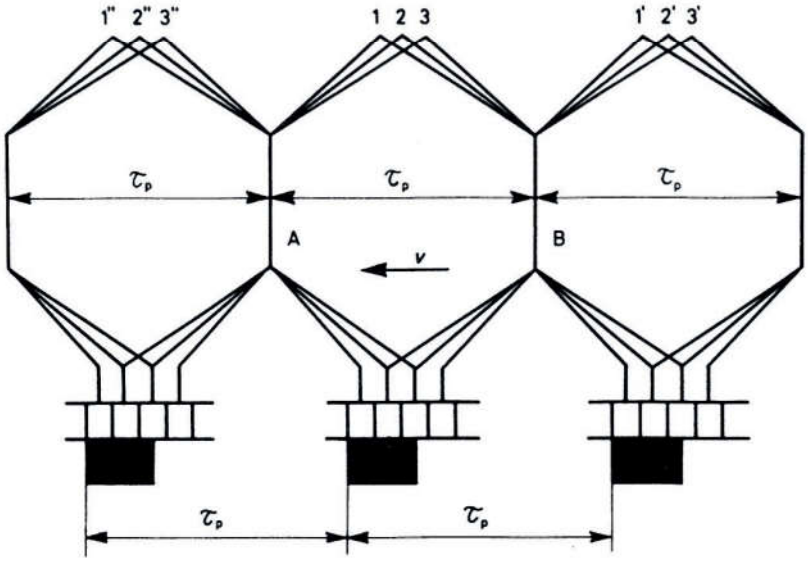
Za određenu izvedbu namota, ovisno o smještaju strana svitka u određene utore, crtamo pojedine jedinične vodljive vrijednosti rasipanja za trajanja komutacije svake strane svitka onim redoslijedom kako te strane svitaka ulaze u komutaciju. Sumiranjem prostorno raspodijeljenih jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja – članovi u uglatoj zagradi izraza (47), zasebno za svaku stranu svitka u trajanju komutacije (ili na idealnoj širini četkice reducirane na promjer armature), dobivamo prostornu raspodjelu ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja promatrane strane svitka. Iz izraza (47) vidi se da prostorna raspodjela ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja u mjerilu:

$$M_j = 0{,}658 \frac{I_a D_k}{a b_{či}} n w_s^2 l_ž 10^{-10} \left[\frac{\text{V}}{\text{mm}}\right] \tag{48}$$

predočava trenutne vrijednosti napona samoindukcije e_s.

Obrazložimo detaljnije izračunavanje prostorne raspodjele napona samoindukcije za razne izvedbe namota armature (dijametralan, skraćeni i stepeničasti). Razmatranje ćemo provesti na jednovojnome petljastom namotu uz napomenu da za ostale vrste namota (jednovojni ili viševojni valoviti i viševojni petljasti) nema nikakve načelne razlike.

Slika 18. sadži dio *dijametralnog namota* s tri strane svitka u utoru ($u = 3$) uz prekrivanje četkica $\beta = 2{,}5$. Osnovna karakteristika dijametralnog namota je u tome što se strane svitaka koje istodobno komutiraju nalaze u istim utorima. Tako strane svitaka 1, 2 i 3, smještene u gornji sloj utora A i donji sloj utora B, komutiraju istodobno kad i strane svitaka 1'', 2'' i 3'', s lijeve, odnosno 1', 2' i 3', s desne strane namota. Na komutaciju strana svitaka 1, 2 i 3 (iz utorskog dijela) istodobno utječu samoinduktivitet tih strana svitaka te međuinduktivno djelovanje strana svitaka 1'', 2'' i 3'', iz donjeg sloja utora A, i strana svitaka 1', 2' i 3', iz gornjeg sloja utora B.



Sl. 18. Jednovojni petljasti namot s: $u = 3$, $\beta = 2{,}5$, $\varepsilon = 0$

Jedinična vodljiva vrijednost rasipanja svake strane svitka u utorskom dijelu (izražena u mm zbog mjerila prostorne raspodjele) iznosit će:

$$H = (\lambda_g + \lambda_{gz}) + (\lambda_g + \lambda_{gz}) + 2(\lambda_m + \lambda_{gz}) \text{ [mm]}. \tag{49}$$

Pri tome se vrijednosti u prvoj zagradi odnose na samoinduktivitet gornjeg vodiča u utoru A, u drugoj na samoinduktivitet donjeg vodiča iste strane svitka u utoru B, a u trećoj zagradi na međuinduktivno djelovanje u utoru A i B. Koristeći se jednadžbom (6) izraz (49) prelazi u:

$$H = 4(\lambda_u + \lambda_{gz}) \text{ [mm]}. \tag{50}$$

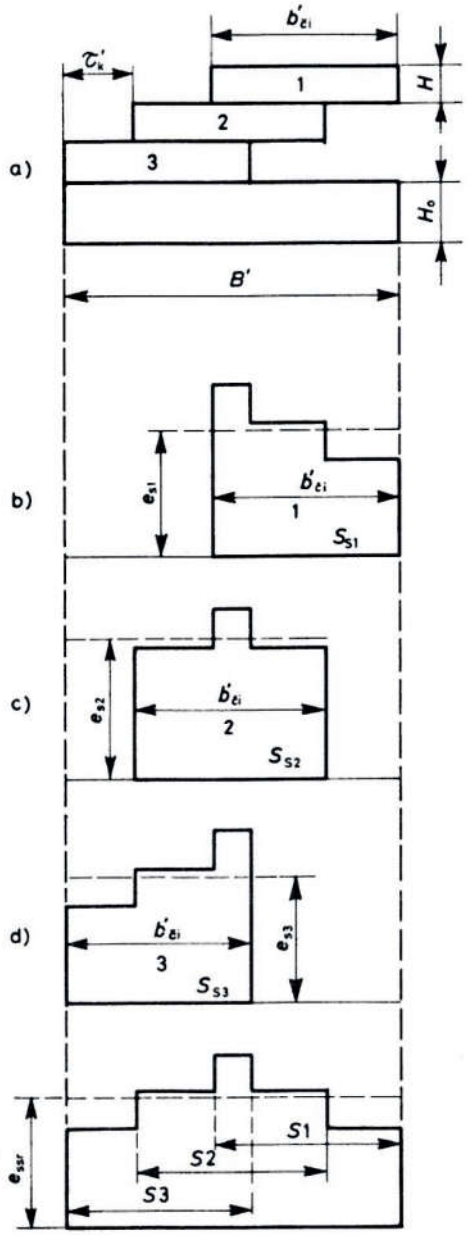
Nadomjesna jedinična vodljiva vrijednost rasipanja glava namota jednaka je za sve strane svitaka, a zbog zatvaranja rasipnoga magnetskog toka zrakom ona ne ovisi o smještaju vodiča u odgovarajuće utore. Nadomjesna jedinična vodljiva vrijednost rasipanja glava namota (izražena u mm zbog mjerila prostorne raspodjele) iznosi:

$$H_0 = 2\beta\lambda_{gnk}\frac{l_g}{l_ž} \text{ [mm]}. \tag{51}$$

Na slici 19.a prikazan je prostorni (vremenski) raspored jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja koje utječu na komutaciju. Strane svitaka 1, 2 i 3 ulaze u komutaciju s vremenskim pomakom koji odgovara geometrijskom pomaku τ'_k. Utjecaj samoinduktiviteta i međuinduktiviteta utorskog dijela strana svitaka možemo predočiti kao pravokutnike visine H prema izrazu (50) i širine $b'_{\check{c}i}$, međusobno pomaknute za τ'_k. Utjecaj samoinduktiviteta i međuinduktiviteta na dijelu glava namota za sve strane svitaka predočavamo kao pravokutnik visine H_o prema izrazu (51) i širine B'. Širina B' označava vrijeme (ili lučnu mjeru na armaturi) trajanja komutacije svih strana svitaka jednog utora, a iznosi:

$$B' = [b_{\check{c}i} + (u - 1)\,\tau_k]\,\frac{D_a}{D_k}\ \text{[mm]}. \tag{52}$$

Sumirajući prostorno raspodijeljene jedinične vodljive vrijednosti rasipanja svake strane svitka na širini $b'_{\check{c}i}$, koja odgovara trajanju komutacije strane svitka, dobivamo prostornu raspodjelu ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja svake strane svitka, kako je to prikazano na slikama 19.b, c i d.



Sl. 19. Prostorna raspodjela jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja za namot prema slici 18.

Iz prostorne raspodjele ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja pojedine strane svitka pronalazimo njezinu srednju vrijednost, koja pomnožena mjerilom M_j prema izrazu (48) daje srednju vrijednost napona samoindukcije promatrane strane svitka, tj.:

$$e_{sx} = \frac{S_{sx}}{b'_{či}} M_j \text{ [V]}, \tag{53}$$

pri čemu je S_{sx} površina prostorne raspodjele ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja x-te strane svitka na širini $b'_{či}$[mm²]. Tako uz oznake na slikama 19.b, 19.c i 19.d izlazi:

$$e_{s1} = \frac{S_{s1}}{b'_{či}} M_j, \quad e_{s2} = \frac{S_{s2}}{b'_{či}} M_j, \quad e_{s3} = \frac{S_{s3}}{b'_{či}} M_j \text{ [V]}.$$

Srednja (vremenski prosječna) vrijednost napona samoindukcije svih u strana svitaka nekog utora je srednja vrijednost srednjih vrijednosti napona samoindukcije svih u strana svitaka, a iznosi:

$$e_{ssr} = \frac{e_{s1} + e_{s2} + \ldots + e_{su}}{u} \text{ [V]}. \tag{54}$$

Time smo protumačili i fizikalno značenje prije često spominjane srednje (vremenski prosječne) vrijednosti napona samoindukcije. U našem primjeru srednja (vremenski prosječna) vrijednost napona samoindukcije e_{ssr} prikazana je na slici 19.e. Posebno valja napomenuti da njezina točna vrijednost izračunata prema izrazu (54) nije srednja vrijednost površine sa slike 19.e, već zbroj površina na slikama 19.b, c i d podijeljen brojem strana svitaka i pomnožen s $M_j/b'_{či}$.

Prostornim preklapanjem ukupnih jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja svih u strana svitaka jednog utora, kako je to prikazano na slici 19.e, dobivamo u mjerilu M_j prema izrazu (48) tzv. *prostornu raspodjelu napona samoindukcije*. Ta prostorna raspodjela poželjni je oblik napona e_{pp} induciranoga djelovanjem magnetskog toka pomoćnih polova, kako bi bila osigurana jednakost trenutnih vrijednosti e_s i e_{pp} svakoj strani svitka.

Iz prostorne raspodjele jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja u strana svitaka možemo naći vrijednost i upoznati se s fizikalnim značenjem koeficijenta ulančenja ρ, koji smo u izrazu (14) upotrijebili kako bismo odredili srednju (vremenski prosječnu) vrijednost napona samoindukcije. Srednja (vremenski prosječna) vrijednost ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja koja nastaje djelovanjem samoinduktiviteta i međuinduktiviteta utorskog dijela u strana svitaka, bit će:

$$\frac{S_{s1} + S_{s2} + \ldots + S_{su}}{ub'_{či}} - H_o$$

i prema izrazu (14) mora biti jednaka $\rho(\lambda_u + \lambda_{gz})$, tj.:

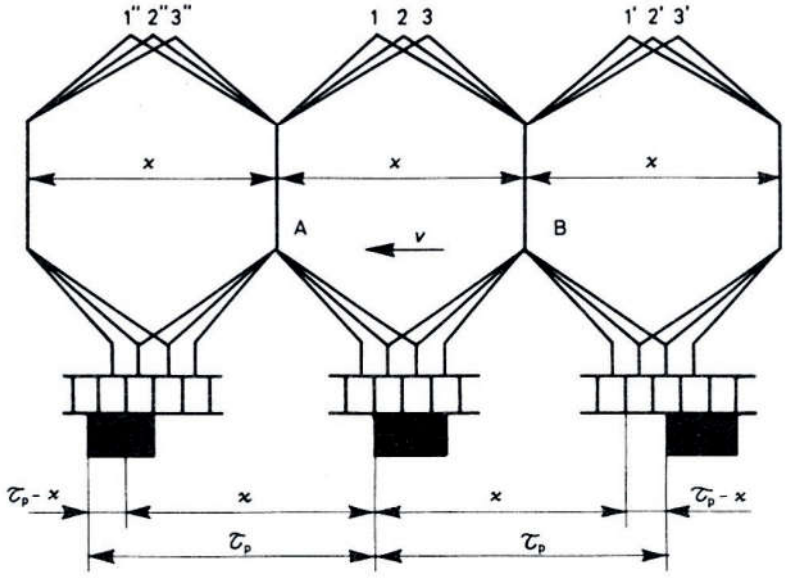
$$\frac{S_{s1} + S_{s2} + \ldots + S_{su}}{ub'_{či}} - H_o = \rho(\lambda_u + \lambda_{gz}). \tag{55}$$

Budući da je prema izrazu (50) $H = 4(\lambda_u + \lambda_{gz})$, dobivamo koeficijent ulančenja kod dijametralnog namota:

$$\rho = \frac{4}{H}\left(\frac{S_{s1} + S_{s2} + \ldots + S_{su}}{ub'_{či}} - H_o\right) \text{ [1]}. \tag{56}$$

Iz izraza (56) vidi se da koeficijent ulančenja ρ u osnovi predočava vremenski (zbog dijeljenja s $b'_{či}$) prosječno $\left(\frac{\Sigma S_{sx}}{u}\right)$ relativno (u odnosu prema H) povećanje jedinične vodljive vrijednosti rasipanja u utorskom dijelu zbog međuinduktivnog djelovanja strana svitaka koje istodobno komutiraju, a iz istog su utora.

Na slici 20. nalazimo dio *skraćenog namota* s tri strane svitka u utoru ($u = 3$) uz prekrivanje četkica $\beta = 2{,}5$ i skraćenje namota $\varepsilon = 1{,}5$. Osnovna karakteristika skraćenog namota je u tome što strane svitaka koje su u istim utorima ne komutiraju istodobno. Ako promatramo komutaciju strana svitaka 1, 2 i 3, smještenih u gornji sloj utora A i donji sloj utora B, vidimo da susjedne strane svitaka 1′, 2′ i 3′ komutiraju prije za $\varepsilon\tau'_k$, a strane svitaka 1″, 2″ i 3″ kasnije za $\varepsilon\tau'_k$. Na komutaciju strana svitaka 1, 2 i 3 (iz utorskog dijela) utječe samoinduktivitet tih strana svitaka, dok međuinduktivno djelovanje strana svitaka 1′, 2′ i 3′ iz gornjeg sloja utora B djeluje *ranije* za $\varepsilon\tau'_k$, a strana svitaka 1″, 2″ i 3″ iz donjeg sloja utora A *kasnije* za $\varepsilon\tau'_k$. Znači, treba razmatrati odvojeno utjecaj samoinduktiviteta i međuinduktiviteta na utorskom dijelu.



Sl. 20. Jednovojni petljasti namot s: $u = 3$, $\beta = 2{,}5$, $\varepsilon = 1{,}5$

Jedinična vodljiva vrijednost rasipanja svake strane svitka zbog samoinduktiviteta (u utorskom dijelu) iznosi:

$$H = (\lambda_g + \lambda_{gz}) + (\lambda_d + \lambda_{gz}) = \lambda_g + \lambda_d + 2\lambda_{gz} \text{ [mm]}. \tag{57}$$

Pri tome se vrijednosti u prvoj zagradi odnose na samoinduktivitet gornjeg vodiča u utoru A, a u drugoj zagradi na samoinduktivitet donjeg vodiča iste strane svitka u utoru B.

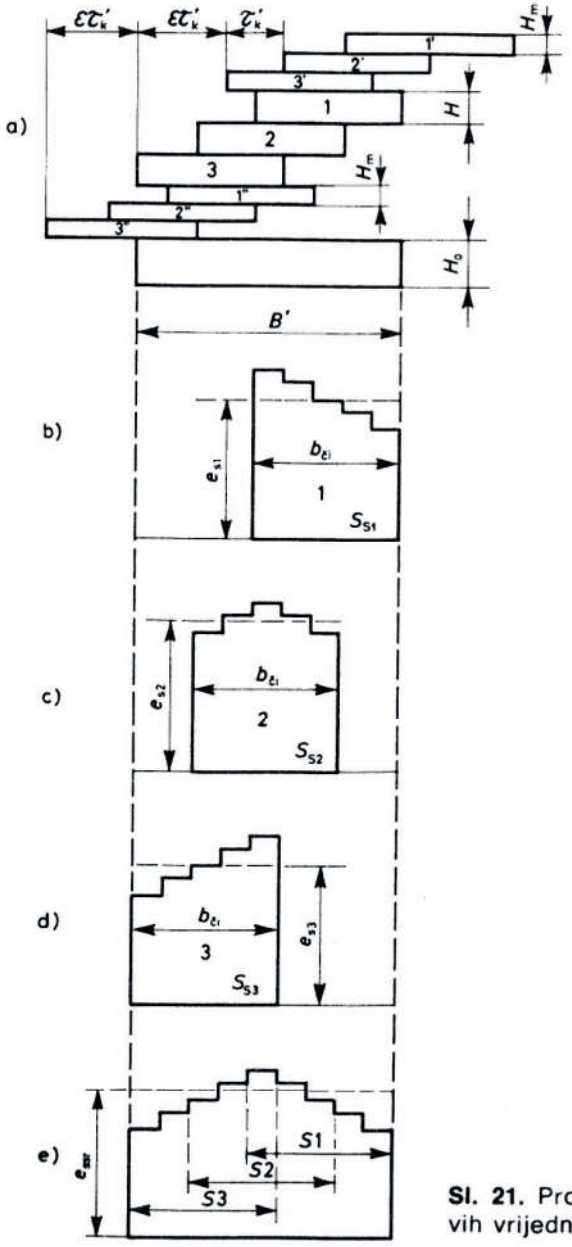
Jedinična vodljiva vrijednost rasipanja svake strane svitka zbog međuinduktiviteta (u utorskom dijelu) bit će:

$$H_m = \lambda_m + \lambda_{gz} \text{ [mm]}. \tag{58}$$

Nadomjesna jedinična vodljiva vrijednost rasipanja glava namota H_0 jednaka je za sve strane svitaka, a izračunava se prema izrazu (51).

Slika 21.a sadrži prostorni (vremenski) raspored jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja koje utječu na komutaciju. Utjecaj samoinduktiviteta utorskog dijela strana svitaka možemo predočiti kao pravokutnike visine H prema izrazu (57) i širine $b'_{ći}$, međusobno pomaknute za τ'_k. Utjecaj međuinduktiviteta utorskog dijela strana svitaka 1′, 2′ i 3′, te 1″, 2″ i 3″ možemo prikazati kao pravokutnike visine H_m prema izrazu (58) i širine $b'_{ći}$, međusobno pomaknute za τ'_k, a prema stranama svitaka 1, 2 i 3 pomaknute

za $\varepsilon\tau'_k$, i to za grupu strana svitaka 1′, 2′ i 3′ u smislu ranijega, a za grupu strana svitaka 1″, 2″ i 3″ u smislu kasnijeg ulaska u komutaciju. Utjecaj samoinduktiviteta i međuinduktiviteta na dijelu glava namota za sve strane svitaka predočit ćemo kao pravokutnik visine H_0 prema izrazu (51) i širine B' prema izrazu (52).



Sl. 21. Prostorna raspodjela jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja za namot po slici 20.

Prostornu raspodjelu ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja i srednju vrijednost napona samoindukcije svake strane svitka (sl. 21.b, 21.c i 21.d), te prostornu raspodjelu napona samoindukcije i srednju (vremenski prosječnu) vrijednost napona samoindukcije (sl. 21.e) odredit ćemo istim postupkom i istim izrazima kao za dijametralni namot.

Koeficijent ulančenja ρ dobivamo istim postupkom kao kod dijametralnog namota. Iz izraza (6), (57) i (58) za skraćene namote bit će:

$$H + 2H_m = 4(\lambda_u + \lambda_{gz}). \tag{59}$$

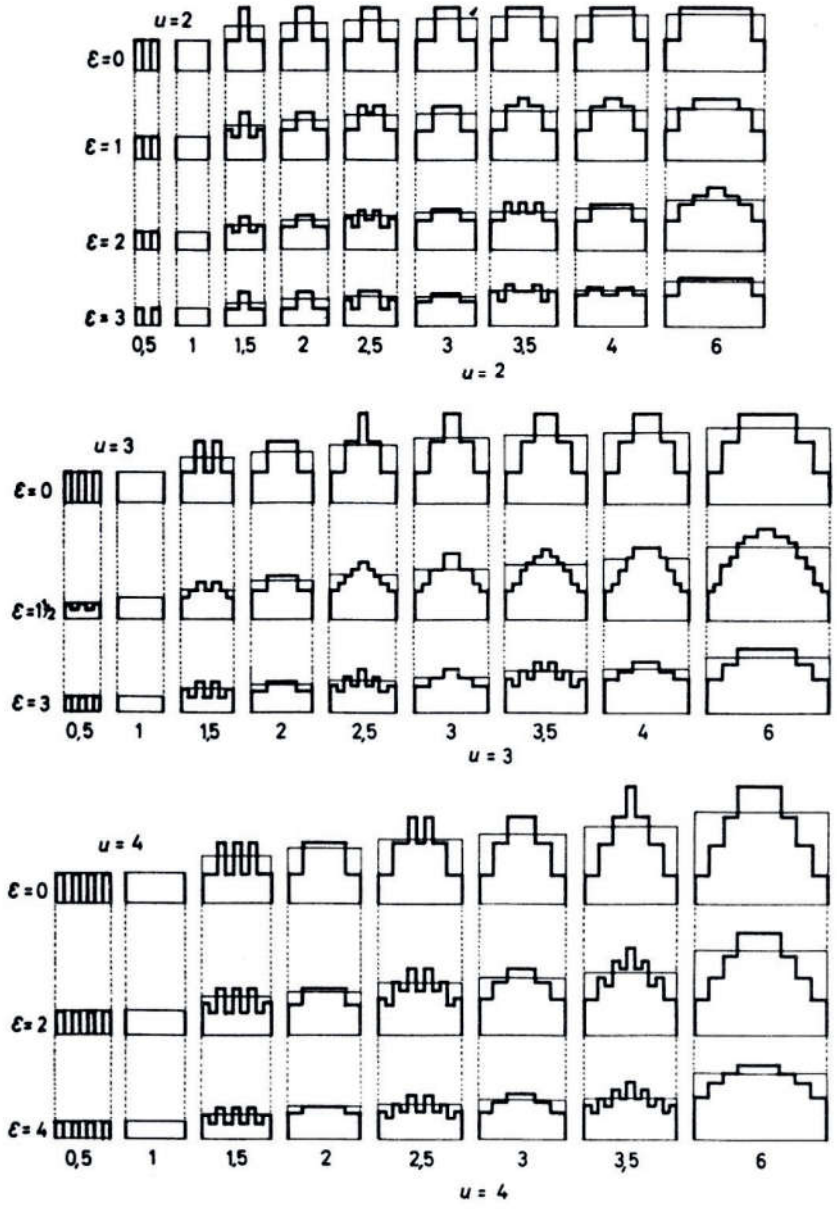
Uvrstivši izraz (59) u (55) dolazimo do koeficijenta ulančenja za skraćeni namot:

$$\rho = \frac{4}{H + 2H_m}\left(\frac{S_{s1} + S_{s2} + \ldots + S_{su}}{ub'_{či}} - H_o\right) [1]. \tag{60}$$

Skraćenom je namotu utjecaj međuinduktiviteta u utorskom dijelu manji (vidi H_m pomaknuto za $\varepsilon\tau'_k$ na slici 24.a), pa će uz jednake parametre namota koeficijent ulančenja ρ biti manji nego dijametralnom namotu.

Slika 22. prikazuje prostornu raspodjelu (deblje crte) i srednju (vremenski prosječnu) vrijednost napona samoindukcije (tanje crte) za razne vrijednosti u, β i ε (dijametralan i skraćeni namot) uz važnu pretpostavku $\lambda_m = 0{,}5(\lambda_g + \lambda_d)$.

Međusobnom usporedbom oblika prostorne raspodjele napona samoindukcije na slici 22. vidi se da razne izvedbe namota imaju više ili manje izražene skokovite promjene e_s (osim uz $\beta = 1$). Budući da napon samoindukcije e_s (t) mora biti što bolje kompenziran

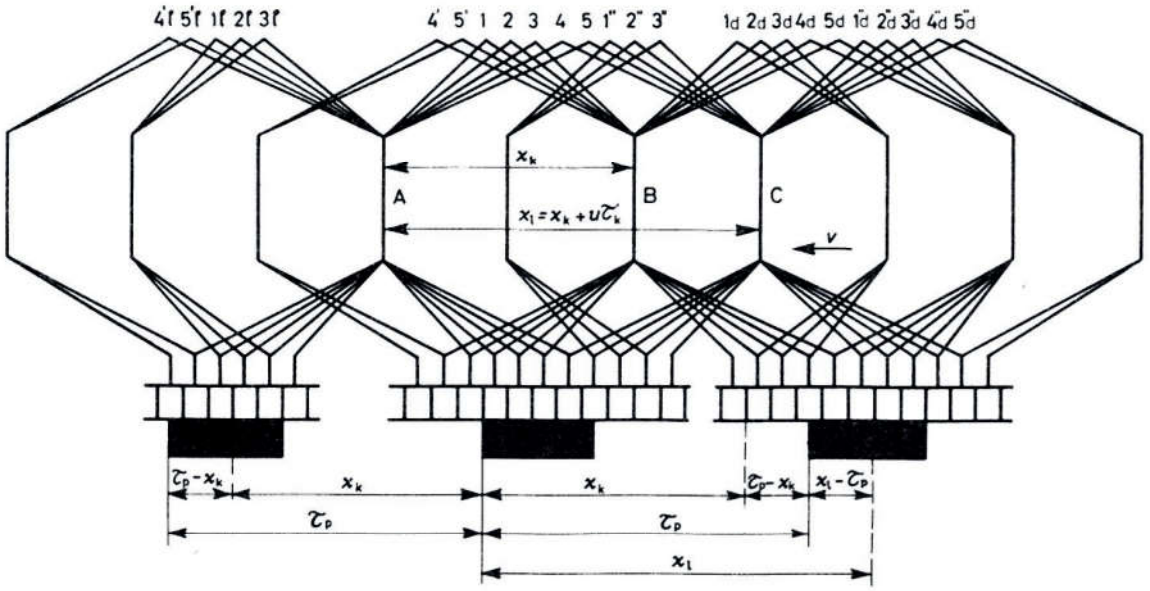


Sl. 22. Prostorna raspodjela napona samoindukcije za razne vrijednosti u, β i ε

naponom e_{pp} (t) induciranim djelovanjem magnetskog toka pomoćnog pola, a prostorna raspodjela e_{pp} (t) je kontinuirana krivulja, to skokovite promjene e_s (t) ne mogu biti kompenzirane. Zato pri izboru izvedbe namota valja izbjegavati one kombinacije u, β i ε koje daju posebno izražene skokovite promjene e_s (t) (npr. $u = 4$, $\beta = 1{,}5$ i $\varepsilon = 0$).

Usporedbom iznosa srednje vrijednosti napona samoindukcije e_{ssr} za razne vrijednosti ε uz iste vrijednosti u i β vidi se da s porastom vrijednosti ε napon samoindukcije opada. Zato se u izboru izvedbe namota izbjegava dijametralni namot. Sa slike 22. može se u principu vidjeti porast napona samoindukcije e_s s povećanjem broja strana svitaka u i prekrivanja četkica β. Napon samoindukcije u tom slučaju raste zbog povećanoga ulančenog rasipnog magnetskog toka strane svitka u komutaciji, kako je protumačeno u odjeljku 4.5.1.

Na slici 23. prikazan je dio *stepeničastog namota* s pet strana svitaka u utoru ($u = 5$) uz prekrivanje četkica $\beta = 4{,}3$ i skraćenja namota $\varepsilon_k = \varepsilon_l = 2{,}5$. Osnovna je karakteristika stepeničastog namota u tome što ima kraćih i dužih strana svitaka smještenih u razne utore, a strane svitaka koje su u istim utorima ne komutiraju istodobno. Strane svitaka od 1 do 5 smještene u gornji sloj utora A imaju tako odabran korak svitka da strane svitaka 1, 2 i 3 leže u donjem sloju utora B, a strane svitaka 4 i 5 u donjem sloju utora C. Budući da su strane svitaka uložene u razne utore, različiti su im ulančeni rasipni magnetski tokovi, pa komutaciju treba razmatrati odvojeno za kraće strane svitaka (1, 2 i 3) i za duže strane svitaka (4 i 5).



Sl. 23. Jednovojni petljasti stepeničasti namot s: $u_k = 3$, $u_l = 2$, $\varepsilon_k = \varepsilon_l = 2{,}5$, $\beta = 4{,}3$

Razmotrimo najprije komutaciju *kraćih strana svitaka*. Redoslijed ulaska pojedinih strana svitaka u komutaciju vidi se na slici 23, o čemu uvodno nije potrebno posebno tumačenje.

Jedinična vodljiva vrijednost rasipanja strana svitaka 1, 2 i 3 zbog samoinduktiviteta (u utorskom dijelu) iznosi:

$$H = (\lambda_g + \lambda_{gz}) + (\lambda_d + \lambda_{gz}) = \lambda_g + \lambda_d + 2\lambda_{gz} \text{ [mm]}. \tag{61}$$

Pri tome se vrijednosti u prvoj zagradi odnose na samoinduktivitet gornjeg vodiča u utoru A, a u drugoj zagradi na samoinduktivitet donjeg vodiča iste strane svitka u utoru B.

Jedinična vodljiva vrijednost rasipanja strana svitaka 4 i 5 u gornjem sloju utora A bit će zbog samoinduktiviteta u utorskom dijelu:

$$H_g = \lambda_g + \lambda_{gz} \text{ [mm]}, \tag{62}$$

a za strane svitaka 4′ i 5′ u donjem sloju utora B:

$$H_d = \lambda_d + \lambda_{gz} \text{ [mm]}. \tag{63}$$

Jedinična vodljiva vrijednost rasipanja strana svitaka od 1*d* do 5*d* u utoru B i 4′*l*, 5′*l*, 1*l*, 2*l* i 3*l* u utoru A zbog međuinduktiviteta (u utorskom dijelu) iznosit će:

$$H_m = \lambda_m + \lambda_{gz} \text{ [mm]}. \tag{64}$$

Nadomjesna jedinična vodljiva vrijednost rasipanja glava namota H_0 jednaka je za sve strane svitaka, a određena je izrazom (51).

Na slici 24.a prostorni (vremenski) je raspored jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja koje utječe na komutaciju. Utjecaj samoinduktiviteta utorskog dijela strana svitaka 4′ i 5′ predočit ćemo kao pravokutnike visine H_d prema izrazu (63) i širine $b'_{či}$, strana svitaka 1, 2 i 3 kao pravokutnike visine H prema izrazu (61) i širine $b'_{či}$, a strana svitaka 4 i 5 kao pravokutnike visine H_g prema izrazu (62) i širine $b'_{či}$, međusobno pomaknute za τ'_k, s redoslijedom ulaska u komutaciju 4′, 5′, 1, 2, 3, 4 i 5. Utjecaj međuinduktiviteta utorskog dijela strana svitaka od 1*d* do 5*d* predočit ćemo kao pravokutnike visine H_m prema izrazu (64) i širine $b'_{či}$, međusobno pomaknute za τ'_k, a prema stranama svitka od 1 do 5 za veličinu $\tau_p - x_k$ — ili iznos D prema izrazu (65), u smislu ranijeg ulaska u komutaciju. Utjecaj međuinduktiviteta utorskog dijela strana svitaka 4′*l*, 5′*l*, 1*l*, 2*l* i 3*l* možemo prikazati kao pravokutnike visine H_m prema izrazu (64) i širine $b'_{či}$, međusobno pomaknute za τ'_k, a prema stranama svitaka od 1 do 5 za iznos $\tau_p - x_k$ — ili iznos G prema izrazu (66) s obzirom na ordinatu kroz točku 0 prema slici 24.a, u smislu kasnijeg ulaska u komutaciju. Utjecaj samoinduktiviteta i međuinduktiviteta na dijelu glava namota predočavamo za sve strane svitaka kao pravokutnik visine H_o prema izrazu (51) i širine B' prema izrazu (52).

Pri *dužim stranama svitaka* redoslijed se ulaska u komutaciju pojedinih strana svitaka vidi na slici 23.

Jedinična vodljiva vrijednost rasipanja strana svitaka 4 i 5 zbog samoinduktiviteta (u utorskom dijelu) iznosi:

$$H = (\lambda_g + \lambda_{gz}) + (\lambda_d + \lambda_{gz}) = \lambda_g + \lambda_d + 2\lambda_{gz} \text{ [mm]}. \tag{61}$$

Pri tome se sad vrijednosti u prvoj zagradi odnose na gornji vodič u utoru A, a u drugoj zagradi na donji vodič u utoru C.

Jedinična vodljiva vrijednost rasipanja strana svitaka 1, 2 i 3 u gornjem sloju utora A bit će zbog samoinduktiviteta u utorskom dijelu:

$$H_g = \lambda_g + \lambda_{gz} \text{ [mm]}, \tag{62}$$

a za strane svitaka 1″, 2″ i 3″ u donjem sloju utora C:

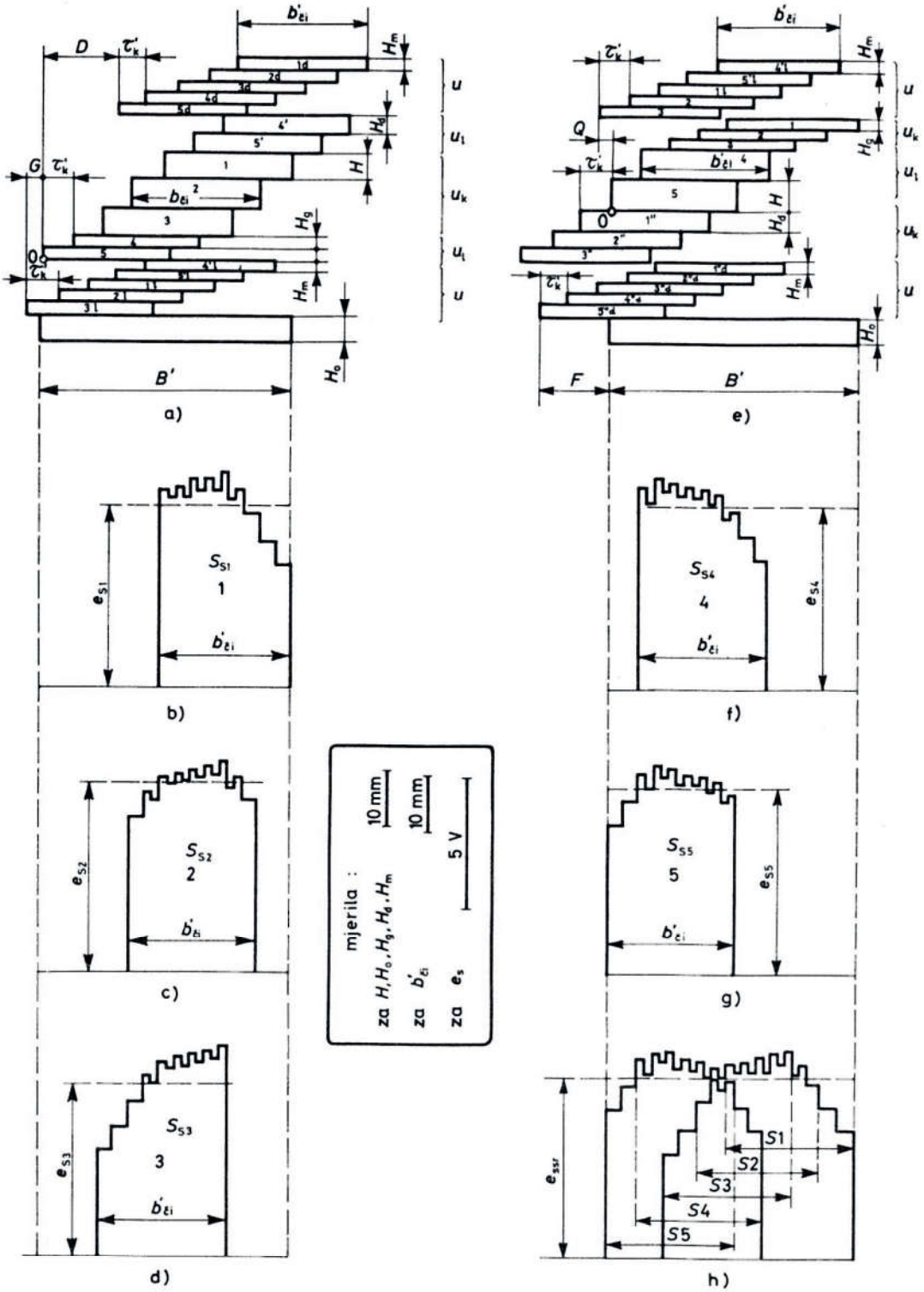
$$H_d = \lambda_d + \lambda_{gz} \text{ [mm]}. \tag{63}$$

Jedinična vodljiva vrijednost rasipanja strana svitaka 4′*l*, 5′*l*, 1*l*, 2*l* i 3*l* u utoru A i 1″*d* do 5″*d* u utoru C zbog međuinduktiviteta (u utorskom dijelu), iznosi:

$$H_m = \lambda_m + \lambda_{gz} \text{ [mm]}. \tag{64}$$

Nadomjesna jedinična vodljiva vrijednost rasipanja glava namota H_0 jednaka je za sve strane svitaka, a određena je izrazom (51).

Na slici 24.e nalazimo prostorni (vremenski) raspored jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja koje utječu na komutaciju. Utjecaj samoinduktiviteta utorskog dijela strana



Sl. 24. Prostorna raspodjela jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja za namot prema slici 23.

svitaka 1, 2 i 3 predočavamo kao pravokutnike visine H_g prema izrazu (62) i širine $b'_{\check{c}i}$, strana svitaka 4 i 5 kao pravokutnike visine H prema izrazu (61) i širine $b'_{\check{c}i}$, a strana svitaka 1'', 2'' i 3'' kao pravokutnike visine H_d prema izrazu (63) i širine $b'_{\check{c}i}$, međusobno pomaknute za τ'_k, s redoslijedom ulaska u komutaciju 1, 2, 3, 4, 5, 1'', 2'' i 3''. Utjecaj međuinduktiviteta utorskog dijela strana svitaka $4'l$, $5'l$, $1l$, $2l$ i $3l$ možemo prikazati kao pravokutnike visine H_m prema izrazu (64) i širine $b'_{\check{c}i}$, međusobno pomaknute za τ'_k, a prema stranama svitaka 4, 5, 1'', 2'' i 3'' za $x_1 - \tau_p$ — ili iznos Q prema izrazu (68) s obzirom na ordinatu kroz točku 0 prema slici 24.e, u smislu ranijeg ulaska u komutaciju. Utjecaj međuinduktiviteta utorskog dijela strana svitaka od $1''d$ do $5''d$ predočavamo kao pravokutnike visine H_m prema izrazu (64) i širine $b'_{\check{c}i}$, međusobno pomaknute za τ'_k, a prema stranama svitaka od 1 do 5 za $x_1 - \tau_p$ — ili iznos F prema izrazu (67) s obzirom na ordinatu kroz točku 0 na slici 24.e, u smislu kasnijeg ulaska u komutaciju. Utjecaj samoinduktiviteta i međuinduktiviteta na dijelu glava namota za sve strane svitaka prikazat ćemo kao pravokutnik visine H_0 prema izrazu (51) i širine B' prema izrazu (52).

Prostornu raspodjelu ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja i srednju vrijednost napona samoindukcije kraćih strana svitaka 1, 2 i 3 (sl. 24.b, c i d) i dužih strana svitaka 4 i 5 (sl. 24.f i g), te prostornu raspodjelu napona samoindukcije i srednju (vremenski prosječnu) vrijednost napona samoindukcije (sl. 24.h) možemo odrediti istim postupkom i istim izrazima kao za dijametralni namot.

Prije spomenute vrijednosti pomaka D, G, F i Q grupa strana svitaka na slici 24. iznose:

$$D = \tau_p - y_{1N}\tau'_k u \text{ [mm]}, \tag{65}$$

$$G = u_1\tau'_k - D \text{ [mm]}, \tag{66}$$

$$F = \tau_p - (y_{1N} + 1)\,\tau'_k u \text{ [mm]}, \tag{67}$$

$$Q = -F - u_k\tau'_k \text{ [mm]}. \tag{68}$$

Pri crtanju prostorne raspodjele potrebno je pozitivne vrijednosti D, G, F i Q nanijeti desno, odnosno negativne vrijednosti nalijevo od označene ordinate kroz točku 0.

Koeficijent ulančenja ρ odredit ćemo istim postupkom kao za dijametralni namot. Iz izraza (6), (61), i (64) za stepeničaste namote dobivamo:

$$H + 2H_m = 4(\lambda_u + \lambda_{gz}). \tag{59}$$

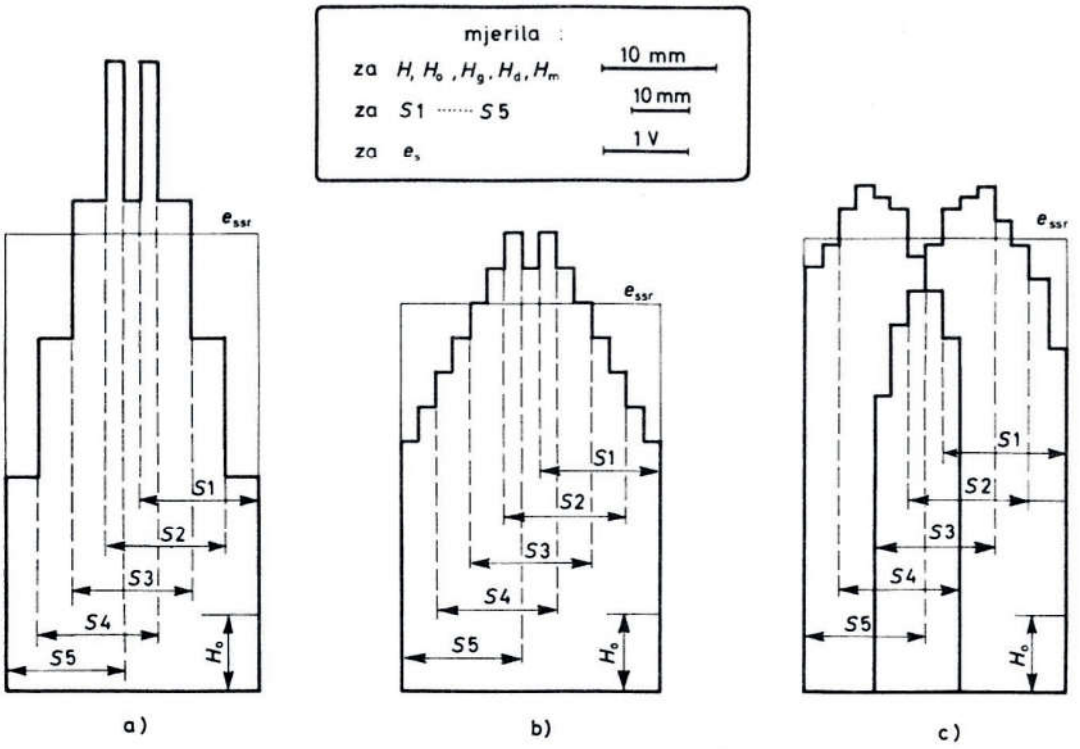
Uvrstimo li izraz (59) u (55), rezultat je koeficijent ulančenja za stepeničasti namot jednak kao za skraćeni namot, tj.:

$$\rho = \frac{4}{H + 2H_m}\left(\frac{S_{s1} + S_{s2} + \ldots + S_{su}}{ub'_{\check{c}i}} - H_0\right) [1]. \tag{60}$$

Iz izraza (60) vidi se da razlika u vrijednosti koeficijenta ulančenja stepeničastog i skraćenog namota nastaje samo iz razlike $\sum_{x=1}^{u} S_{sx}$.

Na slici 25. prikazana je prostorna raspodjela (deblje crte) i srednja (vremenski prosječna) vrijednost napona samoindukcije za dijametralni (sl. 25.a), skraćeni (sl 25.b) i stepeničasti (sl. 25.c) namot. Pri tome je za sve tri izvedbe namota uzeta jednaka širina četkice, jednak broj strana svitaka u utoru i jednaka srednja vrijednost jedinične vodljive vrijednosti rasipanja strane svitka u utoru λ_u, a za skraćeni namot još $\varepsilon = 2{,}5$ i za stepeničasti namot $u_k = 3$, $u_1 = 2$ i $\varepsilon_k = \varepsilon_1 = 2{,}5$.

Analiza oblika prostorne raspodjele i vrijednost srednjih (vremenski prosječnih) vrijednosti napona samoindukcije, za izvedbe namota prema slici 25. pokazuje: da srednja vrijednost napona samoindukcije e_{ssr} pri stepeničastom namotu nije mnogo manja od maksimalne vrijednosti; da koeficijent ulančenja ρ za stepeničasti namot ($\rho = 10{,}8$) nije mnogo manji u usporedbi s dijametralnim namotom ($\rho = 11{,}1$), ali je veći nego u skraćenom namotu ($\rho = 9$); da je razlika maksimalnih i minimalnih trenutnih vrijednosti napona e_s u obliku prostorne raspodjele za stepeničasti namot osjetno manja nego za dijametralni i skraćeni namot; da za stepeničasti namot ostvarujemo praktički jednaku širinu komutacijske zone kao pri dijametralnom namotu, ali znatno manju nego za skraćeni namot.



Sl. 25. Prostorna raspodjela napona samoindukcije: a) dijametralan: b) skraćeni; c) stepeničasti namot

Budući da u procesu komutacije nije problem ostvarivanja jednakosti srednjih (vremenski prosječnih) vrijednosti napona $e_{ssr} = e_{pp}$, već je problem prostorne kompenzacije $e_s(t) = e_{pp}(t)$, to zaključujemo iz provedenih izlaganja da je za komutaciju najpovoljniji stepeničasti namot, skraćeni je već nepovoljniji, a dijametralni je najnepovoljniji.

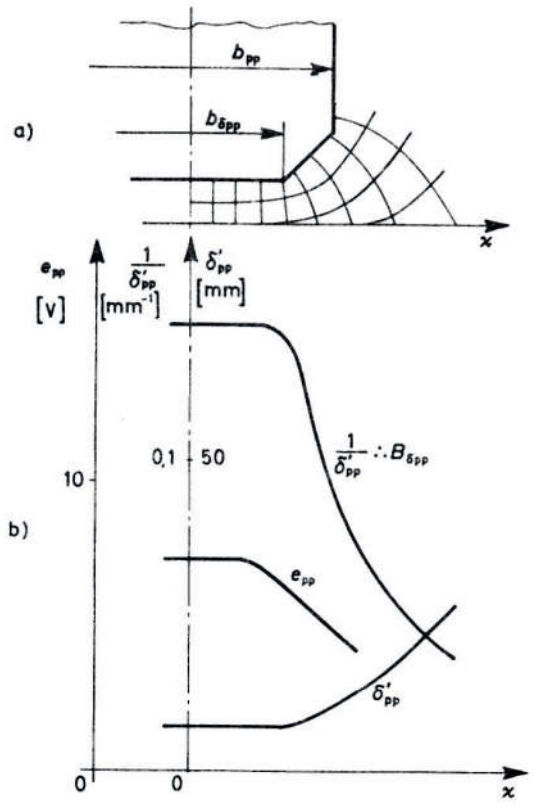
4.5.3.2. Prostorna raspodjela napona pomoćnog pola

Prostorna raspodjela napona e_{pp} induciranoga djelovanjem magnetskog toka pomoćnog pola dobiva se grafoanalitičkom metodom, a na osnovi prostorne raspodjele indukcije $B_{\delta pp}$ u zračnom rasporu pomoćnog pola, uzevši u obzir položaj strana svitaka (skraćenje ili produženje namota) prema polnom koraku.

Za pretpostavljeni oblik polne papuče pomoćnog pola i ekvivalentni zračni raspor pomoćnog pola:

$$\delta'_{pp} = \delta_{pp} k_{c3} \text{ [mm]}$$

crtamo prostornu raspodjelu magnetske vodljivosti zračnog raspora (silocijevi) kako je prikazano na slici 26.a, a zatim krivulje $\delta'_{pp}(x)$ i $\frac{1}{\delta'_{pp}}(x)$ (sl. 26.b). Za određivanje kuta nagiba silnica prema armaturi možemo pretpostaviti linearnu promjenu strujnog obloga u komutacijskoj zoni.



Sl. 26. Određivanje prostorne raspodjele napona pomoćnog pola

Indukcija u zračnom rasporu na mjestu x udaljenome od simetrale pomoćnog pola iznosi:

$$B_{\delta ppx} = \mu_0 V_{\delta pp} \frac{1}{\delta'_{ppx}} \cdot 10^3 \text{ [T]}. \tag{69}$$

pri čemu su $V_{\delta pp}$ magnetski napon prvoga zračnog raspora [A po polu], a δ'_{ppx} vrijednost zračnog raspora pomoćnog pola na proračunskom mjestu x po obodu armature [mm]. Krivulja $\frac{1}{\delta'_{pp}}$ sa slike 26.b u mjerilu izraza (69), tj.:

$$M_j = \mu_0 V_{\delta pp} \cdot 10^3 \left[\frac{\text{T}}{\text{mm}}\right], \tag{70}$$

predočuje prostornu raspodjelu indukcije u zračnom rasporu pomoćnog pola.

Prosječna vrijednost napona e_{pp} u strani svitka na mjestu x udaljenome od simetrale pomoćnog pola bit će zbog skraćene ili produžene strane svitka s obzirom na polni korak:

$$e_{ppx} = 5{,}23 D_a (l_{pp} + \delta_{pp}) n w_s (B_{\delta pp+} + B_{\delta pp-}) \, 10^{-8} \text{ [V]}. \tag{71}$$

Pri tome su $B_{\delta pp+}$ i $B_{\delta pp-}$ vrijednosti indukcija pod pomoćnim polom na mjestu udaljenome od simetrale pomoćnog pola za $\left(x + \frac{\varepsilon \tau'_k}{2}\right)$ i $\left(x - \frac{\varepsilon \tau'_k}{2}\right)$.

Prostorna raspodjela napona $e_{pp}(x)$ prikazana je na slici 26.b. Za stepeničasti namot koji ima kraće i duže strane svitaka, uz istu prostornu raspodjelu indukcije $B_{\delta pp}$ u zračnom rasporu pomoćnog pola, dobivamo zasebne krivulje $e_{pp}(x)$ za kraće i duže strane svitaka. Zato se pri stepeničastom namotu u izrazu (71) za vrijednost ε za kraće strane svitaka uzima ε_k, a za duže strane svitaka ε_l.

Oblik polne papuče pomoćnog pola mora biti odabran tako da oblik prostorne raspodjele napona e_{pp} induciranoga djelovanjem magnetskog toka pomoćnog pola, bude jednak obliku prostorne raspodjele napona samoindukcije e_s.

4.5.3.3. Nekompenzirani napon prostorne raspodjele

Srednja (vremenski prosječna) vrijednost nekompenziranog napona Δe_{pr} zbog prostorne raspodjele dobiva se na osnovi poznavanja prostorne raspodjele napona samoindukcije $e_s(t)$ svake strane svitka i prostorne raspodjele napona $e_{pp}(t)$ induciranoga djelovanjem magnetskog toka pomoćnog pola.

Na slici 27. nalazimo krivulje prostorne raspodjele napona samoindukcije $e_s(t)$ za svaku stranu svitka namota sa slike 24. i prostorne raspodjele napona $e_{pp}(t)$ za oblik polne papuče prema slici 26.b. Budući da je u primjeru namota sa slike 24. $\varepsilon_k = \varepsilon_l$, to za kraće i duže strane svitaka vrijedi ista krivulja napona $e_{pp}(t)$.

Srednja vrijednost nekompenziranog napona prostorne raspodjele neke strane svitka je srednja vrijednost apsolutnih trenutnih vrijednosti razlike $e_s(t)$ i $e_{pp}(t)$ na širini $b'_{či}$ (koja odgovara trajanju komutacije strane svitka uz konstantnu brzinu vrtnje) i iznosi

$$\Delta e_{prx} = \frac{\Delta S_{sx}}{b'_{či}} M_j \text{ [V]}. \tag{72}$$

pri čemu je: ΔS_{sx} isjenčena površina na slici 27. za x-tu stranu svitka [mm^2], a M_j mjerilo prema izrazu (48).

Srednja (vremenski prosječna) vrijednost nekompenziranog napona prostorne raspodjele svih u strana svitaka bit će:

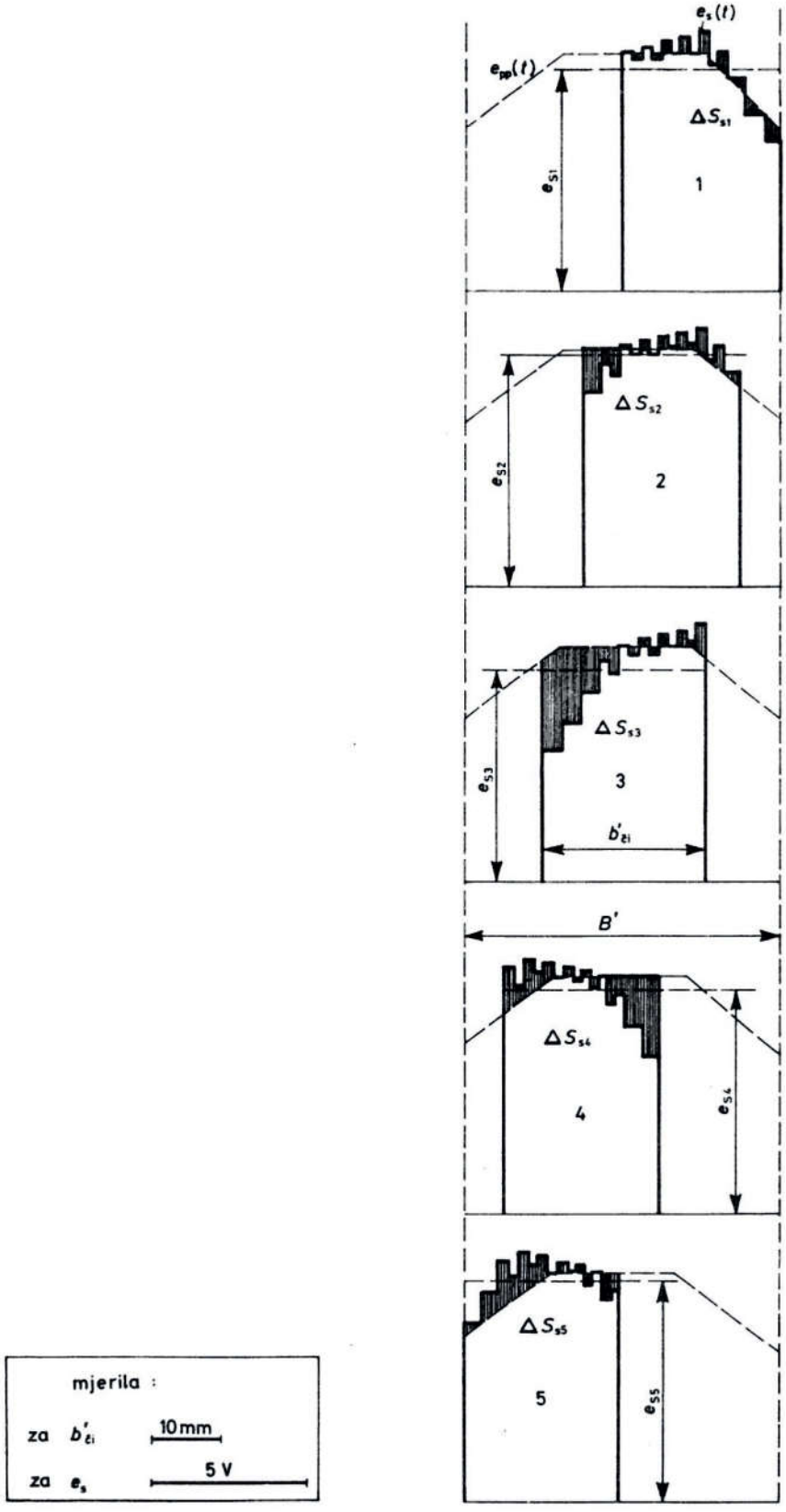
$$\Delta e_{pr} = \frac{\Delta e_{pr1} + \Delta e_{pr2} + \ldots + \Delta e_{pru}}{u} \quad \text{[V]}, \tag{73}$$

pri čemu je $\Delta e_{pr1}, \ldots, \Delta e_{pru}$ srednja vrijednost nekompenziranog napona prostorne raspodjele svake strane svitka prema izrazu (72).

Kvalitetu kompenzacije prostorne raspodjele napona samoindukcije (uvijek skokovito promjenjiva krivulja), naponom induciranim djelovanjem magnetskog toka pomoćnog pola (uvijek kontinuirana krivulja), možemo izraziti omjerom srednje vrijednosti nekompenziranog napona prema izrazu (73) i srednje vrijednosti napona samoindukcije prema izrazu (54). Taj omjer nazovimo *koeficijentom nekompenzacije prostorne raspodjele*. On iznosi:

$$k_{epr} = \frac{\Delta e_{pr}}{e_{ssr}} \text{ [1]}. \tag{74}$$

Za veću komutacijsku sposobnost stroja potrebno je da koefecijent nekompenzacije prostorne raspodjele bude što je moguće manji, a njegovo smanjenje do nekoga minimalnog iznosa dade se u osnovi ostvariti izborom parametara namota (u, u_k, u_l, ε, ε_k, ε_l), odgovarajućim prekrivanjem četkica i oblikovanjem polne papuče pomoćnog pola. U tablici



Sl. 27. Određivanje nekompenziranog napona prostorne raspodjele

na slici 28 [L 16] približne su minimalne vrijednosti koeficijenta nekompenzacije prostorne raspodjele koje se mogu ostvariti za razne vrste i izvedbe namota armature. Manja vrijednost nekompenziranog napona prostorne raspodjele, uz nezasićeni magnetski krug

broj strana svitaka u utoru u [1]	koeficijent k_{epr} [1]	
	namot armature	
	petljasti	valoviti
3, 5, 7,	0,1	0,13
4	0,18	0,18
6	0,18	0,1

Sl. 28. Minimalne vrijednosti koeficijenta k_{epr} za razne vrste i izvedbe namota armature

pomoćnih polova, znači širu zonu tamne komutacije. Praksa je podešavanja komutacije istosmjernih strojeva pokazala da je oblikovanje polne papuče pomoćnog pola najefikasniji način proširenja zone tamne komutacije do neke granice (minimalni nekompenzirani napon prostorne raspodjele) uz nepromijenjenu širinu komutacijske zone.

4.6. Energetska teorija komutacije

Osnovne postavke već spomenute klasične teorije komutacije, kod koje se proces komutacije razmatra kao ukapčanje i iskapčanje induktivnoga strujnog kruga pomoću kontakta četkice i koletora jesu:

- cijela kontaktna površina četkica-kolektor ravnomjerno vodi struju;
- prelazni otpor četkica-kolektor ne ovisi o gustoći struje i veličini kontaktne površine;
- najpovoljnija komutacija istosmjernih strojeva ostvaruje se pri blagoj natkomutaciji (znači u području između pravocrtne komutacije i natkomutacije) pri kojoj je gustoća struje na kraju komutacije nula;
- za ostvarenje pravocrtne (ili njoj bliske) komutacije prijeko potrebna je kod svitka u komutaciji jednakost iznosa i oblika napona samoindukcije i napona induciranoga magnetskim tokom pomoćnih polova.

Klasična teorija komutacije zadovoljava zahtjeve projektiranja do stanovitog stupnja razvoja gradnje istosmjernih strojeva. Za razmatranje procesa komutacije kod strojeva s visokim iskorištenjem (povišena mehanička, toplinska, potencijalna i komutacijska naprezanja) treba uzeti više parametara stroja nego što to omogućuje klasična teorija. Zato se proces komutacije često razmatra i na osnovi složenoga elektromehaničkog dinamičkog procesa nazvanoga energetska komutacija.

4.6.1. Osnove energetske teorije komutacije

Osnove energetske teorije komutacije [L 18] izložit ćemo za opći slučaj istosmjernog stroja s pomoćnim polovima. Strane svitka namota armature u komutaciji tvore dinamički sistem na koji možemo primijeniti Lagrangeovu jednadžbu, poznatu iz mehanike, tj.:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial W}{\partial q} - \frac{\partial W}{\partial q} + \frac{\partial F}{\partial m} = Q, \tag{1}$$

pri čemu je W energija sistema, F funkcija koja označava gubitke energije u sistemu, q opća koordinata, m opća brzina i Q je opća sila.

Strane svitka u komutaciji magnetski povezane s pomoćnim polovima čine elektromehanički sistem karakteriziran električkim i geometrijskim općim koordinatama, koje određuju gibanja u tom sistemu. Kod procesa komutacije u električkom smislu, za električku opću koordinatu treba odabrati količinu elektriciteta koja prolazi kroz strane svitka u komutaciji q, a tad je električka opća brzina – struja strane svitka i i opća sila – napon strane svitka. Budući da se strana svitka u komutaciji giba, za geometrijsku opću koordinatu valja odabrati kut zakreta armature α, a tad je geometrijska opća brzina – kutna brzina ω i opća sila – moment M. Lagrangeove jednadžbe za električku i geometrijsku koordinatu tad imaju oblik:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial W_\mathrm{m}}{\partial i} - \frac{\partial W_\mathrm{m}}{\partial q} + \frac{\partial F}{\partial i} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial W_\mathrm{m}}{\partial \omega} - \frac{\partial W_\mathrm{m}}{\partial \alpha} + \frac{\partial F}{\partial \omega} = M, \tag{3}$$

gdje W_m označava magnetsku energiju sistema koja se mijenja u procesu komutacije, i struju strane svitka u komutaciji (opća brzina za električku koordinatu $i = \mathrm{d}q/\mathrm{d}t$), ω kutnu brzinu armature (opća brzina za geometrijsku koordinatu $\omega = \mathrm{d}\alpha/\mathrm{d}t$), a M moment strane svitka u komutaciji (opća sila za geometrijsku koordinatu).

Nula na desnoj strani izraza (2) znači da na stranu svitka u komutaciji nije priključen vanjski napon. U izrazu (3) desna strana nije jednaka nuli jer od magnetskog toka u zračnom rasporu pomoćnih polova i struje strane svitka u komutaciji može u općem slučaju nastati okretni moment.

Magnetska energija jedne strane svitka u komutaciji (uz udio susjednih strana svitka koje istodobno komutiraju) iznosi:

$$W_\mathrm{m} = \frac{L_1 i_1^2}{2} + L_{12} i_1 i_2 + \ldots + L_{1\mathrm{n}} i_1 i_\mathrm{n} - L_{\mathrm{pps}} i_1 I_{\delta\mathrm{pp}}. \tag{4}$$

U izrazu (4) L_1 je samoinduktivitet strane svitka u komutaciji, $L_{12}, \ldots, L_{1\mathrm{n}}$ međuinduktivitet strana svitaka utora u komutaciji, L_{pps} označava međuinduktivitet strane svitka u komutaciji i namota pomoćnog pola, a $I_{\delta\mathrm{pp}}$ dio struje namota pomoćnog pola koja stvara magnetski tok (bez rasipnoga!) u zračnom rasporu pomoćnog pola.

Budući da W_m ne ovisi o q i ω, izlazi $\partial W_\mathrm{m}/\partial q = 0$ i $\partial W_\mathrm{m}/\partial \omega = 0$, a kako se za vrijeme komutacije obično ne mijenja brzina vrtnje, dobivamo dalje $\partial F/\partial \omega = 0$, pa izrazi (2) i (3) glase:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial W_\mathrm{m}}{\partial i} \pm \frac{\partial F}{\partial i} = 0 \tag{5}$$

$$M = \frac{\partial W_\mathrm{m}}{\partial \alpha}. \tag{6}$$

Funkcija F u električnome strujnom krugu označava gubitke energije u tom krugu nastale izmjenom magnetske energije povezane s tim krugom. Istosmjernim strojevima s dobro prilegnutim četkicama najmanji gubici četkica-kolektor nastaju kad je jednaka gustoća struje po cijeloj površini četkica, a to je pri pravocrtnoj komutaciji. Te gubitke nazivamo *prelaznim gubicima*. Ukoliko se u procesu komutacije pojavljuje nejednolika gustoća struje

po površini četkice (potkomutacija ili natkomutacija), osim prelaznih nastaju još i dodatni gubici, koje nazivamo *komutacijskim gubicima pod četkicom*. Tako funkcija F uz pravocrtnu komutaciju obuhvaća samo gubitke nastale zbog vrtložnih struja u vodičima strana svitka u komutaciji, a pri odstupanju od pravocrtne komutacije još i komutacijske gubitke pod četkicom. Razmotrimo zasebno zbivanja uz pravocrtnu komutaciju i u suprotnom, kad su odstupanja od nje.

4.6.1.1. Pravocrtna komutacija

Koristeći se izrazima (4), (5) i (6), te nakon provedenog deriviranja, dobivamo jednadžbe za opće električne sile (napon) i opće mehaničke sile (moment) pri pravocrtnoj komutaciji:

$$L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_{12} \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + \ldots + L_{1n} \frac{\mathrm{d}i_n}{\mathrm{d}t} = I_{\delta pp} \frac{\mathrm{d}L_{pps}}{\mathrm{d}t} + \frac{\partial F}{\partial i} \tag{7}$$

$$M = I_{\delta pp} i_1 \frac{\mathrm{d}L_{pps}}{\mathrm{d}\alpha}. \tag{8}$$

Pomnožimo li izraze (7) i (8) općom brzinom, i to izraz (7) strujom i_1, a izraz (8) kutnom brzinom ω, nastaju Lagrangeove jednadžbe za električnu i mehaničku snagu:

$$i_1 \left(L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_{12} \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + \ldots + L_{1n} \frac{\mathrm{d}i_n}{\mathrm{d}t}\right) = I_{\delta pp} i_1 \frac{\mathrm{d}L_{pps}}{\mathrm{d}t} + P_v \tag{9}$$

$$P_m = M\omega = \omega I_{\delta pp} i_1 \frac{\mathrm{d}L_{pps}}{\mathrm{d}\alpha}. \tag{10}$$

Budući da je:

$$\frac{\mathrm{d}L_{pps}}{\mathrm{d}t} = \omega \frac{\mathrm{d}L_{pps}}{\mathrm{d}\alpha},$$

izvodi se dalje izraz za elektromehaničku snagu promatrane strane svitka u komutaciji:

$$i_1 \left(L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_{12} \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + \ldots + L_{1n} \frac{\mathrm{d}i_n}{\mathrm{d}t}\right) = \omega I_{\delta pp} i_1 \frac{\mathrm{d}L_{pps}}{\mathrm{d}t} + P_v. \tag{11}$$

Lijevu stranu izraza (11) možemo nazvati *komutacijska snaga strane svitka* jer ona nastaje zbog promjene magnetske energije strane promatranog svitka po vremenu, a desna je strana suma snaga, i to: snage koja nastaje međusobnim djelovanjem magnetskog toka u zračnom rasporu pomoćnog pola i struje strane svitka u komutaciji (prvi pribrojnik), te (gubitaka) snage nastale djelovanjem vrtložnih struja u vodičima strane svitka u komutaciji (drugi pribrojnik). Za prvi dio trajanja komutacije u kojem se struja strane svitka mijenja od $i_1 = I_v$ (struja grane namota armature) do $i_1 = 0$, komutacijska snaga strane svitka (uz isključenje gubitaka vrtložnih struja) jednaka je snazi predanoj armaturi putem elektromagnetskog momenta pomoćnog pola. Nema komutacijskih gubitaka pod četkicom. Za drugi dio trajanja komutacije, u kojem se struja strane svitka mijenja od $i_1 = 0$ do $i_1 = I_v$, strana svitka prima magnetsku energiju s armature putem elektromagnetskog momenta. Spomenuti su zaključci osnova daljnjem tumačenju energetske teorije komutacije.

Za razmatranje procesa komutacije u cjelini treba uzeti u obzir sve strane svitaka koje istodobno komutiraju, i to za početak razmatranja uz veliko prekrivanje četkica β. Iz razmatranja izlazi da sve strane svitaka u komutaciji kojima se struja smanjuje od I_v do

nule stvaraju moment jednak $I_{\delta pp} \sum_{1}^{0,5\beta} i \frac{dL_{pps}}{d\alpha}$, koji djeluje u smjeru vrtnje armature, a sve strane svitaka u komutaciji kojima se struja mijenja od nule do $-I_v$ stvaraju po vrijednosti isti moment, ali smjera suprotnoga vrtnji armature. Ako je prekrivanje četkica dovoljno veliko, ti su momenti konstantni po vremenu, jednako kao i komutacijska snaga lijeve i desne polovice strana svitaka u komutaciji. Za sve strane svitaka u komutaciji izraz za elektromehaničku snagu glasi:

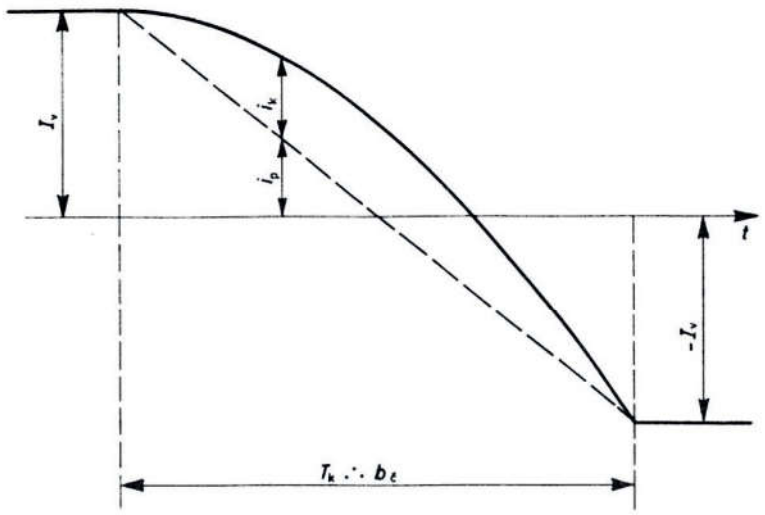
$$\sum_{1}^{0,5\beta} i_p \left(L_p \frac{di_p}{dt} + L_{p1} \frac{di_1}{dt} + \ldots + L_{pn} \frac{di_n}{dt} \right) = \omega I_{\delta pp} \sum_{1}^{0,5\beta} i_p \frac{dL_{pps}}{d\alpha} + \sum_{1}^{\beta} P_v, \qquad (12)$$

gdje P_v označava gubitke snage nastale zbog vrtložnih struja, za jednu stranu svitka u komutaciji, a i_p je trenutna vrijednost struje strane svitka u komutaciji pri pravocrtnoj komutaciji.

I na kraju razmatranja pravocrtne komutacije možemo zaključiti da strane svitaka u kojima struja pada predaju komutacijsku snagu stranama svitaka u kojima struja raste uz isključenje gubitaka vrtložnih struja, a komutacijskih gubitaka pod četkicom nema.

4.6.1.2. Nepravocrtna komutacija

Odstupanje od pravocrtne komutacije nastaje kod istosmjernog stroja s pomoćnim polovima pri potkomutaciji ili natkomutaciji, zatim kod istosmjernog stroja bez pomoćnih polova ili kod nekih posebnih (radi ispitivanja) spojeva namota.



Sl. 1. Promjena struje u komutacijskom procesu

Razmotrimo opširnije istosmjerni stroj s pomoćnim polovima uz prisutnost *potkomutacije*. Struju strane svitka u komutaciji (prema sl. 1) možemo pisati kao sumu struje pravocrtne komutacije i_p i poprečne struje i_k, tj.:

$$i_r = i_p + i_k.$$

Pri tome lijeva polovica strana svitaka u komutaciji s magnetskim tokom pomoćnog pola stvara moment:

$$I_{\delta pp} \sum_{1}^{0,5\beta} i_p \frac{dL_{pps}}{d\alpha} + I_{\delta pp} \sum_{1}^{0,5\beta} i_k \frac{dL_{pps}}{d\alpha},$$

a desna polovica moment:

$$-I_{\delta pp} \sum_{0,5\beta}^{\beta} i_p \frac{dL_{pps}}{d\alpha} + I_{\delta pp} \sum_{0,5\beta}^{\beta} i_k \frac{dL_{pps}}{d\alpha}.$$

Iz tih se izraza dobiva da pomoću pomoćnih polova jedna grupa strana svitaka u komutaciji može drugoj grupi strana svitaka u komutaciji predati samo dio komutacijske snage (prvi pribrojnici suprotna predznaka), a drugi se dio komutacijske snage (drugi pribrojnici istog predznaka) predaje armaturi kao dodatni moment u smjeru vrtnje armature.

Uzevši u obzir gubitke vrtložnih struja i komutacijske gubitke pod četkicom, izraz za elektromehaničku snagu svake strane svitka u komutaciji ima oblik:

$$i_1\left(L_1\frac{di_1}{dt} + L_{12}\frac{di_2}{dt} + \ldots + L_{1n}\frac{di_n}{dt}\right) = \omega I_{\delta pp} i_p \frac{dL_{pps}}{d\alpha} + \omega I_{\delta pp} i_k \frac{dL_{pps}}{d\alpha} + i_k^2 r_č + P_v,$$

pri čemu je $r_č$ srednja vrijednost otpora četkice poprečnoj struji i_k.

Upotrijebljeni pojam *srednja vrijednost otpora četkice poprečnoj struji* ima drukčiji smisao od prelaznog otpora četkica-kolektor $R_č$, kojim se koristi u tumačenju klasične teorije komutacije. Otpor $r_č$ karakterizira materijal četkice i odražava stanje komutacijskih gubitaka (dodatnih) pri odstupanju od pravocrtne komutacije.

Pri potkomutaciji (s obzirom na pravocrtnu komutaciju) za bilo koje vrijeme unutar trajanja komutacije, struja pada u većem broju strana svitaka $x\beta$ ($x\beta > 0{,}5\beta$), a raste u manjem broju strana svitaka. Izraz za elektromehaničku snagu svih strana svitaka u komutaciji ima oblik:

$$\sum_{1}^{x\beta} i_r\left(L_r\frac{di_r}{dt} + L_{r1}\frac{di_n}{dt} + \ldots + L_{rn}\frac{di_n}{dt}\right) =$$

$$= \omega I_{\delta pp} \sum_{1}^{0,5\beta} i_p \frac{dL_{pps}}{d\alpha} + \omega I_{\delta pp} \sum_{1}^{\beta} i_k \frac{dL_{pps}}{d\alpha} + \sum_{1}^{\beta} i_k^2 r_č + \sum_{1}^{\beta} P_v. \qquad (13)$$

Budući da svi članovi izraza za snagu znače rezultat vremenske promjene energije strana svitaka u komutaciji, u njega ne ulaze prelazni gubici četkica i gubici u vodičima zbog struje pravocrtne komutacije, a gubici se vrtložnih struja u vodičima zbog poprečne struje mogu zanemariti.

I na kraju razmatranja potkomutacije zaključit ćemo da je energija strana svitaka u komutaciji kojima se struja smanjuje veća od energije strana svitaka u komutaciji kojima struja raste. Pri tome jedne strane svitaka u komutaciji predaju dio komutacijske energije drugima, dio komutacijske energije se predaje u obliku dodatnog momenta na osovinu, a dio se gubi pod četkicom i u vodičima. Dio komutacijske snage jednak komutacijskim gubicima pod četkicom izaziva iskrenje na četkicama.

Pri *natkomutaciji* izraz za elektromehaničku snagu svih strana svitaka u komutaciji ima jednak oblik kao za potkomutaciju, osim što se mijenja predznak člana dodatnog momenta jer se pri natkomutaciji manjak energije strana svitaka u komutaciji pri kojima struja raste nadoknađuje dodatnim momentom s osovine stroja.

Istosmjernom stroju *bez pomoćnih polova* ($I_{\delta pp} = 0$) izraz za elektromehaničku snagu, ako s P_k označimo lijevu stranu izraza (13), ima oblik:

$$P_k = \sum_1^{\beta} i_r^2 r_č + \sum_1^{\beta} P_v,$$

tj. sva komutacijska energija troši se na komutacijske gubitke pod četkicom i na gubitke u vodičima.

Kod istosmjernog generatora u praznom hodu kojem su napajani samo pomoćni polovi, izraz za elektromehaničku snagu poprima oblik:

$$\omega I_{\delta pp} \sum_1^{\beta} i_k \frac{dL_{pps}}{d\alpha} = \sum_1^{\beta} i_k^2 r_č + \sum_1^{\beta} P_v,$$

tj. komutacijski gubici pod četkicama i gubici nastali vrtložnim strujama u vodičima pokrivaju se snagom s osovine.

Ako magnetsko polje pomoćnih polova djeluje u smjeru polja armature (a ne suprotno – što je normalno), izraz za elektromehaničku snagu bit će:

$$P_k = -\omega I_{\delta pp} \sum_1^{0,5\beta} i_p \frac{dL_{pps}}{d\alpha} + \omega I_{\delta pp} \sum_1^{\beta} i_k \frac{dL_{pps}}{d\alpha} + \sum_1^{\beta} i_r^2 r_č + \sum_1^{\beta} P_v,$$

tj. komutacijski gubici pod četkicama premašuju komutacijsku snagu.

U dosadašnjim razmatranjima procesa energetske komutacije bilo je pretpostavljeno veće prekrivanje četkica, pa se za sve članove izraza za elektromehaničku snagu moglo uzeti da su nepromjenjivi s vremenom, iz čega izlazi da nema razlike između njihovih srednjih i trenutnih vrijednosti.

Kod realnih istosmjernih strojeva prekrivanje četkica nalazi se u području $\beta = 2{,}5 \div 5$. Za takva prekrivanja mogu postojati intervali vremena (čak i pri pravocrtnoj komutaciji), kad moment strana svitaka u kojima struja pada ne mora biti jednak momentu strana svitaka u kojima struja raste. Izjednačenje momenta tad nastupa zbog promjene brzine vrtnje armature djelovanjem dinamičkog momenta ($M = I\,d\omega/dt$). Tako se, kod realnih prekrivanja četkica, proces komutacije provodi uz torzione oscilacije armature. Budući da je frekvencija oscilacija visoka, a moment inercije armature velik, amplitude su oscilacija brzine vrtnje armature vrlo male.

Ako se proces komutacije provodi uz oscilacije brzine vrtnje armature, tad član $\partial F/\partial \omega$ u funkciji koja predstavlja gubitke energije ovisno o brzini u Langrangeovoj jednadžbi nije jednak nuli, već je jednak gubicima trenja zbog oscilacija armature. Budući da je vrijednost tog člana mala u usporedbi s drugim članovima, njegov utjecaj na bilancu energije može se zanemariti.

Iz općeg izraza (13) za komutaciju, koji vrijedi i pri realnom prekrivanju četkica (uz udio dinamičkog momenta), dade se prijeći na srednju vrijednost elektromehaničke snage. Za prijelaz na srednje vrijednosti pojedinih članova poslužit će Cauchyev teorem (određivanje srednje vrijednosti neprekinute funkcije u zadanome vremenskom intervalu). Srednja vrijednost di/dt za sve strane svitaka u komutaciji jednaka je i iznosi $2\,I_v/T_k$ (T_k – trajanje komutacije). Također su jednake srednje vrijednosti $dL_{pps}/d\alpha$ za sve strane svitaka jednog utora.

Bez određivanja srednje vrijednosti L (samoinduktivitet i međuinduktivitet) i $r_č$, izraz za srednje vrijednosti snaga po paru polova glasi:

$$\frac{\beta I_v^2}{T_k} \left(\sum_1^{\beta} L\right)_s = 0{,}5\ \beta\omega I_v I_{\delta pp} \left(\frac{dL_{pps}}{d\alpha}\right)_s + 2\beta\omega I_{\delta pp} i_k \left(\frac{dL_{pps}}{d\alpha}\right)_s + 2\beta i_k^2 r_č + 2\beta P_v. \qquad (14)$$

Iz izraza (14) izlazi da za konkretni stroj i zadani režim rada ima mogućnosti odabiranja takve struje $I_{\delta pp}$ da srednja vrijednost poprečne struje bude $i_k = 0$, jer su ostali parametri konstantni. Razumljivo je da se ne može tvrditi kako uz srednju vrijednost $i_k = 0$ vlada pravocrtna komutacija.

4.6.2. Usporedba energetske i klasične teorije komutacije

Elektromagnetski proračun pomoćnih polova kod istosmjernih strojeva provodi se uglavnom na osnovnim principima klasične teorije komutacije, tj.: pomoćni polovi moraju u svojemu zračnom rasporu stvarati takvu indukciju koja u stranama svitaka u komutaciji osigurava inducirani napon jednak naponu samoindukcije i po veličini i po prostornoj raspodjeli.

Iz energetske teorije komutacije uočavamo najpovoljnije uvjete komutacije pri pravocrtnoj komutaciji kad je ostvarena puna predaja komutacijske snage jedne grupe strana svitaka drugoj (uz zanemarenje gubitaka vrtložnih struja u vodičima), pa nema komutacijskih gubitaka pod četkicom.

Radi usporedbe energetske i klasične teorije komutacije razmotrimo one odnose iz energetske teorije komutacije [L 19] koji vrijede za pravocrtnu komutaciju.

Uvedemo li srednje vrijednosti pojedinih članova u izrazu (12), uz zanemarenje gubitaka vrtložnih struja u vodičima, dobivamo izraz za srednju snagu po paru polova:

$$\frac{\beta I_v^2}{T_k} \sum_1^\beta L_{(\alpha)} = 0{,}5\beta\omega I_{\delta pp} I_v \left(\frac{dL_{pps}}{d\alpha}\right)_s. \tag{15}$$

Uzevši u obzir da je:

$$\omega = \frac{2b_č}{D_a T_k}, \qquad I_{\delta pp} = 2aI_v k,$$

pri čemu je $b_č$ širina četkice (lučna mjera), D_a promjer armature, a broj pari paralelnih grana namota armature, a k omjer $\Theta_{\delta pp}/\Theta_{pp}$, gdje je s Θ_{pp} označeno protjecanje pomoćnih polova, a s $\Theta_{\delta pp}$ ono koje stvara magnetski tok u zračnom rasporu pomoćnih polova, dobivamo:

$$\sum_1^\beta L_{(\alpha)} = \frac{2ab_č k}{D_a}\left(\frac{dL_{pps}}{d\alpha}\right). \tag{16}$$

Iz izraza (16) izlazi kako je za ostvarenje pravocrtne komutacije prijeko potrebno da oblik krivulja raspodjele $\Sigma L_{(\alpha)}$ i $dL_{pps}/d\alpha$ po obodu armature bude jednak, te da će pravocrtna komutacija biti ostvarena i pri drugim režimima rada stroja ako promjena brzine vrtnje i struje ne izazove promjenu $\Sigma L_{(\alpha)}$ i $dL_{pps}/d\alpha$.

Ako u izraz (15) uvedemo:

$$d\alpha = \omega dt, \quad I_{\delta pp}\frac{dL_{pps}}{d\alpha} = 2B_{\delta pp} I_{pp} v_a, \quad v_a = v_k \frac{D_a}{D_k}, \qquad b_č = T_k v_k,$$

nastaje:

$$\sum_1^\beta L_{(\alpha)} = b_č l_{pp} \frac{D_a}{D_k} \frac{B_{\delta pp}(\alpha)}{I_v}. \tag{17}$$

U tim izrazima l_{pp} je dužina jezgre pomoćnog pola, v_a obodna brzina armature, $B_{\delta pp}$ indukcija u zračnom rasporu pomoćnih polova i D_k je promjer kolektora. Iz izraza (17) uočavamo da pri pravocrtnoj komutaciji oblik krivulje raspodjele $B_{\delta pp}$ po obodu armature mora odgovarati obliku $\Sigma L_{(\alpha)}$, te da za sve režime rada mora vladati linearna ovisnost indukcije $B_{\delta pp}$ i struje armature.

Izjednačenjem $\Sigma L_{(\alpha)}$ iz izraza (16) i (17) dobivamo ovisnost $\mathrm{d}L_{\mathrm{pps}}/\mathrm{d}\alpha$ i $B_{\delta \mathrm{pp}}$, tj.:

$$\left(\frac{\mathrm{d}L_{\mathrm{pps}}}{\mathrm{d}\alpha}\right) = \frac{D_{\mathrm{a}}^2 l_{\mathrm{pp}}}{2akD_{\mathrm{k}}} \frac{B_{\delta \mathrm{pp}(\alpha)}}{I_{\mathrm{v}}} . \tag{18}$$

Ako u izraz (15) uvedemo $\mathrm{d}\alpha = \omega \mathrm{d}t$, izlazi:

$$\frac{2I_{\mathrm{v}}}{T_{\mathrm{k}}} \sum_{1}^{\beta} L_{(\alpha)} = I_{\delta \mathrm{pp}} \left(\frac{\mathrm{d}L_{\mathrm{pps}}}{\mathrm{d}t}\right) \tag{19}$$

Ili:

$$e_{\mathrm{ssr}} = -e_{\mathrm{pp}}.$$

Iz izraza (19) izvodimo osnovni uvjet pravocrtne komutacije prema kojem u svakoj strani svitka u komutaciji napon induciran magnetskim tokom pomoćnih polova, mora biti jednak naponu samoindukcije. Iz istog izraza se vidi da je uvjet $e_{\mathrm{s}} = -e_{\mathrm{pp}}$ točan ako proizlazi iz procesa komutacije kojim se putem pomoćnih polova osigura predaja cijele komutacijske snage jedne grupe strana svitaka u komutaciji drugoj bez komutacijskih gubitaka pod četkicom.

Valja napomenuti da uvjet $e_{\mathrm{ssr}} = -e_{\mathrm{pp}}$ može biti i samo formalan, pri čemu nije osigurana pravocrtna komutacija, ako inducirani napon svitka u komutaciji nije uzrokovan magnetskim tokom pomoćnih polova, već na neki drugi način. To može biti npr. djelovanjem magnetskog toka glavnih polova uz pomak četkica iz neutralne zone, ili napajanjem posebnog svitka na glavnim polovima izmjeničnom strujom niske frekvencije uz skinute pomoćne polove, i slično.

Usporedbom zaključaka u izrazima od (16) do (19) za energetsku teoriju komutacije u odnosu prema klasičnoj teoriji, vidi se da za pravocrtnu komutaciju vrijede isti uvjeti (jednakost veličine i oblika napona samoindukcije i napona induciranoga djelovanjem pomoćnih polova, jednaka promjena napona samoindukcije i napona induciranoga djelovanjem pomoćnih polova pri promjeni struje i brzine vrtnje, linearna ovisnost indukcije u zračnom rasporu pomoćnih polova o struji armature), s time da uvjet klasične teorije komutacije $e_{\mathrm{ssr}} = -e_{\mathrm{pp}}$ ne vrijedi kad se inducirani napon e_{pp} svitka u komutaciji ostvari na neki drugi način, a ne djelovanjem pomoćnih polova.

4.6.3. Kriteriji energetske teorije komutacije

Osnovni kriteriji komutacijskog naprezanja istosmjernog stroja pri energetskoj teoriji komutacije izlaze iz komutacijskih gubitaka pod četkicom i komutacijske snage [L 20, str. 12].

Razmotrimo najprije postupak pronalaženja komutacijskih gubitaka pod četkicom. Svako odstupanje od pravocrtne komutacije izaziva pojavu poprečne struje i_{k}, dodatnog momenta i komutacijskih gubitaka pod četkicom. Ako u izraz (14) za srednje vrijednosti snaga uvedemo:

$$\omega = \frac{2b_{\check{\mathrm{c}}}}{D_{\mathrm{a}} T_{\mathrm{k}}}, \qquad I_{\delta \mathrm{pp}} = 2akI_{\mathrm{v}},$$

izlazi:

$$\frac{0{,}5 I_{\mathrm{v}}^2}{T_{\mathrm{k}}} \left[\sum_{1}^{\beta} L_{(\alpha)} - \frac{2b_{\check{\mathrm{c}}} ak}{D_{\mathrm{a}}} \left(\frac{\mathrm{d}L_{\mathrm{pps}}}{\mathrm{d}\alpha}\right)_{\mathrm{sr}}\right] = 2akI_{\mathrm{v}} \omega i_{\mathrm{k}} \left(\frac{\mathrm{d}L_{\mathrm{pps}}}{\mathrm{d}\alpha}\right) + i_{\mathrm{k}}^2 r_{\check{\mathrm{c}}} + P_{\mathrm{v}}. \tag{20}$$

Kad se izračunava vrijednost članova u uglatoj zagradi, treba poći od srednje razlike oblika tih krivulja, a ne od srednjih vrijednosti $\sum_{1}^{\beta} L_{(\alpha)}$ i $\mathrm{d}L_{\mathrm{pps}}/\mathrm{d}\alpha$. Za određivanje i_{k} valja poznavati $r_{\check{\mathrm{c}}}$, kojem se srednja vrijednost ustanovljuje ispitivanjem.

Iz izraza (20) možemo za zadani režim rada, uz prethodno izračunatu vrijednost gubitaka vrtložnih struja u vodičima, naći poprečnu struju i_{k} i, dalje, komutacijske gubitke pod četkicom. Za četkicu određene izvedbe i kvalitete materijala karakteristični su gubici koje ona može (termički) preuzeti bez iskrenja. Ako, zbog nepovoljnih uvjeta komutacije, nastaju veći gubici, pojavljuje se iskrenje na četkicama. Tako su nam prvi kriterij dopušteni komutacijski gubici po jedinici klizne površine četkice za određenu izvedbu i kvalitetu materijala četkice.

Za proces komutacije nije toliko bitna sama izmjena energije koliko odnos između te energije i trajanja komutacije, tj. komutacijska snaga. Komutacijsku snagu određuju struja grane namota, induktivitet strane svitka u komutaciji, broj strana svitaka u komutaciji (koje komutiraju istodobno) i brzina vrtnje. Budući da u procesu komutacije osim komutacijskih gubitaka pod četkicom (zbog poprečne struje i_{k}) nastaju i prelazni gubici (zbog struje pravocrtne komutacije i_{p}), zanimljiv je odnos komutacijske snage po jedinici klizne površine četkice. Na taj se način osim parametara namota, geometrije aktivnog sloja namota armature i režima rada uzima u obzir još i geometrija kontakta četkice i kolektora. Ispitivanja su pokazala da određenom stroju za rad bez iskrenja s povećanjem brzine vrtnje naglo pada odnos $P_{\mathrm{k}}/S_{\check{\mathrm{c}}}$ zbog utjecaja dinamičkih faktora na kontakt četkice i kolektore. Uzevši još i dinamiku kontakta, dobivamo drugi kriterij komutacijskog naprezanja stroja:

$$K_{\mathrm{e}} = \frac{P_{\mathrm{k}} v_{\mathrm{k}}}{S_{\check{\mathrm{c}}}}. \tag{21}$$

U tom izrazu je P_{k} komutacijska snaga po paru polova određena kao promjena magnetske energije svitka u komutaciji za vrijeme trajanja komutacije, a iznosi:

$$P_{\mathrm{k}} = \frac{2\beta I_{\mathrm{v}}^2 \sum_{1}^{\beta} L}{T_{\mathrm{k}}} = \beta e_{\mathrm{ssr}} I_{\mathrm{v}}.$$

Pri tome je $\sum_{1}^{\beta} L$ suma samoinduktiviteta i međuinduktiviteta strana svitaka u komutaciji.

Uvedemo li izraz za komutacijsku snagu u izraz (21), nastat će:

$$K_{\mathrm{e}} = \frac{\beta e_{\mathrm{ssr}} \Gamma_{\check{\mathrm{c}}} v_{\mathrm{k}}}{4} = \frac{e_{\mathrm{ssr}} I_{\mathrm{v}} v_{\mathrm{k}}}{2\tau_{\mathrm{k}} L_{\check{\mathrm{c}}}}, \tag{22}$$

pri čemu je $\Gamma_{\check{\mathrm{c}}}$ gustoća struje četkica, a $L_{\check{\mathrm{c}}}$ – ukupna dužina četkica u jednom redu (približno dužina klizne plohe kolektora).

Iz posljednjeg izraza uočavamo da za smanjenje vrijednosti kriterija K_{e} pri zadanom naponu samoindukcije svitka u komutaciji, treba povećati dužinu četkica u jednom redu, tj. dužinu kolektora, a ne samo formalno povećati površinu četkica.

4.7. Zadaci i problemi

4.7.1. Zadaci

1. Šesteropolni istosmjerni motor namotan je valovitim jednovojnim namotom i ima na armaturi 59 utora s osam vodiča u utoru ($u = 2$), svaki presjeka od 17 mm^2. Dužina zavoja armature iznosi 1 200 mm, a magnetski tok po polu 0,02 Vs.
   Potrebno je odrediti:
   a) otpor namota armature;
   b) inducirani napon pri brzini vrtnje od 500 min^{-1};
   c) korisni moment na osovini motora pri gustoći struje namota armature od 3,6 A/mm^2 i momentu gubitaka od 21,7 Nm.

2. Na natpisnoj pločici šesteropolnoga istosmjernog generatora za 230 V, 680 A nije čitljiva brzina vrtnje. Mjerenjem su ustanovljene ove dimenzije stroja: promjer armature 500 mm, dužina paketa limova 160 mm i širina polne papuče glavnog pola 175 mm. Namot je armature petljasti jednovojni s dva zavoja između susjednih kolektorskih lamela, a kolektor ima 138 lamela.
   Opisani istosmjerni generator želimo mehanički izravno (bez prijenosa) spojiti s asinhronim motorom u agregat za pretvorbu izmjenične električne energije frekvencije od 50 Hz u istosmjernu.
   Treba odrediti:
   a) približnu nazivnu brzinu vrtnje generatora;
   b) broj polova i snagu za narudžbu asinhronog motora.

3. Istosmjerni serijski motor od 5 kW, 220 V, 26,7 A i 1 000 min^{-1} prikjučen je na istosmjernu mrežu od 220 V napona. Pri tome radi na nezasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja, a služi za pogon centrifugalnog ventilatora. Motor je potpuno opterećen. Ako napon mreže padne 10 %, potrebno je odrediti:
   a) brzinu vrtnje ventilatora;
   b) struju motora ako je korisnost nepromijenjena.

4. Istosmjerni serijski motor od 5 kW, 220 V, 26,7 A i 1 000 min^{-1} služi za pogon centrifugalnog ventilatora i potpuno je opterećen. Pri kojoj će vrijednosti napona motor imati brzinu vrtnje od 900 min^{-1} i koliku će struju uzimati iz mreže uz pretpostavku nepromijenjene korisnosti ako:
   a) radi na nezasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja;
   b) radi u sasvim zasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja?

5. Istosmjerni poredni motor od 10 kW, 220 V, 52 A i 800 min^{-1} služi za pogon centrifugalnog ventilatora i potpuno je opterećen. Kolika će biti brzina vrtnje motora i koliku će struju uzimati iz mreže (uz nepromijenjenu korisnost i zanemarenje struje magnetiziranja) ako napon mreže poraste 10 % kad:
   a) motor radi na nezasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja;
   b) motor radi na sasvim zasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja?

6. Četveropolni istosmjerni generator s nezavisnom uzbudom ima na armaturi petljasti jednovojni namot s ukupno 560 vodiča. Korak je svitka dijemetralan. Četkice su u neutralnoj zoni, ali četkice istog polariteta nisu međusobno spojene.

Koliki će se naponi inducirati između pojedinih četkica (na polnom koraku) neopterećenog generatora pri brzini vrtnje od 1 500 min^{-1} ako je on uzbuđen tako da glavni magnetski tok svakog pola iznosi 0,017 Vs, ali pri tome su uzbudni namoti jednoga sjevernog i jednoga južnog pola zabunom spojeni obrnuto?

7. Istosmjerni poredni motor od 200 kW, 440 V i 1 000 min^{-1} ima otpor namota armature, pomoćnih polova i kompenzacijskog namota od 0,048 Ω. Korisnost motora iznosi 91 %, a struja poredne uzbude 1 % struje armature.

a) Što valja učiniti da stroj radi kao generator istog smjera vrtnje?

b) Koliku brzinu vrtnje mora imati stroj želimo li da on radi kao generator i da ima napon od 440 V na stezaljkama pri nazivnoj struji? Nema mogućnosti da se poveća protjecanje poredne uzbude.

c) Koliku snagu ima stroj u generatorskom radu?

8. Šesteropolni istosmjerni serijski motor od 20 kW i 220 V ima na armaturi valoviti jednovojni namot s ukupno 450 vodiča. Dužina paketa limova je 200 mm, a promjer armature 350 mm. Motor radi na nezasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja, a pri struji od 100 A indukcija u zračnom rasporu glavnog pola iznosi 0,8 T. Širina polne papuče glavnog pola je 67 % polnog koraka. Ukupni otpor namota armature, pomoćnih polova i serijskoga uzbudnog namota, uključivši ekvivalentni otpor četkica, iznosi 0,29 Ω.

Ustanovite potrebni predotpor motoru kojim će se ostvariti pokretni moment od 400 Nm.

9. Istosmjerni nezavisno uzbuđeni generator ima na armaturi petljasti jednovojni namot s ukupno 500 zavoja. Magnetski tok u zračnom rasporu iznosi 0,02 Vs. Otpor namota armature i pomoćnih polova, uključivši i ekvivalentni otpor četkica, iznosi 0,1 Ω.

Koliki je korisni moment kočenja na osovini generatora ako mu na stezaljke priključimo otpor od 1,9 Ω, a stacionarno se stanje postiže pri brzini vrtnje od 900 min^{-1}? Moment vlastitih gubitaka je 22,5 Nm.

10. Četveropolni istosmjerni nezavisno uzbuđeni generator sasvim je magnetski nezasićen i napon mu je praznog hoda 230 V pri brzini vrtnje od 1 500 min^{-1}. Armatura je namotana petljastim jednovojnim namotom s ukupno 800 zavoja, a uzbudni namot ima 2 500 zavoja po polu. Rasipni je magnetski tok glavnog pola 20 % magnetskog toka zračnog raspora.

Kolika je električka vremenska konstanta uzbudnog kruga pri naponu od 110 V na nezavisnoj uzbudi?

11. Četveropolnome istosmjernom stroju promjer je armature 310 mm, dužina paketa limova 160 mm, prekrivanje glavnog pola 0,67, a indukcija u zračnom

rasporu glavnih polova je 0,7 T. Namot je armature valovit i jednovojan s 43 utora i šest vodiča u utoru, a rasipanje glavnih polova iznosi 15 %.

Potrebno je odrediti:

a) inducirani napon pri brzini vrtnje od 1 000 min^{-1};

b) električku vremensku konstantu uzbudnog namota ako svaki pol ima 600 zavoja, a pad napona na uzbudnom namotu iznosi 220 V.

12. Industrijska elektrolokomotiva s četiri paralelno spojena istosmjerna serijska motora, pri vožnji na ravnoj pruzi brzinom od 45 $\frac{km}{h}$, uzima struju od 100 A iz napojnog voda (mreže) napona od 550 V. Otpor namota armature, pomoćnih polova i serijskoga uzbudnog namota za svaki motor iznosi 0,8 Ω, a pad je napona po četkici 1 V.

Pri vožnji na usponu, kad je moment tereta povećan četiri puta, motori su spojeni po dva u seriju, a obje takve grupe paralelno.

Kolika će biti brzina elektrolokomotive na usponu uz pretpostavku da je magnetski tok proporcionalan uzbudnoj struji, a napon je napojnog voda konstantan?

13. Dva istosmjerna serijska motora jednake konstrukcije imaju različite zračne raspore glavnih polova. Brzina vrtnje pojedinog motora priključenoga na napon od 600 V pri opterećenju strujom od 50 A za prvi je motor 600 min^{-1}, a za drugi 650 min^{-1}. Otpor namota armature, pomoćnih polova i serijskoga uzbudnog namota, uključivši i prelazni otpor na četkicama iznosi 0,3 Ω. Zanemarite zasićenje u feromagnetskim dijelovima magnetskog kruga!

U primjeru kad se ta dva motora spoje mehanički na radni mehanizam, a električki vežu u seriju i priključe na mrežu napona od 500 V, pri čemu uzimaju iz mreže struju od 50 A, izračunajte.:

a) brzinu vrtnje sklopa motora;

b) raspodjelu napona na pojedine motore.

14. Dvadesetpolni istosmjerni valjački motor snage od 2 970 kW, uz 1 230 V, 2 600 A i 530 min^{-1} s visokim preopterećenjem ima promjer armature od 3 250 mm, a na kolektoru 1 550 lamela s jednim zavojem između kolektorskih lamela. Otpor namota armature, pomoćnih polova i kompenzacijskog namota mu je 0,023 Ω.

Potrebno je odrediti:

a) vrstu namota armature;

b) magnetski tok u zračnom rasporu glavnog pola.

15. Četveropolnome istosmjernom nezavisno uzbuđenom generatoru od 120 kW i 220 V promjer je armature 400 mm, ima petljasti jednovojni namot i 48 utora sa šest vodiča u utoru. Širina polne papuče glavnog pola je 67 % polnog koraka, a namot nezavisne uzbude ima 500 zavoja po polu. Karakteristika praznog hoda pri nazivnoj brzini vrtnje dana je tablicom:

E [V]	62	122	170	200	220	232	244	252	262
i_u [A]	2	4	6	8	10	12	14	16	18

Valja odrediti:

a) strujni oblog namota armature;
b) protjecanje namota armature kod vrha polne papuče glavnog pola;
c) pad induciranog napona zbog reakcije armature;
d) pad magnetskog napona zbog reakcije armature.

16. Normalno zasićen istosmjerni stroj pri nazivnom naponu i nazivnoj struji ima pad magnetskog napona od 1 000 A po paru polova zbog reakcije armature.

Koliki je pad magnetskog napona zbog reakcije armature pri:

a) nazivnom naponu i 50 % nazivne struje;
b) 50 % nazivnog napona i nazivne struje?

17. Šesteropolnome porednom istosmjernom generatoru od 250 kW i 500 V promjer je armature 530 mm, ima petljasti jednovojni namot i 69 utora s 12 vodiča u utoru uz tri strane svitka ($u = 3$). Promjer mu je kolektora 410 mm. Pomakom četkica suprotno smjeru vrtnje za dvije lamele generator je bio još stabilan.

Treba ustanoviti:

a) da li uzdužna komponenta protjecanja namota armature jača ili slabi osnovno protjecanje poredne uzbude;
b) iznos uzdužne komponente protjecanja namota armature pri zadanom pomaku četkica;
c) broj serijskih zavoja po polu kojima se može kompaundirati generator, a da bude stabilan s četkicama u neutralnoj zoni. Zanemarite utjecaj reakcije armature. Porast protjecanja na glavnom polu zbog rasipanja magnetskog toka iznosi 12,5 %.

18. Istosmjerni motor pri nazivnoj struji ima protjecanje namota armature od 4 000 A po paru polova.

U primjeru kad četkice pomaknemo iz neutralne zone za 30 električkih stupnjeva u smjeru vrtnje, valja odrediti:

a) da li uzdužna komponenta protjecanja namota armature jača ili slabi protjecanje osnovne uzbude;
b) iznos uzdužne komponente protjecanja namota armature pri određenom pomaku četkice.

19. Istosmjerni nezavisno uzbuđeni generator od 20 kW i 110 V ima na armaturi valoviti jednovojni namot s dva zavoja u jednoj strani svitka ($w_s = 2$).

Ispitivanjem je utvrđeno da za dobru komutaciju treba četkice pomaknuti iz neutralne zone za dvije lamele u smjeru vrtnje, no pri tome se mijenja vanjska karakteristika $U = f(I)$. Da bi vanjska karakteristika $U(I)$ ostala nepromijenjena, a četkice ostale pomaknute iz neutralne zone, valja na

glavne polove staviti serijski namot kojim se poništava djelovanje uzdužne komponente protjecanja namota armature.

Potrebno je odrediti:

a) mora li serijski namot jačati ili slabiti osnovnu uzbudu;

b) broj zavoja serijskog namota ako povećanje protjecanja na glavnom polu zbog rasipanja magnetskog toka iznosi 25 %, a zanemaruje se utjecaj reakcije armature.

20. Istosmjerni poredni motor od 20 kW s pomoćnim polovima ima na priključnoj ploči izvedene stezaljke AE i BE. Prije prematanja imao je desni smjer vrtnje i petljasti križani namot armature.

Prilikom prematanja na armaturu je stavljen petljasti nekrižani namot i odgovarajući broj zavoja namota pomoćnog pola. Pri montaži nosač je držača četkica postavljen u stari položaj, a jednako tako su ostali nepromijenjeni svi spojevi i priključci. Kad je motor stavljen nanovo u pogon, zapaženo je da motor ima lijevi smjer vrtnje i da jako iskri već pri najmanjem opterećenju.

Kako ćete najjednostavnije otkloniti iskrenje i ispraviti smjer vrtnje?

21. Na glavne polove istosmjernoga porednog generatora želimo ugraditi serijski uzbudni namot s kojim bismo napon generatora od 230 V u praznom hodu povećali na 240 V pri nazivnom opterećenju. Ispitivanjem je utvrđeno da struja poredne uzbude generatora u praznom hodu pri naponu od 230 V iznosi 5 A, a pri nazivnom opterećenju i naponu od 240 V iznosi 6,5 A. Namot poredne uzbude ima 1 000 zavoja po polu, a struja armature pri nazivnom opterećenju iznosi 500 A.

Potrebno je odrediti:

a) protjecanje serijskog namota;

b) broj zavoja serijskog namota.

22. Četveropolnome istosmjernom nezavisno uzbuđenom generatoru od 80 kW, 220 V i 1 000 min^{-1} promjer armature je 400 mm, dužina paketa limova 200 mm, petljasti je jednovojni namot s 52 utora i po osam vodiča u svakom utoru. Širina polne papuče glavnog pola je 67 % polnog koraka. Karakteristiku magnetiziranja $B_\delta = f(\Theta_0)$ daje tablica:

B_δ [T]	0,47	0,655	0,765	0,88	0,96	1,03	1,07	1,11
Θ_0 [10^3 A po polu]	2	3	4	5	6	7	8	9

Protjecanje namota nezavisne uzbude je 5 000 A po polu, a omjer protjecanja namota pomoćnog pola i armature u simetrali pomoćnog pola iznosi 1,23.

Valja:

a) nacrtati protjecanja namota statora i armature;

b) nacrtati raspodjelu indukcije pod glavnim polom uz pretpostavku jednolikoga zračnog raspora i zanemarenje magnetske vodljivosti izvan polne papuče;

c) odrediti magnetski tok glavnog pola u praznom hodu;

d) izračunati magnetski tok glavnog pola pri nazivnom opterećenju;

e) odrediti broj zavoja namota pomoćnog pola i indukciju u zračnom rasporu pomoćnog pola uz koeficijent proporcionalnosti samoinduktiviteta svitka u komutaciji $\xi = 5 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$.

23. Osmeropolni istosmjerni nezavisno uzbuđeni kompenzirani generator od 100 kW, 230 V i 500 min^{-1} ima promjer armature od 530 mm, dužinu paketa limova 210 mm, petljasti jednovojni namot sa 68 utora i 18 vodiča u utoru ($u = 3$). Širina polne papuče glavnog pola je 62,5 % polnog koraka. Zračni je raspor glavnog pola jednolik, a pri protjecanju nezavisne uzbude od 5000 A indukcija je pod polom 0,9 T. Omjer protjecanja namota pomoćnog pola i kompenzacije prema protjecanju armature iznosi 1,255. Potrebno je:

a) odrediti broj zavoja namota kompenzacije i pomoćnog pola;

b) nacrtati protjecanje namota statora, armature i rezultantno protjecanje;

c) nacrtati raspodjelu indukcije pod glavnim polom uz zanemarenje magnetske vodljivosti izvan polne papuče;

d) odrediti inducirani napon.

24. Istosmjerni generator s podacima prema 22. zadatku ima u utoru četiri strane svitka ($u = 4$).

Treba ustanoviti:

a) *C-vrijednost*, kao pokazatelj kvalitete komutacije pri nazivnoj struji i nazivnoj brzini vrtnje;

b) da li se pri nazivnoj struji i nazivnoj brzini vrtnje može očekivati iskrenje pod četkicama.

25. Četveropolnome istosmjernom stroju promjer armature je 250 mm, ima 39 utora s tri strane svitka u utoru, valoviti jednovojni namot s korakom iz utora 1 u utor 11. Promjer kolektora iznosi 200 mm, a širina četkice po luku 16 mm.

Potrebno je utvrditi:

a) širinu komutacijske zone;

b) može li se stroj izvesti s prekrivanjem glavnog pola od 67 % polnog koraka.

26. Osmeropolni istosmjerni stroj od 1400 A i 390 min^{-1} ima promjer armature od 750 mm, promjer kolektora od 630 mm, dužina mu je paketa limova 440 mm s idealnom dužinom od 444 mm. Dužina je vodiča glava namota armature 380 mm, debljina izolacije između kolektorskih lamela 0,8 mm. Namot je petljasti jednovojni s korakom svitka $y_1 = 38$ lamela. Broj je utora 108 s tri strane svitka u utoru ($u = 3$) uz jedan zavoj po lameli kolektora. Indukcija u zračnom rasporu glavnog pola je 0,92 T.

Jedinične su vodljive vrijednosti rasipanja namota armature za gornji sloj u utoru $\lambda_g = 1{,}054$, za donji sloj u utoru $\lambda_d = 2{,}92$, za međuinduktivitet gornjeg i donjeg sloja u utoru $\lambda_m = 1{,}465$, za glavu zuba $\lambda_{gz} = 0{,}77$ (stroj ima podijeljeni zračni raspor pomoćnog pola i s promjenom napona samoindukcije ne mijenja se zračni raspor kod armature, već onaj kod jarma statora) i za glavu namota $\lambda_{gnk} = 0{,}5$ (zanemaruje se promjena pri raznim širinama četkice).

Odredite vrijednosti snage stroja u zračnom rasporu i srednje (vremenski prosječne) vrijednosti napona samoindukcije ako odnos širine komutacijske zone prema razmaku ivica polnih papuča glavnih polova mora biti $\frac{b_{zk}}{\tau_p(1-\alpha)} = 0{,}6$, i to:

a) za širinu četkice 20 mm;

b) za širinu četkice 16 mm;

c) za širinu četkice 25 mm.

d) Usporedite dobivene rezultate i zaključite što određuje prekrivanje glavnog pola.

27. Za istosmjerni stroj s podacima prema 26. zadatku uz idealnu dužinu pod pomoćnim polom od 452 mm, valja naći koeficijent proporcionalnosti samoinduktiviteta ξ svitka u komutaciji uz primjenu širine četkica:

a) 16 mm;

b) 20 mm;

c) 25 mm.

28. Osmeropolnome istosmjernom stroju od 1 500 A i 400 min^{-1} promjer armature je 750 mm, promjer kolektora 630 mm, dužina paketa limova 440 mm, dužina vodiča glava namota armature 380 mm, širina četkice 20 mm, debljina izolacije između kolektorskih lamela 0,8 mm, srednja širina gornjeg i donjeg svitka u glavi namota 9,6 mm bez razmaka između svitaka istog sloja u glavi namota; ima jednovojni petljasti namot s korakom svitka $y_1 = 39$ lamela, 108 utora s tri strane svitka u utoru ($u = 3$) uz jedan zavoj po lameli kolektora i podijeljeni zračni raspor pomoćnog pola, pri čemu onaj uz armaturu iznosi 12 mm. Vodiči u gornjem sloju su dimenzije 2,5 × 14 mm, a u donjem sloju 1,9 × 18 mm i smješteni su u utor oblika i dimenzija prema slici 13 (u rješenju). Srednja temperatura namota armature u pogonski toplom stanju iznosi 135°C. Odredite:

a) jedinične vodljive vrijednosti rasipanja potrebne za proračun napona samoindukcije, bez utjecaja vrtložnih struja u vodičima namota armature;

b) jedinične vodljive vrijednosti rasipanja uz utjecaj vrtložnih struja u vodičima namota armature za nazivnu brzinu vrtnje od 400 min^{-1};

c) kao pod b), samo za maksimalnu brzinu vrtnje od 1 000 min^{-1};

d) pomak srednje linije (simetrale) zone tamne komutacije pri brzini vrtnje od 1 000 min^{-1} u odnosu prema 400 min^{-1}.

29. Istosmjernom stroju dužina paketa limova je 200 mm, idealna dužina 212 mm, dužina vodiča glava namota 380 mm; ima pet strana svitaka u utoru armature s jednim zavojem između lamela kolektora i prekrivanje četkica $\beta = 3{,}5$. Jedinične vodljive vrijednosti rasipanja namota armature su: za gornji sloj u utoru $\lambda_g = 1$, za donji sloj u utoru $\lambda_d = 3$, za međuinduktivitet gornjeg i donjeg sloja u utoru $\lambda_m = 2$, za glavu zuba $\lambda_{gz} = 1$ i za glavu namota $\lambda_{gnk} = 0{,}5$. Strujni oblog namota armature iznosi 460 $\frac{A}{cm}$, a obodna je brzina 40 ms^{-1}.

Ustanovite koeficijent ulančenja ρ i srednju (vremenski prosječnu) vrijednost napona samoindukcije, pri upotrebi istog utora i istog prekrivanja četkica, za izvedbe namota:

a) dijametralan ($\varepsilon = 0$);

b) skraćen uz skraćenje namota $\varepsilon = 2{,}5$;

c) stepeničast uz skraćenje namota za kraće i duže strane svitaka $\varepsilon_k = \varepsilon_l = 2{,}5$, te broj kraćih strana svitaka $u_l = 3$ i dužih strana svitaka $u_l = 2$.

30. Osmeropolnome istosmjernom stroju od 1 180 A i 1 100 min^{-1} promjer armature je 640 mm, promjer kolektora 535 mm, dužina paketa limova 360 mm; dužina vodiča glava namota 367 mm, debljina izolacije između lamela kolektora 1 mm; ima petljasti jednovojni namot s korakom svitka $y_1 = 47$ i pet strana svitaka u utoru uz jedan zavoj po kolektorskoj lameli. Kolektor ima 380 lamela, a širina četkice je 20 mm. Stroju je podijeljen zračni raspor pomoćnih polova, pri čemu ekvivalentna vrijednost (s Carterovim koeficijentom) zračnog raspora kod armature iznosi 7 mm, a magnetski je napon na njemu 1 517 A.

Jedinične vodljive vrijednosti rasipanja namota armature su: za gornji sloj u utoru $\lambda_g = 0{,}8057$, za donji sloj u utoru $\lambda_d = 2{,}1184$, za međuinduktivitet gornjeg i donjeg sloja u utoru $\lambda_m = 1{,}046$, za glavu zuba $\lambda_{gz} = 0{,}9844$ i za glavu namota $\lambda_{gnk} = 0{,}496$.

Treba odrediti:

a) prostornu raspodjelu napona samoindukcije;

b) srednju vrijednost napona samoindukcije svake strane svitka i srednju (vremensku prosječnu) vrijednost napona samoindukcije svitka u komutaciji;

c) oblik polne papuče pomoćnog pola i prostornu raspodjelu napona induciranoga djelovanjem magnetskoga pomoćnog pola;

d) vrijednost nekompenziranog napona prostorne raspodjele svake strane svitka i srednju (vremenski prosječnu) vrijednost napona svitka;

e) vrijednost koeficijenta nekompenzacije prostorne raspodjele.

31. Šesteropolnome istosmjernom stroju od 970 A i 1 500 min^{-1} promjer armature je 530 mm, promjer kolektora 450 mm, dužina paketa limova 315 mm, dužina vodiča glava namota 370 mm, debljina izolacije između kolektorskih lamela 1 mm; ima jednovojni petljasti namot s korakom svitka $y_1 = 33$, tri strane svitka u utoru uz jedan zavoj po lameli kolektora. Kolektor ima 207 lamela, a širina četkice iznosi 25 mm. Namot kompenzacije ima četiri zavoja po polu, a namot pomoćnih polova tri zavoja po polu. Širina utora armature na vrhu iznosi $o_2 = 11{,}7$ mm, oblik lima pomoćnog pola prikazan je na slici 14 (u rješenju), a koeficijent punjenja limom pomoćnog pola iznosi 97 %.

Jedinične vodljive vrijednosti rasipanja namota armature su: za gornji sloj u utoru $\lambda_g = 0{,}897$, za donji sloj u utoru $\lambda_d = 2{,}333$, za međuinduktivitet gornjeg i donjeg sloja u utoru $\lambda_m = 1{,}216$ i za glavu namota $\lambda_{gnk} = 0{,}484$. Vodljiva je vrijednost rasipanja pomoćnih polova $\Lambda_{pp} = 47$ mm.

Ustanovite:

a) vrijednost nepodijeljenoga zračnog raspora pomoćnog pola;

b) indukciju u jezgri pomoćnog pola i koeficijent rasipanja pomoćnog pola pri nepodijeljenome zračnom rasporu pomoćnog pola;

c) vrijednost drugoga zračnog raspora (kod jarma) pomoćnog pola za izvedbu podijeljenoga zračnog raspora, ako prvi zračni raspor (kod armature) pomoćnog pola iznosi $\delta_{pp} = 10$ mm.

32. Istosmjerni stroj s podacima prema 31. zadatku ima ukupno 24 četkice dimenzija 25 × 32 mm. Pri nepodijeljenome zračnom rasporu pomoćnog pola odredite:

a) komutacijsku snagu po paru polova;

b) kriterij komutacijskog naprezanja K_e.

4.7.2. Rješenja

1. Broj vodiča namota armature (uz $z' = 8$ vodiča u utoru) iznosi $z = Nz' = 472$, a broj pari paralelnih grana za jednovojni valoviti namot je $a = 1$.

Električna vodljivost vodiča iz bakra u hladnom stanju (pri 20°C) je $\varkappa = 57 \frac{\text{Sm}}{\text{mm}^2}$.

a) [Otpor namota armature, prema jednadžbi (3.6–5), u hladnom stanju bit će:

$$R_a = \frac{zl_v}{4a^2q\varkappa} = 0{,}0731\ \Omega.]$$

b) [Inducirani napon, prema izrazu (4.1–4), iznosi:

$$E = \frac{p}{a}\frac{\Phi_{gl}nz}{60} = 236\ \text{V}.]$$

c) Struju armature dobivamo iz relacije (3.6–1), tj.:

$$I_a = 2aI_v = 2a\Gamma q = 122{,}4\ \text{A}.$$

Razvijeni će moment u zračnom rasporu prema izrazu (4.2–3) biti:

$$M = \frac{pz}{2a\pi}\Phi_{gl}I_a = 551{,}7\ \text{Nm}.$$

Korisni moment na osovini motora dobiva ako razvijeni moment u zračnom rasporu smanjimo za moment vlastitih gubitaka M_g, tj.:

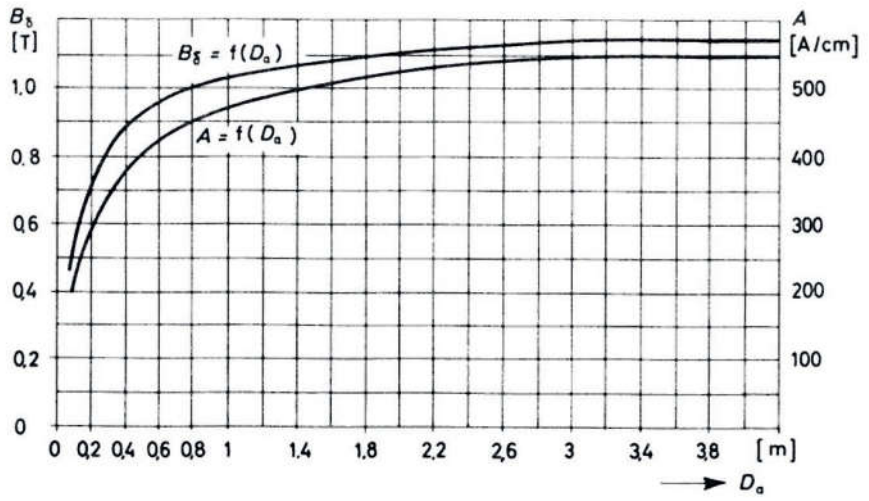
$$M_{os} = M - M_g = 530\ \text{Nm}.$$

[Korisni moment na osovini motora iznosi 530 Nm.]

2. a) Broj zavoja namota armature je:

$$w_a = kw_s = 276.$$

Da bi se odredio magnetski tok glavnog pola, potrebno je poznavati indukciju u zračnom rasporu. Na slici 1. prikazane su uobičajene



Sl. 1.

vrijednosti indukcije B_δ u zračnom rasporu glavnih polova i strujnog obloga A namota armature ovisno o promjeru armature, kojima se uz odstupanja od $\pm 10\,\%$ koristi u gradnji istosmjernih strojeva. Iz dijagrama na slici 1. se za promjer armature $D_a = 500$ mm otčitava vrijednost indukcije $B_\delta = 0{,}92$ T.

Iz izraza (4.1-7) dobivamo $\alpha\tau_p = b_p = 175$ mm, a magnetski tok u zračnom rasporu glavnog pola prema jednadžbi (4.1-2) iznosi:

$$\Phi_{gl} = \alpha\tau_p l B_\delta = 0{,}02576 \text{ Vs}.$$

Zanemarimo li pad napona pod opterećenjem ($E = U$), brzinu ćemo vrtnje odrediti pomoću izraza (4.1-4), tj.:

$$n = \frac{a}{p} \cdot \frac{30E}{w_a \Phi_{gl}} = 970{,}5 \text{ min}^{-1}.$$

Za kontrolu možemo još provjeriti i vrijednost strujnog obloga namota armature, koji uz $w_a = \frac{z}{2}$ prema izrazu (4.2-1) iznosi:

$$A = \frac{I_a w_a}{a D_a \pi} = 398{,}3 \frac{\text{A}}{\text{cm}} = 39\,830 \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

i nalazi se u području uobičajenih vrijednosti sa slike 1.

[Približna je brzina vrtnje istosmjernoga generatora 970 min^{-1}.]

b) S obzirom na izračunatu približnu brzinu vrtnje istosmjernoga generatora od 970 min^{-1} odabiremo šesteropolni asinhroni motor.

Snaga istosmjernoga generatora predana istosmjernoj mreži bit će:

$$P_{2g} = UI = 156{,}4 \text{ kW},$$

a snaga pogonskoga asinhronog motora, uz pretpostavku korisnosti istosmjernoga generatora $\eta = 0{,}9$, iznosi:

$$P_{2m} = \frac{P_{2g}}{\eta} = 173{,}8 \text{ kW}.$$

[Šesteropolni asinhroni motor snage veće od 173,8 kW.]

3. Elektromagnetsko i mehaničko stanje motora pri nazivnom naponu označimo indeksom 1, a za promijenjeni napon indeksom 2. Moment tereta motora, pri pogonu centrifugalnog ventilatora, mijenja se s kvadratom brzine vrtnje. Za odnos momenata ventilatora pri raznim brzinama vrtnje možemo pisati:

$$\frac{M_{v1}}{M_{v2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2. \qquad \text{(A)}$$

Moment motora u općem slučaju prema jednadžbi (4.2-4) bit će:

$$M = k_m \Phi_{gl} I_a,$$

a za serijski motor na nezasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja je magnetski tok Φ_{gl} proporcionalan struji armature I_a, pa je moment motora:

$$M_m = k_1 I_a^2 .$$

Za odnos momenata motora pri raznim brzinama vrtnje možemo pisati:

$$\frac{M_{m1}}{M_{m2}} = \left(\frac{I_{a1}}{I_{a2}}\right)^2 . \tag{B}$$

Inducirani napon u općem slučaju prema izrazu (4.1–5) iznosi:

$$E = k'_e \Phi_{gl} n,$$

a za serijski motor na nezasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja (uz $\Phi_{gl} \sim I_a$) pišemo:

$$E = k_2 I_a n.$$

Za odnos induciranih napona (i napona uz zanemarenje pada napona na otporima) pri raznim brzinama vrtnje dobivamo:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1 I_{a1}}{n_2 I_{a2}} . \tag{C}$$

a) Uvrstimo li omjer struja $\frac{I_{a1}}{I_{a2}}$ iz izraza (C) u (B), rezultat je odnos momenata motora:

$$\frac{M_{m1}}{M_{m2}} = \left(\frac{U_1 n_2}{U_2 n_1}\right)^2 . \tag{D}$$

Budući da u stacionarnom pogonu moraju biti jednaki momenti motora i momenti tereta ventilatora, tj.:

$$\frac{M_{m1}}{M_{m2}} = \frac{M_{v1}}{M_{v2}} ,$$

izjednačenjem izraza (D) i (A) izlazi:

$$\left(\frac{U_1 n_2}{U_2 n_1}\right)^2 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 ,$$

ili brzina vrtnje motora:

$$n_2 = n_1 \sqrt{\frac{U_2}{U_1}} = 1\,000 \sqrt{\frac{0{,}9\,U_1}{U_1}} .$$

$$[n_2 = 948{,}7 \text{ min}^{-1}.]$$

b) Izjednačenje izraza (A) i (B) daje:

$$\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 = \left(\frac{I_{a1}}{I_{a2}}\right)^2 ,$$

a izraza (A) i (D):

$$\left(\frac{U_1 n_2}{U_2 n_1}\right)^2 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2,$$

iz čega se izvodi struja armature:

$$I_{a2} = I_{a1}\sqrt{\frac{U_2}{U_1}} = 26{,}7\sqrt{\frac{0{,}9\,U_1}{U_1}}.$$

$$[I_{a2} = 25{,}33 \text{ A.}]$$

4. a) [Motor će imati 900 min^{-1} pri naponu $U_2 = 178{,}2$ V, a iz mreže uzima struju $I_{a2} = 24{,}03$ A.]

b) Pri radu serijskog motora, u potpuno *zasićenom* dijelu karakteristike magnetiziranja magnetski tok Φ_{gl} je konstantna veličina, tj. ne ovisi o struji opterećenja.
[Motor će imati 900 min^{-1} pri naponu $U_2 = 198$ V, a iz mreže uzima struju $I_{a2} = 21{,}63$ A.]

5. Uzbudni namot istosmjernoga porednog stroja spojen je paralelno namotu armature i struja uzbude ovisi samo o mrežnom naponu, a ne ovisi o struji armature (ili struji opterećenja).

Elektromagnetsko i mehaničko stanje motora pri nazivnom naponu označimo indeksom 1, a za promijenjeni napon indeksom 2.

Za odnos momenata ventilatora pri raznim brzinama vrtnje vrijedi:

$$\frac{M_{v1}}{M_{v2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2. \qquad \text{(A)}$$

Za odnos momenata motora pri raznim brzinama vrtnje, koristeći se izrazom (4.2–4), možemo pisati:

$$\frac{M_{m1}}{M_{m2}} = \frac{\Phi_{gl1} I_{a1}}{\Phi_{gl2} I_{a2}}. \qquad \text{(B)}$$

Za odnos induciranih napona (i napona uz zanemarenje pada napona na otporima) pri raznim brzinama vrtnje, uz pomoć izraza (4.1–5), dobivamo:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\Phi_{gl1} n_1}{\Phi_{gl2} n_2}. \qquad \text{(C)}$$

Za odnos uzbudnih struja pri raznim naponima mreže vrijedi:

$$\frac{i_{u1}}{i_{u2}} = \frac{U_1}{U_2}. \qquad \text{(D)}$$

a) Kad motor radi na nezasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja, magnetski je tok proporcionalan uzbudnoj struji. Odnos magnetskih tokova pri raznim mrežnim naponima, koristeći se izrazom (D), bit će:

$$\frac{\Phi_{gl1}}{\Phi_{gl2}} = \frac{i_{u1}}{i_{u2}} = \frac{U_1}{U_2},$$

a to nakon uvrštavanja u izraz (C) daje:

$$n_2 = n_1.$$

Izjednačimo li izraze (A) i (B) i uvrstimo $\frac{\Phi_{gl1}}{\Phi_{gl2}} = \frac{U_1}{U_2}$, nastaje izraz za struju:

$$I_{a2} = I_{a1} \frac{U_1}{U_2}.$$

[U nezasićenom stanju stroja brzina vrtnje iznosi 800 min^{-1}, a motor uzima iz mreže struju od 47,27 A.]

b) Kad motor radi na potpuno zasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja, magnetski tok ostaje konstantan bez obzira na promjenu uzbudne struje, odnosno mrežnog napona, a iz izraza (C) tad se dobiva:

$$n_2 = n_1 \frac{U_2}{U_1} = 800 \frac{1{,}1\, U_1}{U_1}.$$

Izjednačenjem izraza (A) i (B) uz:

$$\Phi_{gl2} = \Phi_{gl1} \quad \text{i} \quad \frac{n_2}{n_1} = \frac{U_2}{U_1}$$

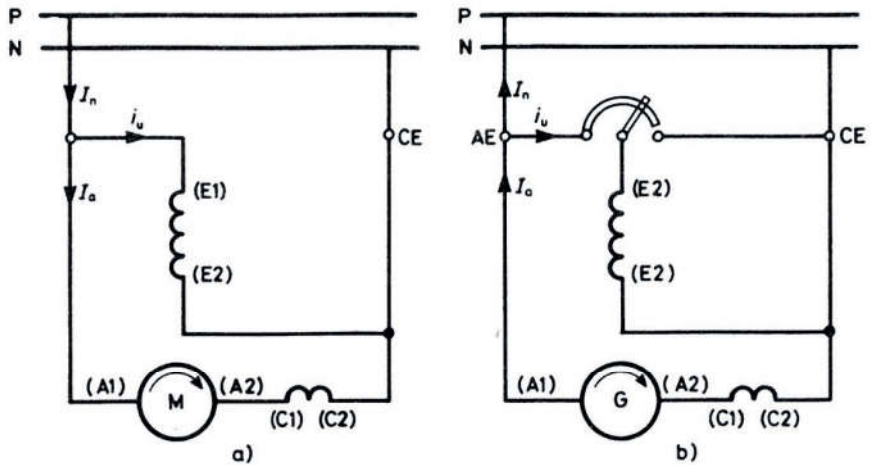
nastaje jednadžba za struju armature:

$$I_{a2} = I_{a1} \left(\frac{I_2}{U_1} \right)^2.$$

[U zasićenom stanju stroja brzina vrtnje je 880 min^{-1}, a motor uzima iz mreže struju od 62,92 A.]

6. [$U_{1-2} = 238$ V, $U_{2-3} = 0$ V, $U_{3-4} = 238$ V i $U_{4-1} = 0$ V]

7. a) Na slici 2.a nacrtana je shema spoja za poredni motor, a na slici 2.b za poredni generator. Iz shema spoja vidi se da pri prijelazu s motorskoga na generatorski rad nije potrebno prespajanje namota. Do istog zaključka



Sl. 2.

dolazimo i ovim razmatranjem: Ako motoru djelovanjem vanjskog momenta brzinu vrtnje učinimo većom od one idealnoga praznog hoda (bez gubitaka u praznom hodu), inducirani će napon biti veći od napona sabirnica i stroj će iz motorskoga prijeći u generatorski rad bez promjene polariteta sabirnica.
[Ne treba mijenjati shemu spoja, već stroju djelovanjem vanjskog momenta brzinu vrtnje učiniti većom od one u idealnome praznom hodu.]

b) Nazivna je struja motora:

$$I_n = \frac{P}{U\eta} = 499{,}5 \text{ A}.$$

Struja poredne uzbude iznosi 1% I_n, tj. i_u = A, a struja je armature prema slici 2.a:

$$I_a = I_n - i_u = 494{,}5 \text{ A}.$$

Inducirani napon u motorskom radu, prema jednadžbi (4.1–9), bit će:

$$E_1 = U - I_a R_a - \Delta U_č = 440 - 494{,}5 \cdot 0{,}048 - 2 = 414{,}26 \text{ V}.$$

Inducirani napon u generatorskom radu, uz napon sabirnica od 440 V, prema (4.1–8) iznosi:

$$E_2 = U + I_a R_a + \Delta U_č = 465{,}74 \text{ V}.$$

Budući da nema mogućnosti za povećanje protjecanja poredne uzbude, magnetski tok ostaje nepromijenjen, a potrebni inducirani napon E_2 može se ostvariti povećanjem brzine vrtnje stroja u generatorskom radu.

Potrebna je brzina vrtnje u generatorskom radu:

$$n_2 = n_1 \frac{E_2}{E_1}.$$

[Brzina vrtnje stroja u generatorskom radu iznosi $n_2 = 1\,124{,}3 \text{ min}^{-1}$.]

c) Dopuštena struja potrošača iznosi:

$$I_n = I_a - i_u = 494{,}5 - 5 = 489{,}5 \text{ A},$$

a snaga je u generatorskom radu:

$$P_2 = UI_n = 440 \cdot 489{,}5 = 215{,}38 \text{ kW}.$$

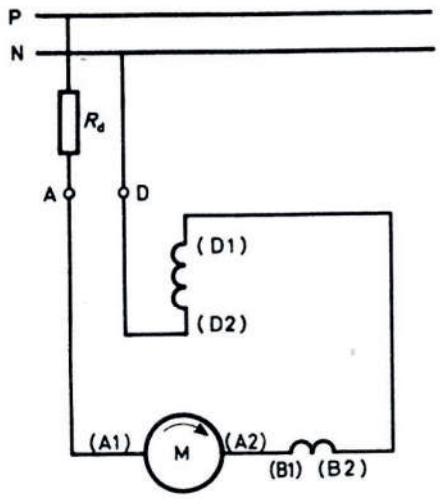
[U generatorskom radu stroj ima snagu od 215,38 kW.]

8. Shema spoja serijskog motora s predotporom prikazana je na slici 3. Polni je korak:

$$\tau_p = \frac{D_a \pi}{2p} = 183{,}26 \text{ mm}.$$

Indukcija u zračnom rasporu serijskog motora koji radi na nezasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja, mijenja se proporcionalno struji. Uz poznatu vrijednost indukcije B_δ pri struji I, indukcija $B_{\delta p}$ u trenutku pokretanja uz struju I_p, iznosi:

$$B_{\delta p} = B_\delta \frac{I_p}{I}.$$



Sl. 3.

Magnetski tok u zračnom rasporu prema izrazu (4.1 – 1) u trenutku pokretanja bit će:

$$\Phi_{gl} = \alpha \tau_p l B_{\delta p} = \alpha \tau_p l B_\delta \frac{I_p}{I} = 1{,}964\, I_p 10^{-4}[\text{Vs}].$$

Moment motora prema izrazu (4.2 – 3) u trenutku pokretanja je:

$$M_p = \frac{pz}{2a\pi} \Phi_{gl} I_p = 0{,}0422\, I_p^2 \text{ [Nm]},$$

iz čega se dobiva struja u trenutku pokretanja:

$$I_p = \sqrt{\frac{M_p}{0{,}0422}} = \sqrt{\frac{400}{0{,}0422}} = 97{,}36 \text{ A}.$$

U trenutku pokretanja motor miruje, nema induciranog napona, a ravnotežu narinutome mrežnom naponu drži pad napona na unutrašnjem otporu R_u motora i predotporu R_d, tj.:

$$U = I_p(R_u + R_d),$$

iz čega izlazi vrijednost predotpora:

$$R_d = \frac{U - I_p R_u}{I_p} = 1{,}97 \ \Omega.$$

[Vrijednost je predotpora u trenutku pokretanja $R_d = 1{,}97\ \Omega$.]

9. Inducirani napon generatora troši se na svladavanje pada napona na unutrašnjem otporu R_u stroja i na dodanom otporu R_d, tj.:

$$E = I_a(R_u + R_d).$$

Ako uvrstimo izraz za inducirani napon E prema (4.1 – 4), iz prethodne jednadžbe nastaje relacija za struju:

$$I_a = \frac{1}{R_u + R_d} \frac{p}{a} \frac{\Phi_{gl} nz}{60}.$$

Moment kočenja u zračnom rasporu prema izrazu (4.2–3) je:

$$M = \frac{pz}{2a\pi} \Phi_{gl} I_a,$$

pa uvrštenjem izraza za I_a on prelazi u:

$$M = 2{,}652 \left(\frac{p\Phi_{gl} z}{a}\right)^2 \frac{n}{R_u + R_d} 10^{-3} = 477{,}5 \text{ Nm}.$$

Korisni moment kočenja na osovini generatora dobivamo ako momentu kočenja u zračnom rasporu dodamo moment vlastitih gubitaka M_g, tj.:

$$M_{os} = M + M_g.$$

[Korisni je moment kočenja na osovini generatora $M_{os} = 500$ Nm.]

10. Električka vremenska konstanta strujnog kruga induktiviteta L i radnog otpora R [L 50] je:

$$T = \frac{L}{R}.$$

U primjeru uzbudnog namota označimo s R_{ml} otpor namota jednog pola, s $w_u\Phi_p$ ulančeni magnetski tok jednog pola, s U_u napon uzbudnog kruga i s i_u struju uzbude.

Za električku vremensku konstantu uzbudnog kruga cijelog stroja dobivamo izraz:

$$T = \frac{w_u\Phi_p}{i_u R_{ml}} \frac{2p}{2p} = \frac{2pw_u\Phi_p}{U_u}.$$

Magnetski tok u zračnom rasporu prema izrazu (4.1–4) iznosi:

$$\Phi_{gl} = \frac{60aE}{pnz} = 0{,}00575 \text{ Vs},$$

a magnetski tok u jezgri pola je magnetski tok u zračnom rasporu Φ_{gl} povećan za rasipni magnetski tok Φ_s, tj.:

$$\Phi_p = \Phi_{gl} + \Phi_s = 1{,}2\ \Phi_{gl} = 0{,}0069 \text{ Vs}.$$

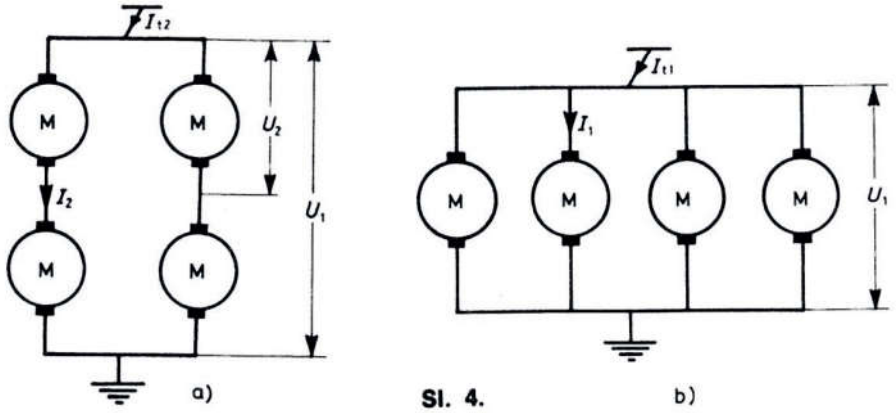
Električka vremenska konstanta uzbudnog kruga iznosi:

$$\left[T = \frac{2pw_u\Phi_p}{U_n} = 0{,}627 \text{ s}.\right]$$

11. a) [$E = 157{,}1$ V]

b) [$T = 0{,}229$ s]

12. Na slici 4.a prikazana je shema spoja motora elektrolokomotive za vožnju na ravnoj pruzi, a na slici 4.b za vožnju na usponu.



Sl. 4.

Za vožnju na ravnoj pruzi

Struja motora, prema shemi na slici 4.a, je:

$$I_1 = \frac{I_{t1}}{4} = 25 \text{ A},$$

a inducirani napon iznosi:

$$E_1 = U_1 - I_1 R_u - \Delta U_č = 550 - 25 \cdot 0{,}8 - 2 \cdot 1 = 528 \text{ V}.$$

Za vožnju na usponu

Moment serijskog motora koji radi na nezasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja prema izrazu (4.2–4) bit će:

$$M = k_m \Phi_{gl} I = k' I^2.$$

Iz omjera momenata motora pri vožnji na ravnoj pruzi i na usponu, tj.:

$$\frac{M_1}{M_2} = \left(\frac{I_1}{I_2}\right)^2,$$

dobivamo struju motora pri vožnji na usponu:

$$I_2 = I_1 \sqrt{\frac{M_2}{M_1}} = 25 \sqrt{\frac{4M_1}{M_1}} = 50 \text{ A}.$$

Za inducirani napon motora, uz napon motora $U_2 = \frac{U_1}{2}$ (vidi sl. 4.b), izlazi:

$$E_2 = U_2 - I_2 R_u - \Delta U_č = 275 - 50 \cdot 0{,}8 - 2 \cdot 1 = 233 \text{ V}.$$

Iz omjera induciranih napona prema izrazu (4.1–5) za vožnju na usponu i na ravnoj pruzi:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{k'_e \Phi_{gl2} n_2}{k'_e \Phi_{gl1} n_1} \quad \text{i} \quad \frac{\Phi_{gl2}}{\Phi_{gl1}} = \frac{I_2}{I_1},$$

slijedi brzina vrtnje motora na usponu:

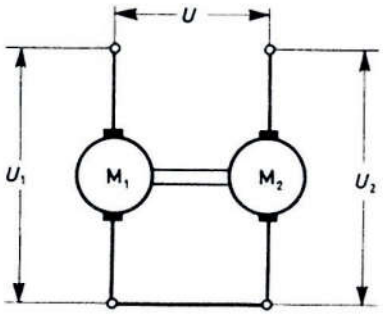
$$n_2 = n_1 \frac{E_2 I_1}{E_1 I_2}.$$

Uz konstantan prijenosni omjer motora i kotača elektrolokomotive za brzinu vožnje elektrolokomotive, na osnovi izraza za brzinu vrtnje motora, možemo pisati:

$$v_2 = v_1 \frac{E_2}{E_1} \frac{I_1}{I_2} = 9{,}93 \ \frac{\text{km}}{\text{h}}.$$

[Brzina vožnje elektrolokomotive na usponu je 9,93 km/sat.]

13. Shema spoja motora predočena je na slici 5, pri čemu se indeks 1 odnosi na prvi motor (manji zračni raspor glavnih polova i brzina vrtnje 600 min^{-1}), a indeks 2 na drugi motor (veći zračni raspor i brzina vrtnje 650 min^{-1}).



Sl. 5. (4.7.)

Pri pojedinačnom priključku motora na nazivni napon U_n, uz korištenje izrazima (4.5–5) i (4.5–9), dobivamo:

$$k'_e \Phi_{gl1} = \frac{E_1}{n_1} = \frac{U_n - I_a R_a}{n_1} = \frac{600 - 50 \cdot 3}{600} = 0{,}975 \ \text{Vmin}$$

$$k'_e \Phi_{gl2} = \frac{E_2}{n_2} = \frac{U_n - I_a R_a}{n_2} = \frac{600 - 50 \cdot 3}{650} = 0{,}9 \ \text{Vmin}.$$

Pri mehaničkom spoju u sklop prema slici 5. oba motora moraju imati brzinu vrtnje n, a suma napona U_1 i U_2 pojedinih motora mora biti jednaka naponu mreže U. Možemo napisati ove jednadžbe:

$$U_1 = k'_e \Phi_{gl1} n + I_a R_a,$$
$$U_2 = k'_e \Phi_{gl2} n + I_a R_a,$$
$$U = U_1 + U_2.$$

a) Rješenjem prethodnih jednadžbi dobivamo brzinu vrtnje sklopa:

$$\left[n = \frac{U - 2 I_a R_a}{k'_e \Phi_{gl1} + k'_e \Phi_{gl2}} = 251 \ \text{min}^{-1}. \right]$$

b) Napon na prvom motoru je $U_1 = k'_e \Phi_{gl1} + I_a R_a$, a na drugome $U_2 = k'_e \Phi_{gl2} + I_a R_a = 240{,}6$ V.

[$U_1 = 259{,}4$ V; $U_2 = 240{,}6$ V]

14. Uz $w_s = 1$ zavoj između lamela kolektora dobivamo broj vodiča namota armature: $z = 2kw_s = 3\,100$.

Za veće istosmjerne strojeve upotrebljava se jednovojni ili dvovojni petljasti namot. Iz zadanih podataka, prema jednadžbi (4.2-1), odredit ćemo strujni oblog namota armature. Za jednovojni petljasti namot ($a = p$) strujni oblog iznosi:

$$A = \frac{Iz}{2aD_a\pi} = 394{,}7 \ \frac{\text{A}}{\text{cm}},$$

a za dvovojni petljasti namot ($a = 2p$) bit će $A = 197{,}35 \ \frac{\text{A}}{\text{cm}}$.

a) Na osnovi usporedbe izračunate i uobičajene vrijednosti strujnog obloga prema slici 1. vidimo da izračunata vrijednost za petljasti jednovojni namot više odgovara uobičajenim vrijednostima.
[Namot armature je petljasti jednovojni s $a = p = 10$.]

b) Magnetski tok u zračnom rasporu glavnog pola iznosi:

[$\Phi_{gl} = 0{,}04266$ Vs.]

15. Uvodno određujemo polni korak τ_p, broj vodiča z i broj pari paralelnih grana a namota armature, te nazivnu struju I_a generatora: $\tau_p = 314{,}16$ mm, $z = 288$, $a = p = 2$ i $I_a = 545{,}5$ A.

a) $\left[A = 312{,}52 \ \frac{\text{A}}{\text{cm}}\right]$

b) Protjecanje namota armature kod vrha polne papuče iznosi:

$$\Theta'_a = \alpha \tau_p A = 0{,}67 \cdot 31{,}416 \cdot 312{,}52 = 6\,578 \text{ A po paru polova}$$

ili:

$$\Theta'_a = \frac{\alpha \tau_p A}{2} = 3\,289 \text{ A po polu.}$$

Budući da je zadana karakteristika praznog hoda $E = f(i_u)$, moramo protjecanje namota armature izraziti u uzbudnoj struji, tj.:

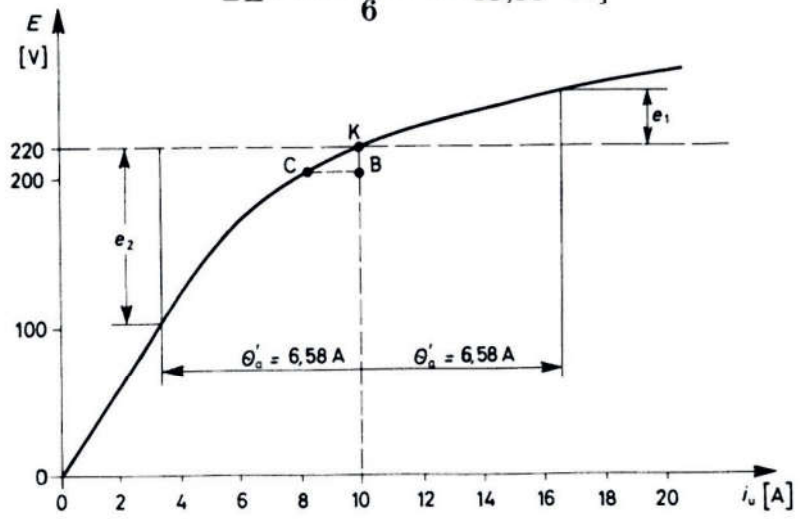
$$\Theta'_a = \frac{\alpha \tau_p A}{2w_u} = 6{,}58 \text{ A.}$$

[Protjecanje namota armature pod vrhom polne papuče glavnog pola, izraženo u uzbudnoj struji, iznosi 6,58 A.]

c) Na slici 6. prikazana je karakteristika praznog hoda $E(i_u)$ i radna točka K u praznom hodu. Od točke K nanesemo lijevo i desno protjecanje namota armature pod vrhom polne papuče. Otčitavanjem sa slike 6. dobivamo $e_2 = 116$ V i $e_1 = 36$ V.

[Pad induciranog napona zbog reakcije armature $\overline{KB}$ (na sl. 6), prema približnom izrazu (4.3–2), bit će:

$$\Delta E = \frac{e_2 - e_1}{6} = 13{,}33 \text{ V.}]$$



Sl. 6.

d) Pad magnetskog napona zbog reakcije armature, izražen u uzbudnoj struji, otčitavamo kao dužinu $\overline{CB}$ na slici 6, tj.:

$$i_{zas} = 1{,}5 \text{ A},$$

ili:

$$V_{zas} = 2 i_{zas} w_u = 1\,500 \text{ A po paru polova.}$$

[Pad magnetskog napona zbog reakcije armature iznosi 1 500 A po paru polova.]

16. a) Pri normalno zasićenome istosmjernom stroju (radna točka na koljenu karakteristike praznog hoda), pad magnetskog napona zbog reakcije armature prema izrazu (4.3–3) iznosi:

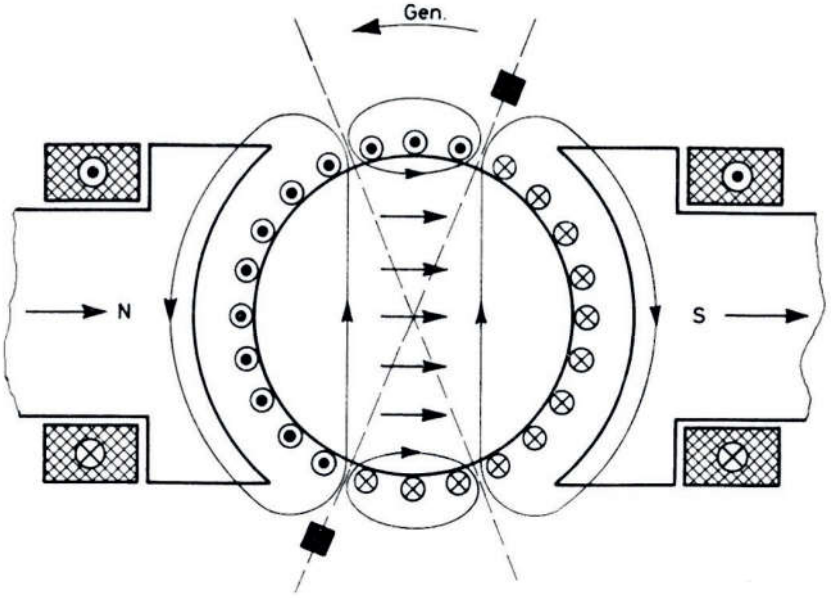
$$[V_{zas} \doteq V_{zasn}\left(\frac{I_a}{I_{an}}\right)^2 = 250 \text{ A po paru polova.}]$$

b) Pri 50 %-tnome nazivnom naponu (radna točka na nezasićenom dijelu karakteristike praznog hoda) pretpostavljamo da je pad magnetskog toka na jednoj polovici polne papuče jednak porastu magnetskog toka na njezinoj drugoj polovici. U tom slučaju nema pada magnetskog napona zbog reakcije armature, tj.:

$$[V_{zas} = 0.]$$

17. Uvodno izračunavamo struju armature I_a (uz zanemarenje struje magnetiziranja), broj vodiča z i broj pari paralelnih grana a namota armature, broj lamela k i širinu s lamela kolektora, te strujni oblog: $I_a = 500$ A, $z = 828$, $a = p = 3$, $k = 207$, $s = 6{,}22$ mm, $A = 414{,}4 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$.

a) Na slici 7. predočeni su smjerovi protjecanja namota poredne uzbude, te poprečne i uzdužne komponente protjecanja namota armature.
[Uzdužna komponenta protjecanja namota armature jača osnovno protjecanje poredne uzbude.]



Sl. 7.

b) Uzdužna komponenta protjecanja namota armature, pri pomaku četkica iz neutralne zone, prema (4.3-8) iznosi $V_č = 2k_{\beta s}\frac{D_a}{D_k}A$.
[$V_č$ = 1 332,8 A po paru polova]

c) Povećanje protjecanja na glavnom polu nastalo rasipanjem magnetskog toka označimo s φ_p. Broj zavoja serijskog namota dobivamo iz izjednačenja uzdužne komponente protjecanja namota armature povećane za koeficijent φ_p i protjecanja serijskog namota, tj.:

$$w_{ser} = \frac{V_č\varphi_p}{2I_a} = 1{,}5 \text{ zavoja po polu.}$$

Možemo ostvariti 1,5 zavoja po polu stavljanjem tri zavoja po paru polova, pri čemu na N-pol stavimo jedan zavoj, a na S-pol dva zavoja, ili tri zavoja na svaki pol uz spajanje namota svih polova u dvije paralelne grane tako da se u svakoj paralelnoj grani moraju nalaziti namoti istoimenih polova. Nužnost spajanja istoimenih magnetskih polova (svi N-polovi ili svi S-polovi) u jednu paralelnu granu proistječe iz uvjeta jednakosti magnetskih tokova svih polova.

[w_{ser} = 1,5 zavoja po polu]

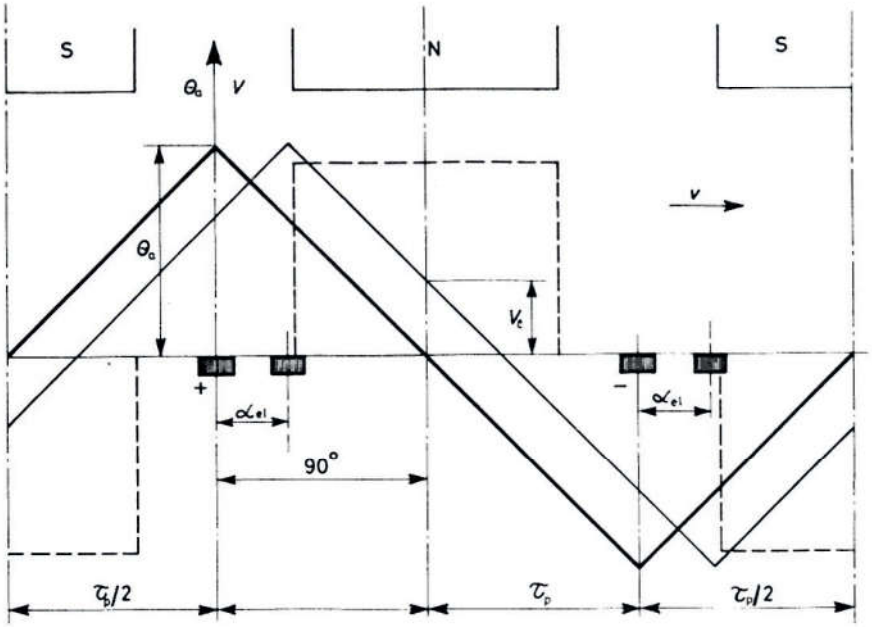
18. Slika 8. sadrži krivulje protjecanja po obodu armature za dva polna koraka, pri čemu je protjecanje namota armature uz četkice u neutralnoj zoni nacrtano debljom crtom, protjecanje namota armature uz pomak četkica iz

neutralne zone tanjom crtom, a protjecanje uzbudnog namota crtkanom linijom. Protjecanje namota glavnih polova crtana su uz zanemarenje rubnih efekata.

a) [Uzdužna komponenta protjecanja namota armature jača osnovno protjecanje uzbude.]

b) Uzdužna komponenta protjecanja namota armature, uz oznake na slici 8, iznosi $V_č = \Theta_a \frac{\beta_{el}}{90}$.

[$V_č$ = 1 333,3 A po paru polova]



Sl. 8.

19. a) [Protjecanje serijskog namota mora jačati protjecanje osnovne uzbude.]

b) [w_{ser} = 5 zavoja po polu]

20. [Pomakom četkica za polni korak.]

21. Protjecanje porednoga uzbudnog namota u praznom hodu, pri naponu generatora od 230 V, bit će:

$$\Theta_{ul} = i_{ul} w_u = 5\,000 \text{ A po polu,}$$

a uz nazivno opterećenje i napon od 240 V:

$$\Theta_{u2} = i_{u2} w_u = 6\,500 \text{ A po polu.}$$

a) Protjecanje serijskog namota mora biti:

$$\Theta_s = \Theta_{u2} - \Theta_{ul} = 1\,500 \text{ A po polu.}$$

[Protjecanje serijskog namota iznosi 1 500 A po polu.]

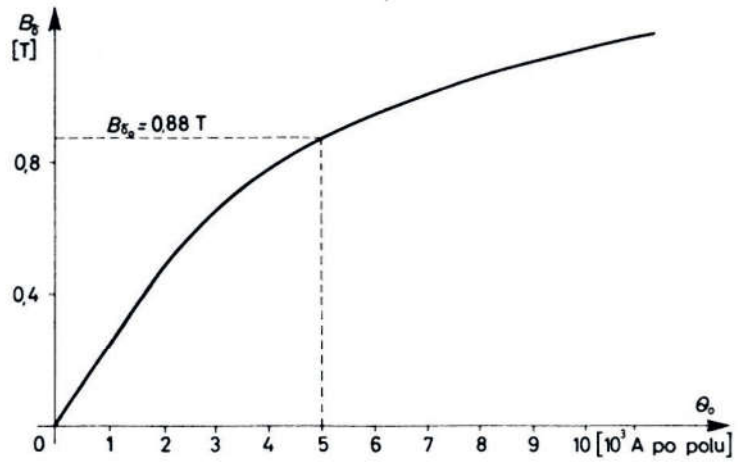
b) Broj zavoja serijskoga uzbudnog namota, uz struju armature od 500 A, iznosi:

$$w_{ser} = \frac{\Theta_s}{I_a} = 3 \text{ zavoja po polu.}$$

[Broj zavoja serijskog namota je tri zavoja po polu.]

22. Uvodno određujemo polni korak τ_p, broj vodiča z i broj zavoja w_a namota armature, te struju armature I_a pri nazivnom opterećenju, broj pari paralelnih grana a i strujni oblog A namota armature: $\tau_p = 314{,}2$ mm, $z = 416$, $w_a = 208$, $I_a = 363{,}6$ A, $a = p = 2$ i $A = 300{,}9 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$.

Karakteristika magnetiziranja $B_\delta = f(\Theta_0)$ prikazana je na slici 9, a smještaj namota statora i armature sa smjerovima struja na slici 10.a.



Sl. 9.

a) Protjecanje namota armature, na simetrali pomoćnog pola, iznosi:

$$\Theta_a = \frac{\tau_p A}{2} = 4\,726{,}5 \text{ A po polu,}$$

a krivulja protjecanja po obodu armature prikazana je slikom 10.b.

Protjecanje namota pomoćnog pola, uz omjer ϑ' prema protjecanju namota armature na simetrali pomoćnog pola, iznosi:

$$\Theta_{pp} = \Theta_a \vartheta' = 5\,813{,}6 \text{ A po polu,}$$

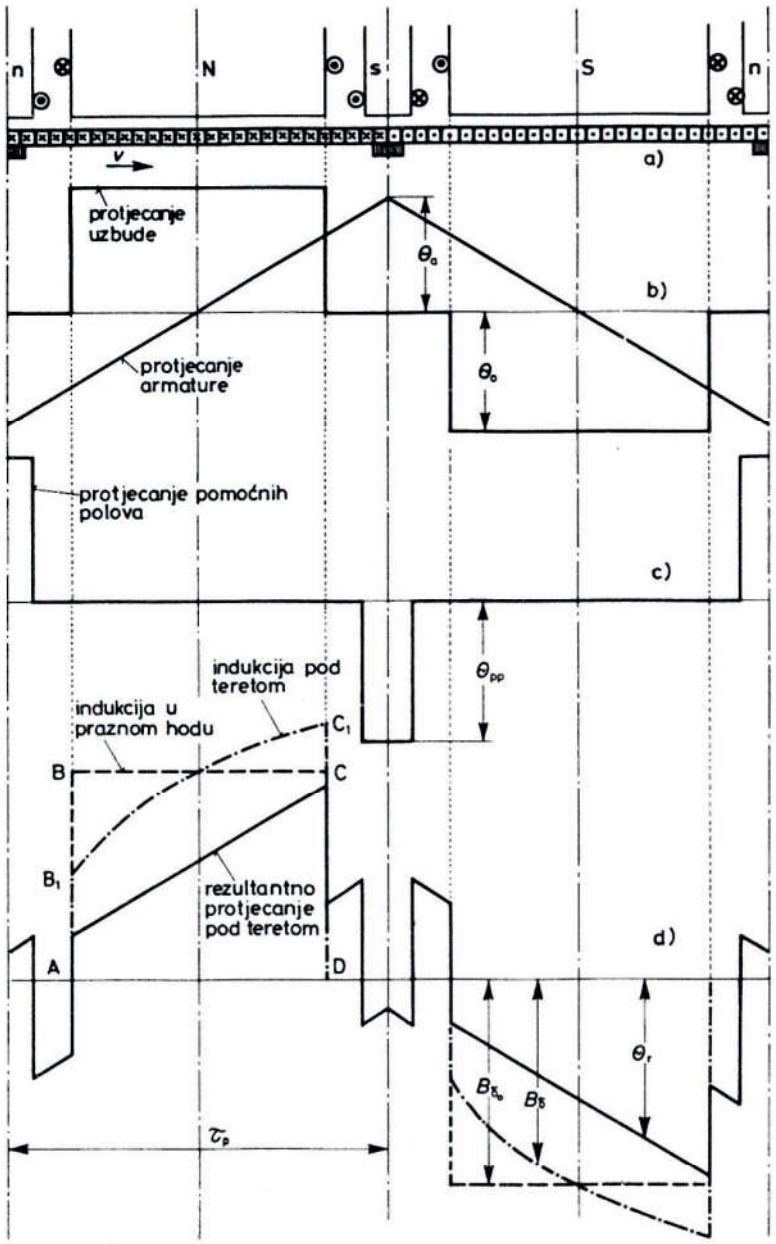
a krivulja protjecanja po obodu armature prikazana je na slici 10.c. Zadano je protjecanje namota nezavisne uzbude $\Theta_0 = 5\,000$ A po polu, a krivulja protjecanja po obodu armature (zanemarivši rubne efekte) predočena je na slici 10.b.

[Protjecanja namota statora i armature su na sl. 10.b i 10.c.]

b) Rezultantno protjecanje u praznom hodu jednako je protjecanju uzbudnog namota, a raspodjelu po obodu armature nalazimo na slici 10.b. Indukciju

u praznom hodu dobivamo ako za protjecanje nezavisne uzbude Θ_0 prema slici 10.b s krivulje magnetiziranja na slici 9. otčitamo pripadnu indukciju $B_{\delta 0}$. U praznom hodu vrijednost je indukcije $B_{\delta 0} = 0{,}88$ T. Raspodjela indukcije po obodu armature u praznom hodu prikazana je na slici 10.d.

Rezultantno protjecanje pod teretom dobivamo zbrojivši protjecanja namota uzbude, armature i pomoćnih polova, a raspodjelu po obodu armature nalazimo na slici 10.d. Krivulju indukcije pod teretom dobivamo ako za svako rezultantno protjecanje Θ_r prema slici 10.d s krivulje magnetiziranja na slici 9. otčitamo pripadnu indukciju B_δ. Raspodjelu indukcije po obodu stroja pod teretom naći ćemo na slici 10.d.



Sl. 10.

Pri nejednolikome zračnom rasporu glavnog pola po obodu armature, vrijednosti indukcije dobivene za jednoliki zračni raspor valja promijeniti proporcionalno magnetskim vodljivostima na pojedinom dijelu polne papuče glavnog pola.
[Raspodjela indukcije u zračnom rasporu glavnog pola po obodu stroja, za prazni hod i opterećenje, prikazana je na sl. 10.d.]

c) Magnetski tok glavnog pola u praznom hodu dobivamo kad integriramo grafički $B_{\delta o}$ pod polnom papučom glavnog pola (zanemaruje se magnetska vodljivost izvan polne papuče) ili analitički koristeći se izrazom (4.1 - 2), tj.:

$$\Phi_{gl} = B_{\delta o}\, \alpha\, \tau_p\, l.$$

$$[\Phi_{gl} = 0{,}037 \text{ Vs.}]$$

d) Magnetski tok glavnog pola u opterećenom stanju dobivamo ako grafički integriramo krivulju B_δ pod polnom papučom glavnog pola (površina omeđena točkama A, B_1, C_1 i D).

Magnetski tok glavnog pola pod opterećenjem, uz otčitanu površinu S, te mjerilo za indukciju M_{jB} i polni korak $M_{j\tau}$, iznosi:

$$[\Phi_{gl} = S l M_{jB} M_{j\tau} = 0{,}0354 \text{ Vs.}]$$

e) Protjecanje namota pomoćnog pola bit će: $\Theta_{pp} = \vartheta' \Theta_a$, a nakon uvrštenja u taj izraz relacija $\Theta_{pp} = I_a w_{pp}$, $\Theta_a = \frac{A \tau_p}{2}$, $A = \frac{I_a w_a}{a D_a \pi}$, $\tau_p = \frac{D_a \pi}{2p}$ i sređivanja dobiva se broj zavoja pomoćnog pola:

$$w_{pp} = \vartheta' \frac{w_a}{4ap} = 1{,}23 \frac{208}{4 \cdot 2 \cdot 2} = 16 \text{ zavoja po polu.}$$

Indukcija u zračnom rasporu pomoćnog pola, prema jednadžbi (4.4 - 11), iznosi:

$$B_{\delta pp} = \xi A = 0{,}1504 \text{ T.}$$

[Pomoćni pol ima 16 zavoja po polu, a indukcija u zračnom rasporu pomoćnog pola iznosi 0,1504 T.]

23. Uvodno izračunavamo polni korak τ_p, broj zavoja namota armature w_a, struju armature I_a pri nazivnom opterećenju, te broj pari paralelnih grana a i strujni oblog A namota armature: $\tau_p = 208{,}13$ mm, $w_a = 612$, $I_a = 434{,}8$ A, $a = p = 4$ i $A = 399{,}5 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$. Smještaj namota statora i armature sa smjerovima struje prikazuje slika 11.a.

a) Za potpunu kompenzaciju mora na vrhu polne papuče glavnog pola biti jednako protjecanje namota kompenzacije i armature, tj.:

$$I_a w_k = \frac{\alpha\, \tau_p\, A}{2}.$$

Uvrstimo li u prethodni izraz:

$$\tau_p = \frac{D_a \pi}{2p} \quad i \quad A = \frac{I_a w_a}{a D_a \pi},$$

dobivamo broj zavoja namota kompenzacije:

$$w_k = \alpha \frac{w_a}{4ap} = 5{,}976 \text{ zavoja po polu.}$$

Budući da broj zavoja mora biti cijeli broj, odabiremo $w_k = 6$ zavoja po polu.

Protjecanje namota pomoćnog pola i kompenzacije je:

$$\Theta_{pp} + \Theta_{ko} = \vartheta' \Theta_a.$$

Uvrsti li se u prethodni izraz $\Theta_{pp} = I_a w_{pp}$, $\Theta_{ko} = I_a w_k$, $\Theta_a = \frac{A \tau_p}{2}$, $A = \frac{I_a w_a}{4ap}$ i $\tau_p = \frac{D_a \pi}{2p}$,

bit će broj zavoja namota pomoćnog pola:

$$w_{pp} = \vartheta' \frac{w_a}{4ap} - w_k = 1{,}255 \frac{612}{444} - 6 = 6 \text{ zavoja po polu.}$$

[Broj zavoja namota pomoćnog pola je šest zavoja po polu, a namota kompenzacije šest zavoja po polu.]

b) Protjecanje namota armature, na simetrali pomoćnog pola, iznosi:

$$\Theta_a = \frac{\tau_p A}{2} = I_a \frac{w_a}{4ap} = 4\,157{,}4 \text{ A po polu,}$$

a krivulju protjecanja po obodu armature nalazimo na slici 11.b.

Protjecanje namota kompenzacije iznosi:

$$\Theta_{ko} = I_a w_k = 2\,608{,}8 \text{ A po polu,}$$

a krivulja protjecanja po obodu armature prikazana je na slici 11.c.

Protjecanje je namota pomoćnog pola $\Theta_{pp} = I_a w_{pp} = 2\,608{,}8$ A po polu, a krivulja protjecanja po obodu armature prikazana je na slici 11.c.

Protjecanje namota nezavisne uzbude je $\Theta_0 = 5\,000$ A po polu, a krivulja protjecanja po obodu armature predočena je na slici 11.b.

[Protjecanja namota statora, armature i rezultantno protjecanje sadrže sl. 11.b, c i d.]

c) [Indukcija u zračnom rasporu glavnih polova iznosi 0,9 T, jednaka je pri praznom hodu i opterećenju, a njezina raspodjela po obodu armature prikazana je na sl. 11.d.]

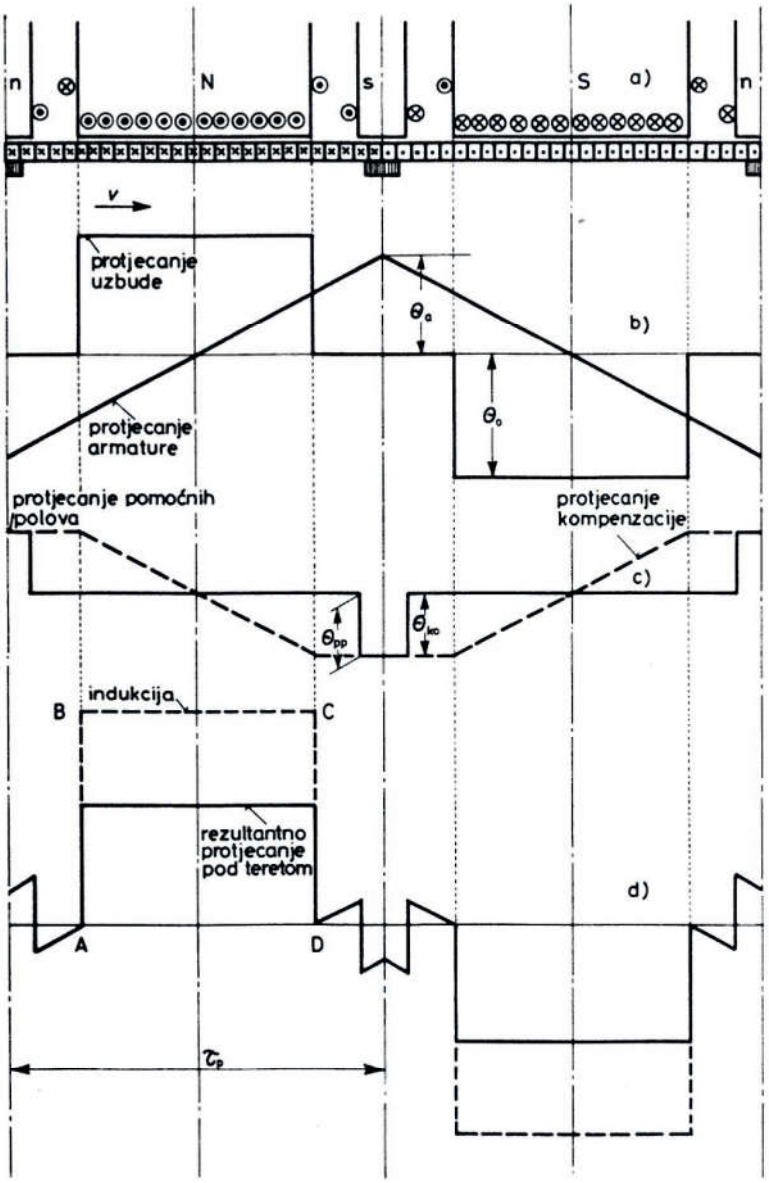
d) Magnetski tok u zračnom rasporu glavnog pola je:

$$\Phi_{gl} = \alpha \tau_p l B_\delta = 0{,}02458 \text{ Vs,}$$

a inducirani napon iznosi:

$$E = \frac{p}{a}\frac{\Phi_{gl} nz}{60} = 250{,}77 \text{ V}.$$

[Inducirani je napon u praznom hodu i pri opterećenju 250,77 V.]



Sl. 11.

24. Broj kolektorskih lamela je $k = Nu = 208$, a broj zavoja po lameli kolektora (uz z' vodiča u utoru) iznosi:

$$w_s = \frac{Nz'}{2k} = 1.$$

a) *C-vrijednost,* kao pokazatelj kvalitete komutacije, prema izrazu (4.4–17) je:

$$[C = nk\frac{I_a}{2a} l w_s^2 \cdot 10^{-7} = 37{,}85].$$

b) Dopuštena C-vrijednost sa slike 4.4–10. za promjer armature od 400 mm je $C = 144$.
[Ne može se očekivati iskrenje četkica jer je stvarna C-vrijednost znatno manja od dopuštene.]

25. Uvodno određujemo korak svitka y_1, broj kolektorskih lamela k, korak lamele kolektora τ_k i polni korak τ_p: $y_1 = 30$, $k = 117$, $\tau_k = 5{,}37$ mm i $\tau_p = 196{,}35$ mm.

a) Širina komutacijske zone prema izrazu (4.4–24) iznosi:

$$b_{zk} = \tau_k \frac{D_a}{D_k}\left[u\left(1 + \left|\frac{N}{2p} - \frac{y_1}{u}\right|\right) - \frac{a}{p}\right] + \frac{D_a}{D_k} b_č.$$

$$[b_{zk} = 41{,}81 \text{ mm}]$$

b) Da se proces komutacije ne odvija pod utjecajem magnetskog polja glavnih polova, mora biti ispunjen uvjet prema relaciji (4.4–22), tj.:

$$b_{zk} < \tau_p(1 - \alpha) = 64{,}8 \text{ mm}.$$

[Stroj se može izvesti s prekrivanjem glavnog pola od 67 % polnog koraka.]

26. Prvo računamo broj kolektorskih lamela k, korak τ_k lamele kolektora, polni korak τ_p i strujni oblog: $k = 324$, $\tau_k = 6{,}109$ mm, $\tau_p = 294{,}52$ mm, $A = 481{,}3 \frac{\text{A}}{\text{cm}}$.

Izvedbu jednovojnoga petljastog namota ustanovljujemo na osnovi vrijednosti:

$$\frac{k}{2p} = \frac{324}{8} = 40{,}5, \qquad \frac{y_1}{u} = \frac{38}{3} = 12{,}66.$$

Budući da je $y_1 = 38$, a $\frac{k}{2p} = 40{,}5$, namot nije dijametralan, već skraćen. Iz odnosa $\frac{y_1}{u} \neq$ cijeli broj zaključujemo da namot nije obični skraćeni, već je stepeničast. Crtanjem sheme namota možemo dalje zaključiti da broj kraćih strana svitaka iznosi $u_k = 1$, a dužih $u_1 = 2$. Skraćenje je namota prema (4.5–1):

$$\varepsilon = \left|\frac{k}{2p} - y_1\right| = \left|\frac{324}{8} - 38\right| = 2{,}5.$$

Skraćenje namota za kraću stranu svitka prema izrazu (4.5–2) je:

$$\varepsilon_k = \left|\frac{N}{2p} - y_{1N}\right| u = \left|\frac{108}{8} - 12\right| \cdot 3 = 4{,}5,$$

a za dužu stranu svitka prema izrazu (4.5–3):

$$\varepsilon_1 = |u - \varepsilon_k| = |3 - 4{,}5| = 1{,}5.$$

a) Širina komutacijske zone prema relaciji (4.4–24) bit će:

$$b_{zk} = \tau_k \frac{D_k}{D_k}\left[u\left(1 + \left|\frac{N}{2p} - \frac{y_1}{u}\right|\right) - \frac{a}{p}\right] + b_č \frac{D_a}{D_k} = 56{,}54 \text{ mm}.$$

Iz zadanog odnosa: $$\frac{b_{zk}}{\tau_p(1-\alpha)} = 0{,}6$$

izlazi moguće prekrivanje glavnog pola:

$$\alpha = (1 - \frac{b_{zk}}{0{,}6\,\tau_p}) = 0{,}68.$$

Općenito je snaga stroja u zračnom rasporu $P = EI_a$, a uvrštenjem:

$$E = \frac{p}{a}\frac{\Phi_{gl} n w_a}{30}, \quad A = \frac{I_a w_a}{a D_a \pi}, \quad \Phi_{gl} = \alpha \tau_p l_i B_\delta$$

dobivamo:

$$P = \frac{\pi^2 \alpha}{60} B_\delta A D_a^2 l_i n\, 10^{-10}[\mathrm{kW}] = 482{,}4\ \mathrm{kW},$$

pri čemu je α prekrivanje glavnog pola [1], B_ξ indukcija u zračnom rasporu glavnog pola [T], A strujni oblog namota armature $[\frac{A}{cm}]$, D_a promjer armature [mm], l_i idealna dužina [mm] i n je brzina vrtnje [min^{-1}].

Idealna širina četkica prema jednadžbi (4.4–20) bit će:

$$b_{či} = b_č - j + (1 - \frac{a}{p})\tau_k = 19{,}2\ \mathrm{mm},$$

a prekrivanje četkica prema izrazu (4.4–21) iznosi:

$$\beta = \frac{b_{či}}{\tau_k} = \frac{19{,}2}{6{,}109} = 3{,}143.$$

Vrijednosti prema izrazima (4.4–19), (4.4–20) i (4.4–21) potrebne za proračun koeficijenta ulančenja stepeničastog namota su:

$$x_w = 1 + \frac{2}{u\beta}\left\{ \sum_{n=1}^{+} (u_k - n)\,(\beta - n) + \sum_{n=1}^{+} (u_l - n)\,(\beta = n) \right\}$$

$$x_w = 1 + \frac{2}{3 \cdot 3{,}143}\left\{[(1-1)\,(3{,}143-1)] + [(2-1)\,(3{,}143-1) + (2-2)\,(3{,}143-2)]\right\}$$

$$x_w = 1 + \frac{2}{3 \cdot 3{,}143}\left\{[0] + [1 \cdot 2{,}143 + 0]\right\} = 1{,}454.$$

$$x_0 = \frac{1}{u\beta}\left\{ \sum_{n=1}^{u_l}\left[\sum_{m=0}^{u_k - 1}\right](\beta - n - m)_+ + \sum_{n=1}^{u_k}\left[\sum_{m=1}^{u_l - 1}\right](\beta - n - m)_+ \right\}$$

$$x_0 = \frac{1}{3 \cdot 1{,}143}\left\{[(3{,}143 - 1 - 0) + (3{,}143 - 2 - 0)] + [(3{,}143 - 1 - 0) + (3{,}143 - 1 - 1)]\right\} = 0{,}697$$

$$x_g = \frac{2}{u\beta}\left\{ u_k\left[\sum_{n=0}^{u_l}\right](\beta - |\varepsilon_k - n|)_+ + \sum_{n=1}^{+} (u_k - n)\,(\beta - \varepsilon_k - n) + \right.$$

$$+ \sum_{n=1}^{+} (u_k - n)\,(\beta - |\varepsilon_k - u_l - n|) + u_l \sum_{n=1}^{u_k} (\beta - |\varepsilon_l - n|)_+ +$$

$$\left. + \sum_{n=1}^{+} (u_l - n)\,(\beta - |\varepsilon_l + n|) + \sum_{n=1}^{+} (u_l - n)\,(\beta - |\varepsilon_l - u_k - n|) \right\}$$

$$x_g = \frac{2}{3 \cdot 3{,}143}\Big\{1\,[(3{,}143 - |4{,}5 - 2|)] + [0] + [0] + 2\,[(3{,}143 - |1{,}5 - 0|) +$$

$$+ (3{,}143 - |1{,}5 - 1|)] + [1\,(3{,}143 - |1{,}5 + 1|)] + [1\,(3{,}143 - |1{,}5 - 1 - 1|)]\Big\} = 2{,}651.$$

Radi boljeg razumijevanja, postojeći članovi pojedinih suma prikazani su u uglatim zagradama.

Srednja vrijednost jedinične vodljive vrijednosti rasipanja strane svitka u utoru prema relaciji (4.5–6) bit će:

$$\lambda_u = \frac{\lambda_g + \lambda_d + 2\lambda_m}{4} = 1{,}726.$$

Koeficijent ulančenja za stepeničasti namot prema jednadžbi (4.5–22) iznosi:

$$\rho = \frac{(x_w + x_o)(\lambda_g + \lambda_d) + x_g \lambda_m}{\lambda_u} = 7{,}203.$$

Srednja (vremenski prosječna) vrijednost napona samoindukcije prema izrazu (4.5–14) je:

$$e_{ssr} = 0{,}658 \frac{I_a D_k}{a b_{\check{c}i}} n w_s^2 [\rho(\lambda_u + \lambda_{gz}) + 2\beta l_g \lambda_{gnk}] \cdot 10^{-10}$$

$$e_{ssr} = 0{,}658 \frac{1\,400 \cdot 630}{4 \cdot 19{,}2} 390 \cdot 1^2 [7{,}203 \cdot 440 \cdot (1{,}726 + 0{,}77) + 2 \cdot 3{,}143 \cdot 380 \cdot 0{,}5]\, 10^{-10}$$

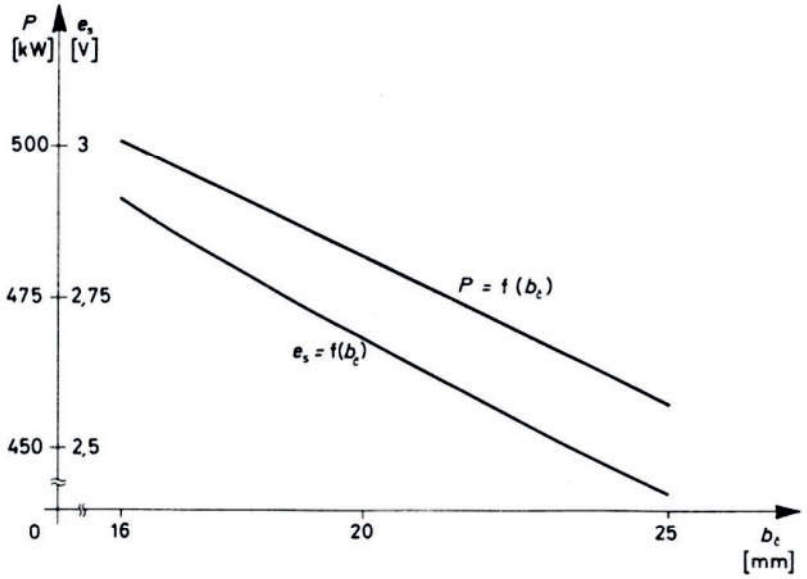
$$e_{ssr} = 2{,}68 \text{ V}.$$

[Snaga je u zračnom rasporu 482,4 kW, a srednja vrijednost napona samoindukcije 2,68 V.]

b) [$\alpha = 0{,}707$, $P = 501{,}6$ kW, $\rho = 6{,}248$ i $e_{ssr} = 2{,}91$ V]

c) [$\alpha = 0{,}646$, $P = 458$ kW, $\rho = 8{,}09$ i $e_{ssr} = 2{,}43$ V]

d) [Na slici 12. prikazane su ostvarene vrijednosti snage P u zračnom rasporu i srednje (vremenski prosječne) vrijednosti napona samoindukcije e_{ssr} ovisno o širini četkice.



Sl. 12.

Iz usporedbe rezultata dobivamo da se snaga stroja mijenja linearno proporcionalno prekrivanju glavnog pola i da sa stajališta termičkog dimenzioniranja treba stroj

izvesti sa što većim prekrivanjem glavnog pola i sa što manjom širinom četkice. No, smanjenjem širine četkice skraćuje se trajanje komutacije te se povećava vrijednost $\frac{di}{dt}$ u svitku koji komutira i vrijednost napona samoindukcije. Sa stajališta komutacijskog dimenzioniranja nastojimo stroj izvesti sa što širom četkicom.

Iz razloženoga može se zaključiti da prekrivanje glavnog pola valja odabrati kompromisno gledajući i na termičko i komutacijsko dimenzioniranje stroja, uz zadovoljavanje uvjeta da na širini komutacijske zone ne smije biti znatnijeg utjecaja magnetskog toka glavnih polova.]

27. a) $[\xi = 4{,}357 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}]$ b) $[\xi = 4{,}025 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}]$

c) $[\xi = 3{,}645 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}]$

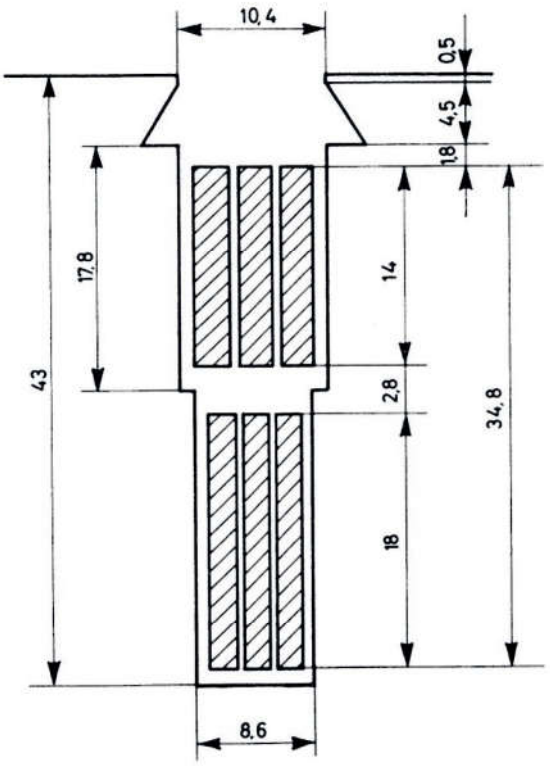
28. Uvodno izračunavamo broj kolektorskih lamela k, korak lamele kolektora τ_k idealnu širinu četkica $b_{či}$, prekrivanje četkica β, polni korak τ_p i širinu zuba b_{zl} na vrhu armature: $k = 324$, $\tau_k = 6{,}109$ mm, $b_{či} = 19{,}2$ mm, $\beta = 3{,}143$, $\tau_p = 294{,}52$ mm i $b_{zl} = 11{,}42$ mm.

a) Jedinične vodljive vrijednosti rasipanja u utoru prema izrazu (4.5–24) uz dimenzije utora na slici 13, iznose:

$$\lambda_g = \frac{h_{vag}}{3b_{u2}} + \frac{h_{22} + h_{23} + a_2}{b_{u2}} = 1{,}102,$$

$$\lambda_d = \frac{h_{vad}}{3b'_{u2}} + \frac{h_{vag} + h_{20} + h_{22} + h_{23} + a_2}{b_{u2}} = 2{,}967,$$

$$\lambda_m = \frac{h_{vad}}{4b'_{u2}} + \frac{h_{vag}}{4b_{u2}} + \frac{h_{22} + h_{23} + a_2}{b_{u2}} = 1{,}514.$$



Sl. 13.

Srednja vrijednost jedinične vodljive vrijednosti rasipanja u utoru prema relaciji (4.5–6) je:

$$\lambda_u = \frac{\lambda_g + \lambda_d + 2\lambda_m}{4} = 1{,}774.$$

Za jediničnu vodljivu vrijednost rasipanja glave zuba prema izrazu (4.5–26) dobivamo:

$$\lambda_{gz} = \frac{b_{zl}}{2\delta_{pp}} + 0{,}3 = \frac{11{,}42}{2 \cdot 12} + 0{,}3 = 0{,}776.$$

Za jediničnu vodljivu vrijednost rasipanja glava namota prema jednadžbi (4.5–27) izlazi:

$$\lambda_{gnk} = \sqrt{\frac{0{,}01\,u\,(l_g + \tau_p)}{0{,}5u(h_{21} - h_{20}) + \beta H'_m - \delta_g}} = 0{,}5.$$

[Jedinične vodljive vrijednosti rasipanja, bez utjecaja vrtložnih struja u vodičima namota armature jesu: $\lambda_u = 1{,}774$, $\lambda_{gz} = 0{,}776$ i $\lambda_{gnk} = 0{,}5$.]

b) Frekvencija u rotoru je:

$$f = \frac{pn}{60} = 26{,}66 \text{ Hz}.$$

Brojna visina vodiča gornjeg sloja prema izrazu (4.5–31.a) bit će:

$$\xi' = \frac{h_v}{503}\sqrt{\frac{b_{Cu2}\varkappa_{hl} f}{b_{u2}} \cdot \frac{255}{235 + \vartheta}} = \frac{14}{503}\sqrt{\frac{2{,}5 \cdot 3 \cdot 57 \cdot 26{,}66}{10{,}4} \cdot \frac{255}{235 + 135}} = 0{,}765,$$

a donjeg sloja $\xi' = 0{,}942$.

Koeficijenti prigušenja za vodiče gornjeg sloja prema izrazu (4.5–31) iznose:

$$\varphi_{(\xi')} = \frac{3}{2\xi'} \cdot \frac{\operatorname{sh} 2\xi' - \sin 2\xi'}{ch\, 2\xi' - \cos 2\xi'} = 0{,}9914,$$

$$\psi_{(\xi')} = \frac{1}{\xi'} \cdot \frac{\operatorname{sh}\xi' + \sin\xi'}{\operatorname{ch}\xi' + \cos\xi'} = 0{,}9887.$$

Jedinične vodljive vrijednosti rasipanja u utoru prema izrazu (4.5–30) bit će:

$$\lambda_g = \frac{h_{vag}}{3b_{u2}}\varphi_{(\xi')} + \frac{h_{22} + h_{23} + a_2}{b_{u2}} = 1{,}099,$$

$$\lambda_d = \frac{h_{vad}}{3b'_{u2}}\varphi_{(\xi')} + \frac{h_{vag}}{b_{u2}}\psi_{(\xi')} + \frac{h_{20} = h_{22} + h_{23} + a_2}{b_{u2}} = 2{,}946,$$

$$\lambda_m = \frac{h_{vad}}{4b'_{u2}}\psi_{(\xi')} + \frac{h_{vag}}{4b_{u2}}\varphi_{(\xi')} + \frac{h_{22} + h_{23} + a_2}{b_{u2}} = 1{,}505.$$

Za srednju vrijednost jedinične vodljive vrijednosti rasipanja u utoru prema izrazu (4.5–6) dobivamo:

$$\lambda_u = \frac{\lambda_g + \lambda_d + 2\lambda_m}{4} = 1{,}764.$$

Jedinične vodljive vrijednosti rasipanja glave zuba i glave namota ostaju nepromijenjene, tj.: $\lambda_{gz} = 0{,}776$ i $\lambda_{gnk} = 0{,}5$.

[Jedinične vodljive vrijednosti rasipanja, uz utjecaj vrtložnih struja u vodičima namota armature, pri nazivnoj brzini vrtnje jesu: $\lambda_u = 1{,}764$, $\lambda_{gz} = 0{,}776$ i $\lambda_{gnk} = 0{,}5$.]

c) $[\lambda_g = 1{,}08,\ \lambda_d = 2{,}749,\ \lambda_m = 1{,}426,\ \lambda_u = 1{,}67,\ \lambda_{gz} = 0{,}776,\ \lambda_{gnk} = 0{,}5]$

d) Budući da je $y_1 = 39$, a $\frac{k}{2p} = 40{,}5$ namot nije dijametralan, već je skraćen. Iz odnosa $\frac{y_1}{u}$ = cijeli broj zaključujemo da je namot običan i skraćen. Skraćenje namota prema jednadžbi (4.5–1) iznosi:

$$\varepsilon = \left|\frac{k}{2p} - y_1\right| = \left|\frac{324}{8} - 39\right| = 1{,}5.$$

Vrijednosti prema izrazima (4.5–15) i (4.5–16) potrebne za proračun koeficijenta ulančenja skraćenog namota su:

$$\varkappa_m = 1 + \frac{2}{u\beta} \sum_{n=1}^{+} (u - n)\ (\beta - n) = 2{,}156,$$

$$\varkappa'_m = \frac{2}{u\beta}\left\{u(\beta - \varepsilon)_+ + \sum_{n=1}^{+} (u - n)\ (\beta - |\varepsilon - n|) + \sum_{n=1}^{+} (u - n)\ (\beta - \varepsilon - n)\right\} = 3{,}0.$$

Za *nazivnu brzinu vrtnje* od 400 min^{-1}:

Koeficijent ulančenja za skraćeni namot prema izrazu (4.5–18) iznosi:

$$\rho = \frac{\varkappa_m(\lambda_g + \lambda_d) + \varkappa'_m\lambda_m}{\lambda_u} = 7{,}503,$$

a napon samoindukcije prema relaciji (4.5–14) je:

$$e_{s1} = 0{,}658\ \frac{I_a D_k}{a b_{\check{c}i}}\ n w_s^2\ [\rho l_{\check{z}}(\lambda_u + \lambda_{gz}) + 2\beta l_g \lambda_{gnk}] \cdot 10^{-10} = 3{,}1\ \text{V}.$$

Za *maksimalnu brzinu vrtnje* od 1 000 min^{-1} dobivamo:

$$\rho = 7{,}505 \text{ i } e_{s2} = 7{,}5\ \text{V}.$$

Pomak simetrale zone tamne komutacije prema izrazu (4.5–32) iznosi:

$$\Delta I_z = \left(\frac{e_{s2}}{e_{s1}\,\frac{n_2}{n_1}} - 1\right) I_a = 48{,}39\ \text{A}.$$

[Pomak simetrale zone tamne komutacije pri brzini vrtnje od 1 000 min^{-1} u odnosu prema 400 min^{-1} iznosi 48,39 A ili 3,23 % nazivne struje.]

29. a) Koeficijent ulančenja ρ možemo naći na dva načina: analitički (računanjem suma) ili grafoanalitički (crtanjem prostorne raspodjele jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja).

U prvome, *analitičkom načinu*, prema izrazu (4.5–15) određujemo vrijednost:

$$\varkappa_m = 1 + \frac{2}{u\beta} \sum_{n=1}^{+} (u - n)\ (\beta - n) = 2{,}771,$$

a zatim prema jednadžbi (4.5–17) koeficijent ulančenja:

$$\rho = 4\varkappa_m = 11{,}085.$$

U drugome, *grafoanalitičkom načinu*, nacrtat ćemo prostornu raspodjelu jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja. Potrebni su parametri:

prema izrazu (4.5–6) $\lambda_u = \frac{\lambda_g + \lambda_d + 2\lambda_m}{4} = 2;$

prema izrazu (4.5 – 50) $H = 4(\lambda_u + \lambda_{gz}) = 12$ mm;

prema izrazu (4.5–51) $H_o = 2\beta\lambda_{gnk}\frac{l_g}{l_ž} = 6{,}65$ mm.

Kad određujemo koeficijent ulančenja ρ (ali ne i oblik polne papuče pomoćnog pola) pomoću prostorne raspodjele jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja, sporedna je sama vrijednost τ'_k (korak lamele kolektora reduciran na promjer armature), no za bilo koju nacrtanu vrijednost τ'_k mora biti održan odnos $b'_{či} = \beta\tau'_k$. Na slici 4.5–25.a prikazana je prostorna raspodjela ukupnih jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja (deblje crte) za dijametralan namot s označenim trajanjem komutacije strana svitaka od *S*1 do *S*5. Ordinate na slici 4.5–25. crtane su u određenom mjerilu.

Koeficijent ulančenja prema jednadžbi (4.5–56) iznosi:

$$\rho = \frac{4}{H}\left(\frac{S_{s1} + S_{s2} + S_{s3} + S_{s4} + S_{s5}}{ub'_{či}} - H_o\right) = 11{,}085.$$

Koeficijent proporcionalnosti samoinduktiviteta svitka u komutaciji prema relaciji (4.5–28) bit će:

$$\xi = \frac{0{,}628}{\beta l}[\rho l_ž(\lambda_u + \lambda_{gz}) + 2\beta l_g\lambda_{gnk}]\cdot 10^{-6} = 6{,}752\cdot 10^{-6}\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}.$$

Srednja (vremenski prosječna) vrijednost napona samoindukcije prema izrazu (4.4–9) iznosi:

$$e_{ssr} = 0{,}2\, w_s\xi v_a Al = 0{,}2\cdot 1\cdot 6{,}752\cdot 10^{-6}\cdot 40\cdot 460\cdot 212 = 5{,}268 \text{ V}.$$

Srednja (vremenski prosječna) vrijednost ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja svitka je:

$$H_{sr} = \frac{S_{s1} + S_{s2} + S_{s3} + S_{s4} + S_{s5}}{ub'_{či}} = 79{,}51 \text{ mm}$$

i u mjerilu prema relaciji (4.5–48):

$$M_j = 0{,}658\frac{I_a D_k}{ab_{či}} nw^2 l_ž\cdot 10^{-10} = 12{,}567\frac{Av_a w_s l_ž}{\beta}\cdot 10^{-8}\frac{\text{V}}{\text{mm}}$$

čini srednju (vremenski prosječnu) vrijednost napona samoindukcije, kako je tankom crtom predočeno na slici 4.5–25.a, tj. $e_{ssr} = 5{,}26$ V.

[Za dijametralni namot dobivamo $\rho = 11{,}085$ i $e_{ssr} = 5{,}26$ V.]

b) [Za skraćen namot bit će $\rho = 8{,}97$, $\xi = 5{,}681\cdot 10^{-6}\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ i $e_{ssr} = 4{,}43$ V, a prostornu raspodjelu ukupnih jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja nalazimo na slici 4.5–25.b.]

c) [Za stepeničast namot izlazi $\rho = 10{,}8$, $\xi = 6{,}61 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ i $e_{ssr} = 5{,}16$ V, a prostorna raspodjela ukupnih jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja prikazana je na sl. 4.5–25.c.]

30. Iz analize namota armature, kolektora i četkica dobivamo rezultate: stepeničast namot, $u_k = 3$, $u_l = 2$, $\varepsilon_k = \varepsilon_l = 2{,}5$, $y_{1N} = 9$, $\tau_p = 251{,}33$ mm, $\tau_k = 4{,}423$ mm, $\tau'_k = 5{,}291$ mm, $b_{či} = 19$ mm, $b'_{či} = 22{,}73$ mm i $\beta = 4{,}296$.

a) Parametri potrebni da odredimo prostornu raspodjelu jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja, jesu:

prema (4.5–61) $H = \lambda_g + \lambda_d + 2\lambda_{gz} = 4{,}344$ mm;

prema (4.5–62) $H_g = \lambda_g + \lambda_{gz} = 1{,}79$ mm;

prema (4.5–63) $H_d = \lambda_d + \lambda_{gz} = 3{,}103$ mm;

prema (4.5–64) $H_m = \lambda_m + \lambda_{gz} = 2{,}03$ mm;

prema (4.5–51) $H_o = 2\beta\lambda_{gnk}\frac{l_g}{l_ž} = 4{,}344$ mm;

prema (4.5–52) $B' = [b_{či} + (u - 1)\tau_k]\frac{D_a}{D_k} = 43{,}89$ mm;

prema (4.5–65) $D = \tau_p - y_{1N}\tau'_k u = 13{,}235$ mm;

prema (4.5–66) $G = u_l\tau'_k - D = -2{,}653$ mm;

prema (4.5–67) $F = \tau_p - (y_{1N} + 1)\tau'_k u = -13{,}22$ mm;

prema (4.5–68) $Q = -F - u_k\tau'_k = -2{,}653$ mm.

Slika 4.5–24.a sadrži prostornu raspodjelu jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja, a slike od 4.5–24.b do 4.5–24.d prostornu raspodjelu ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja kraćih strana svitaka 1, 2 i 3.

Na slici 4.5–24.e prostorna je raspodjela jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja, a na slikama 4.5–24.f i 4.5–24.g prostorna raspodjela ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja dužih strana svitaka 4 i 5.

Na slici 4.5–24.h nalazimo prostornu raspodjelu ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja svih strana svitaka jednog utora, pri čemu vrijednosti od *S*1 do *S*5 označavaju trajanje komutacije pojedine strane svitaka od 1 do 5.

Mjerilo za pretvorbu vodljive vrijednosti rasipanja u trenutnu vrijednost napona samoindukcije prema relaciji (4.5–48) iznosi:

$$M_j = 0{,}658\frac{l_a D_k}{a b_{či}} n w_s^2 l_ž \cdot 10^{-10},$$

a prostorna raspodjela ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja na slici 4.5–24.h u izračunatom mjerilu znači prostornu raspodjelu napona samoindukcije. [Prostorna raspodjela napona samoindukcije prikazana je na sl. 4.5–24.h.]

b) Površina prostorne raspodjele ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja pojedinih strana svitaka, u mjerilu označenome na slici 4.5–24, iznosi: $S_{s1} = 722$ mm², $S_{s2} = 753$ mm², $S_{s3} = 693$ mm², $S_{s4} = 725$ mm² i $S_{s5} = 746$ mm².

Srednja vrijednost napona samoindukcije pojedine strane svitka prema izrazu (4.5–53) bit će: $e_{s1} = \frac{S_{s1}}{b'_{či}} M_j = 6{,}88$ V, $e_{s2} = 7{,}17$ V, $e_{s3} = 6{,}6$ V, $e_{s4} = 6{,}9$ V i $e_{s5} = 7{,}1$ V.

Za srednju (vremenski prosječnu) vrijednost napona samoindukcije svih strana svitaka u utoru prema relaciji (4.5–54), dobivamo:

$$e_{ssr} = \frac{e_{s1} + e_{s2} + e_{s3} + e_{s4} + e_{s5}}{u} = 6{,}93 \text{ V}.$$

[Srednja vrijednost napona samoindukcije pojedinih strana svitaka je $e_{s1} = 6{,}88$ V, $e_{s2} = 7{,}17$ V, $e_{s3} = 6{,}6$ V, $e_{s4} = 6{,}9$ V i $e_{s5} = 7{,}1$ V, a srednja (vremenski prosječna) vrijednost napona samoindukcije svitka $e_{ssr} = 6{,}93$ V.]

c) Pretpostavljeni oblik polne papuče pomoćnog pola (uz $\delta_{pp} = 30$ mm i $b_{pp} = 45$ mm) i prostorna raspodjela magnetske vodljivosti zračnog raspora (uz ekvivalentni zračni raspor $\delta'_{pp} = 7$ mm u simetrali pomoćnog pola) prikazani su na slici 4.5–26.a, a krivulje $\delta'_{pp}(x)$ i $\frac{1}{\delta_{pp}}(x)$ na slici 4.5–26.b.

Indukcija u zračnom rasporu na simetrali pomoćnog pola prema izrazu (4.5–69) iznosit će:

$$B_{\delta ppm} = \mu_o V_{\delta pp} \frac{1}{\delta'_{kk}} \cdot 10^3 = 0{,}2723 \text{ T}.$$

Krivulja $\frac{1}{\delta'_{pp}}(x)$ na slici 4.5–26.b u mjerilu prema izrazu (4.5–70):

$$M_j = \mu_o V_{\delta pp} \cdot 10^3 = 0{,}4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \cdot 1\,517 \cdot 10^3 = 1{,}906 \frac{\text{T}}{\text{mm}},$$

predočuje prostornu raspodjelu indukcije u zračnom rasporu pomoćnog pola.

Prosječna je vrijednost napona e_{pp} u strani svitka prema izrazu (4.5–71):

$$e_{ppx} = 5{,}23 \; D_a (l_{pp} + \delta_{pp}) n w_s (B_{\delta pp+} + B_{\delta pp-}) 10^{-8}$$

i jednaka je za kraće i duže strane svitaka, a na simetrali pomoćnog pola iznosi $e_{pp} = 7{,}36$ V.

[Oblik polne papuče pomoćnog pola nalazimo na sl. 4.5–26.a, a prostorna je raspodjela napona $e_{pp}(x)$ na sl. 4.5–26.b.]

d) Slika 4.5–27. sadrži prostornu raspodjelu napona samoindukcije $e_s(x)$ i napona $e_{pp}(x)$ induciranoga djelovanjem magnetskog toka pomoćnog pola posebno za svaku stranu svitaka od 1 do 5.

Isjenčene površine pojedinih strana svitaka u mjerilu označenome na slici 4.5–27 su $\Delta S_{s1} = 42{,}3$ mm^2, $\Delta S_{s2} = 53$ mm^2, $\Delta S_{s3} = 110{,}4$ mm^2, $\Delta S_{s4} = 94{,}3$ mm^2 i $\Delta S_{s5} = 59{,}2$ mm^2.

Srednja vrijednost nekompenziranog napona prostorne raspodjele pojedine strane svitka prema izrazu (4.5–72) iznosi:

$$\Delta e_{pr1} = \frac{\Delta S_{s1}}{b'_{či}} M_j = 0{,}403 \text{ V i, dalje: } \Delta e_{pp2} = 0{,}505 \text{ V}, \; \Delta e_{pr3} = 1{,}05 \text{ V},$$

$\Delta e_{pr4} = 0{,}898$ V i $\Delta e_{pr5} = 0{,}564$ V.

Srednja (vremenski prosječna) vrijednost nekompenziranog napona prostorne raspodjele svih strana svitaka u utoru prema izrazu (4.5–73) bit će:

$$\Delta e_{pr} = \frac{\Delta e_{pr1} + \Delta e_{pr2} + \Delta e_{pr3} + \Delta e_{pr4} + \Delta e_{pr5}}{u} = 0{,}684 \text{ V}.$$

[Srednja vrijednost nekompenziranog napona prostorne raspodjele za pojedinu stranu svitka je $\Delta e_{pr1} = 0{,}403$ V, $\Delta e_{pr2} = 0{,}505$ V, $\Delta e_{pr3} = 1{,}05$ V, $\Delta e_{pr4} = 0{,}898$ V i $\Delta e_{pr5} = 0{,}564$ V, a srednja (vremenski prosječna) vrijednost svitka je 0,684 V.]

e) Koeficijent nekompenzacije prostorne raspodjele prema jednadžbi (4.5-74) iznosi:

$$k_{epr} = \frac{\Delta e_{pr}}{e_{ssr}} = \frac{0{,}684}{6{,}93} = 0{,}0987.$$

Budući da koeficijent nekompenzacije prostorne raspodjele odgovara minimalnoj vrijednosti prema slici 4.5-28, može se zaključiti da pretpostavljeni oblik polne papuče pomoćnog pola sa slike 4.5-26.a zadovoljava.
[Koeficijent je nekompenzacije prostorne raspodjele 9,87 %.]

31. Rezultati uvodno izračunatih podataka su: N = 69 utora, skraćen namot armature, $\varepsilon = 1{,}5$, $\tau_k = 6{,}83$ mm, $b_{či} = 24$ mm, $\beta = 3{,}514$, $\tau_p = 277{,}5$ mm, $\rho = 7{,}905$, $b_{zk} = 57{,}6$ mm, $\lambda_u = 1{,}4155$, $\tau_{u2} = 24{,}131$ mm i $b_{zl} = 12{,}431$ mm.

a) Uz pretpostavljeni zračni raspor pomoćnog pola $\delta_{pp} = 13$ mm, jedinična će vodljiva vrijednost rasipanja glave zuba prema izrazu (4.5-26) biti:

$$\lambda_{gz} = \frac{b_{zl}}{2\delta_{pp}} + 0{,}3 = 0{,}778,$$

a Carterov koeficijent [L 50]:

$$k_{c3} = \frac{o_2 + 5\delta_{pp}}{o_2 \dfrac{\tau_{u2} - o_2}{\tau_{u2}} + 5\delta_{pp}} = 1{,}08.$$

Srednja (vremenski prosječna) vrijednost napona samoindukcije prema relaciji (4.5-14) iznosi:

$$e_{ssr} = 0{,}658 \frac{I_a D_k}{a b_{či}} n w_s^2 [\rho l_ž (\lambda_u + \lambda_{gz}) + 2\beta l_g \lambda_{gnk}] 10^{-10} = 4{,}021 \text{ V}.$$

Za relativni pretičak protjecanja namota pomoćnih polova i kompenzacije nad protjecanjem armature dobivamo:

$$\vartheta'' = 4ap \frac{w_k + w_{pp}}{w_a} + 0{,}7 \frac{b_{zk}}{\tau_p} - 1 = 0{,}3627.$$

Uz vrijednosti:

$$\frac{\delta_{pp}}{b_{\delta pp}} = \frac{13}{30} = 0{,}433 \text{ i } \frac{b_{zk}}{b_{\delta pp}} = \frac{57{,}6}{30} = 1{,}92$$

omjer $k_{pp} = f\left(\dfrac{\delta_{pp}}{b_{\delta pp}}; \dfrac{b_{zk}}{b_{\delta pp}}\right)$ sa slike 4.5-12. bit će $k_{pp} = 0{,}84$.

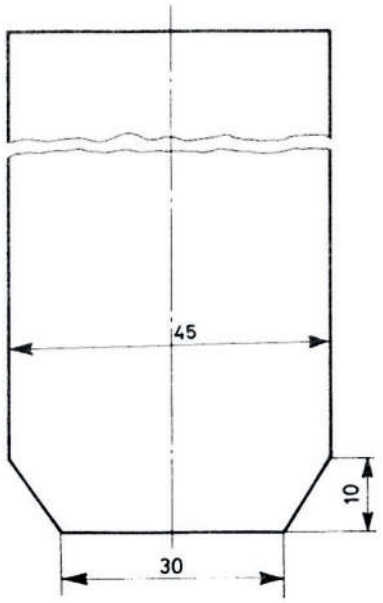
Zračni raspor u simetrali pomoćnog pola prema jednadžbi (4.5-39) iznosi:

$$\delta_{pp} = \frac{3{,}28\ \vartheta'' I_a w_a D_a n w_s^2 l_{pp} k_{pp}}{e_{ssr} a p k_{c3}} \cdot 10^{-11} = 12{,}86 \text{ mm}.$$

Pretpostavljena i izračunata vrijednost zračnog raspora pomoćnog pola razlikuju se za manje od 2 %, pa izračunata vrijednost odgovara stvarnoj vrijednosti jer je razlika minimalna.
[Nepodijeljeni je zračni raspor pomoćnog pola 12,86 mm.]

b) Srednja (vremenski prosječna) vrijednost indukcije u zračnom rasporu pomoćnog pola prema izrazu (4.5–40) iznosi:

$$B_{\delta pp} = \frac{0{,}15\ e_{ssr}}{p\tau_p n w_s^2 (l_{pp} + \delta_{pp})} \cdot 10^8 = 0{,}1473\ \text{T}.$$



Sl. 14.

Za indukciju u jezgri pomoćnog pola prema slici (4.5–41) izlazi:

$$B_{pp} = \frac{B_{\delta pp}(l_{pp} + \delta_{pp})\ (b_{\delta pp} + 2{,}5\delta_{pp}) + \mu_o I_a w_{pp} \Lambda_{pp} 10^4}{l_{pp} b_{pp} k_{ž}} = 0{,}3446\text{T}.$$

Koeficijent rasipanja pomoćnog pola prema jednadžbi (4.5–42) iznosi:

$$\sigma_{pp} = \frac{B_{pp} l_{pp} b_{pp} k_{ž}}{B_{\delta pp}(l_{pp} + \delta_{pp})(b_{\delta pp} + 2{,}5\delta_{pp})} = 1{,}57.$$

[Indukcija u jezgri pomoćnog pola je 0,3446 T, a koeficijent rasipanja pri nepodijeljenome zračnom rasporu pomoćnog pola 1,57.]

c) Uz zračni raspor kod armature $\delta_{pp} = 10$ mm, jedinična vodljiva vrijednost rasipanja glave zuba prema izrazu (4.5–26), Carterov koeficijent, srednja (vremenski prosječna) vrijednost napona samoindukcije prema izrazu (4.5–14) i srednja (vremenski prosječna) vrijednost indukcije u zračnom rasporu pomoćnog pola prema izrazu (4.5–40) iznose: $\lambda_{gz} = 0{,}9215$, $k_{c3} = 1{,}101$, $e_{ssr} = 4{,}235$ V i $B_{\delta pp} = 0{,}1565$ T.
Iz prostorne raspodjele napona e_{pp} induciranoga djelovanjem magnetskog toka pomoćnog pola (uz $e_{pp} = e_s$) dobivamo indukciju zračnog raspora pomoćnog pola u osi pola $B_{\delta ppm} = 0{,}1803$ T.

Za magnetski napon prvoga zračnog raspora prema relaciji (4.5–37) izlazi:

$$V_{\delta pp} = \frac{1}{\mu_o} B_{\delta ppm} \delta_{pp} k_{c3} \cdot 10^{-3} = 1579{,}7\ \text{A po polu}.$$

Magnetski napon drugoga zračnog raspora (kod jarma) prema izrazu (4.5–44) iznosi:

$$V_{\delta j} = \Theta_{pp} - \left[V_{\delta pp} + \Theta_a \left(1 - 0{,}7 \frac{B_{zk}}{\tau_p}\right) - \Theta_{ko} \right] = 443{,}2 \text{ A po polu.}$$

Indukcija u jezgri pomoćnog pola prema izrazu (4.5–46) bit će:

$$B_{pp} = \frac{B_{\delta ppm}(l_{pp} + \delta_{pp})(b_{\delta pp} + 2{,}5\delta_{pp}) + \mu_o \left[V_{\delta pp} + \Theta_a \left(1 - 0{,}7 \frac{b_{zk}}{\tau_p}\right) - \Theta_{ko} \right] A_{pp} 10^4}{l_{pp} b_{pp} k_{\check{z}}} =$$

$$= 0{,}3404 \text{ T.}$$

Vrijednost drugoga zračnog raspora prema jednadžbi (4.5–45) iznosi:

$$\delta_j = \frac{V_{\delta j} b_{pp}}{\frac{B_{pp} b_{pp}}{\mu_o} 10^{-3} - 2{,}5\ V_{\delta j}}$$

[Drugi je zračni raspor (kod jarma) pmoćnog pola $\delta_j = 1{,}8$ mm.]

32. Iz rješenja 31. zadatka koristimo se rezultatima $\tau_k = 6{,}83$ mm, $\beta = 3{,}514$ i $e_{ssr} = 4{,}021$ V, a uvodno izračunamo još $I_v = 161{,}7$ A, $v_k = 35{,}34$ ms^{-1} i $L_{\check{c}} = 128$ mm.

a) Komutacijska snaga po paru polova, prema izrazu (4.6 – 21), iznosi:

$$[P_k = \beta e_{ssr} I_v = 3{,}514 \cdot 4{,}021 \cdot 161{,}7 = 2284{,}8 \text{ W.}]$$

b) Kriterij će komutacijskog naprezanja K_e prema izrazu (4.6 – 22), nakon sređivanja jedinica, biti:

$$\left[K_e = \frac{e_{ssr} I_v v_k}{2\tau_k L_{\check{c}}} \cdot 10^2 = 1314{,}2 \ \frac{\text{Wm}}{\text{scm}^2} \right].$$

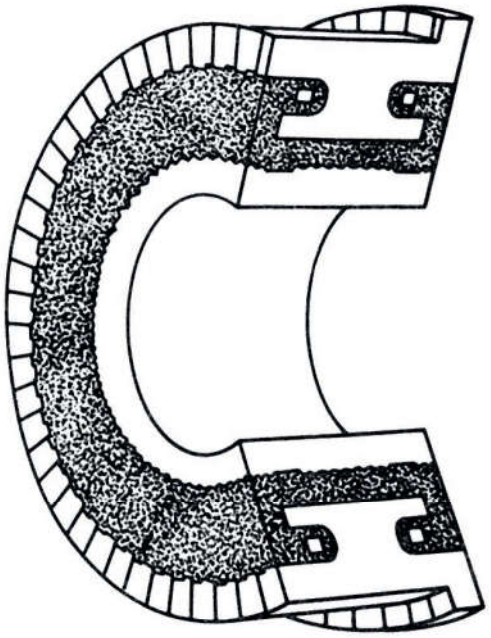
5. SKLOP ZA KOMUTACIJU

Sklop za komutaciju kolektorskog (istosmjernog i izmjeničnog) stroja u osnovi obuhvaća kolektor, četkice i držače četkica. Kolektor, spojen s namotom armature, nalazi se na rotoru i vrti se zajedno s njim, a četkice i njihovi držači smješteni su na statoru i miruju (teorijski moguća izvedba kolektorskog stroja s namotom armature i kolektorom koji miruju, te s držačima četkica i četkicama koje rotiraju sa statorom, ne izvodi se u praksi). Od svih dijelova sklopa za komutaciju osnovni je problem kolektor u vrtnji, a problematika (teškoće) se povećava s veličinom stroja i s porastom brzine vrtnje, tj. s rastom komutacijskih i mehaničkih naprezanja. Tako za male univerzalne motore redovito nema teškoća s komutacijom i sklopom za komutaciju, a kod velikih valjačkih strojeva, koji imaju još i visoka strujna preopterećenja, komutacija i kolektor ograničavaju mogućnost izvedbe istosmjernog stroja određene snage i brzine vrtnje.

Sva nastojanja da se upotrijebi elektromotor bez kolektora u elektromotornim pogonima gdje je potrebno brzo i ekonomično podešavanje brzine vrtnje u širem području, nisu do danas dala pozitivne rezultate. Iz razloženoga se nameće potreba detaljnijeg upoznavanja s kolektorom, četkicama i držačima četkica.

5.1. Kolektor

Težište je problema s kolektorom u činjenici da se njegov aktivni dio sastoji od velikog broja lamela, kojih ima i po nekoliko stotina, a ponekad i znatno više od tisuću. Te lamele moraju biti dobro izolirane međusobno i prema tijelu stroja jer se, usprkos velikim centrifugalnim i termičkim silama kojima su lamele



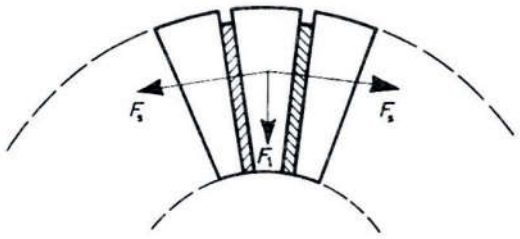
Sl. 1. Izvedba kolektora s plastičnom masom

izložene, ne smiju dopustiti deformacije klizne kolektorske površine kako ne bi četkice i pri najvećim obodnim brzinama, do cca 80 ms^{-1}, odskakivale od klizne površine kolektora i prekidanjem struje onemogućile pogon.

Budući da lamele moraju biti međusobno izolirane, ne mogu biti učvršćene nekim krutim dosjedom. Od svih načina kojima se pokušao riješiti problem konstrukcije kolektora, ostale su praktički samo dvije izvedbe:

a) Mali kolektori za motore malih snaga kojima su kolektorske lamele uprešane u plastičnu masu, kako je to prikazano na slici 1. Plastična masa služi kao glavina kolektora i kao izolacija između lamela. Prsteni na obje strane mehaničko su pojačanje plastične mase.

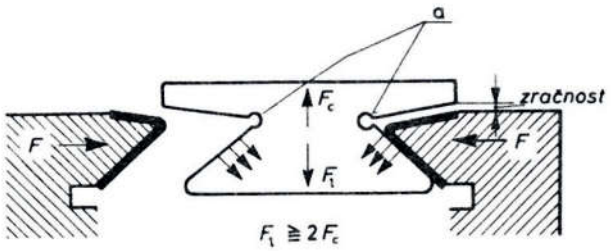
b) Veći kolektori obično se grade u svodnoj izvedbi. Lamele su međusobno učvršćene svodnim pritiskom, koji djeluje na cijeloj bočnoj površini lamele, kako se to vidi na slici 2.



Sl. 2. Svodna izvedba kolektora

Razlikujemo dvije svodne izvedbe kolektora: onu s lastinim repom i tzv. turboizvedbu. Može se tvrditi da se u više od 95 % slučajeva upotrebljava izvedba s lastinim repom, shematski prikazana na slici 3, a turboizvedba, predočena na slici 4, dolazi u obzir samo za strojeve velikih obodnih brzina. Prikažimo ukratko kako se ostvaruje svodni pritisak za svodnu izvedbu kolektora.

Pri izvedbi s lastinim repom stežu se lamele između dva konusa tako da na lamele, odnosno na njihov lastin rep pritišću samo unutrašnje (prema osovini) strane konusa, dok između vanjskih strana konusa i lamela mora postojati zračnost. Na taj se način postiže da sila F, kojom se stežu konusi, daje u lameli

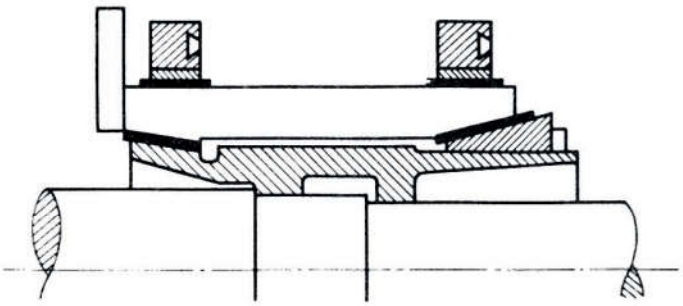


Sl. 3. Svodna izvedba kolektora s lastinim repom

rezultirajuću silu F_l, koja jednim dijelom drži ravnotežu centrifugalnoj sili F_c, a drugim dijelom stvara svodnu silu F_s, kojom se lamele učvrste međusobno da bi kolektor u vrtnji bio mehanički stabilan. Smjer djelovanja sila F, F_l, F_c i F_s nalazimo na slikama 2. i 3.

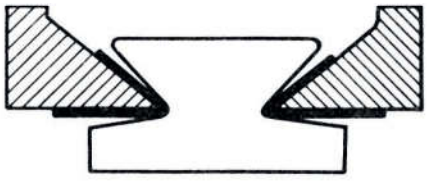
Kolektorski se oblog sastoji od lamela i međuizolacija. Svodna sila F_s djeluje na površini cijele stranice jedne lamele i mora biti tako velika da cijeli kolektorski oblog postaje jedno, samo u sebi ukrućeno tijelo. Vrijednosti sila određuju se u osnovi iz uvjeta da je kolektor mehanički stabilan pri minimalnoj radnoj temperaturi i maksimalnoj radnoj brzini vrtnje, te da mora izdržati mehanička opterećenja u pogonski toplom stanju pri brzini vitlanja (ispitivanje mehaničke čvrstoće s povišenom brzinom vrtnje). Prvi zahtjev (minimalna radna temperatura i maksimalna radna brzina vrtnje) određuje potrebni pritisak između bočnih strana lamela, a drugi zahtjev (pogonski toplo stanje i brzina vitlanja) određuje potrebnu kvalitetu materijala i oblik elemenata za učvršćenje lamela.

Spomenimo dva moguća primjera koji se ne smiju dogoditi pri kolektoru s lastinim repom. Ako konusi na slici 3. naliježu s obje strane na lamele (bez zračnosti na vanjskoj strani konusa), dobivamo izvedbu kod koje je svaka lamela za sebe ukliještena između oba konusa, s relativno malom dodirnom površinom, a međusobno lamele nisu stegnute. Do takve izvedbe ne smije doći jer je, zbog svoje male dodirne površine, lamela slabo ukrućena pa kolektor s vremenom lako



Sl. 4. Turboizvedba kolektora

olabavi. Još nepovoljniji je primjer kad lamela naliježe samo na vrhu konusa, kako je prikazano na slici 5. U radu takve lamele brzo olabave, a njihova labavost potpuno onemogućuje pogon. Zato je pri obradi lastina repa potrebno oblikovati zaobljeni utor (a na sl. 3) u dnu lastina repa.

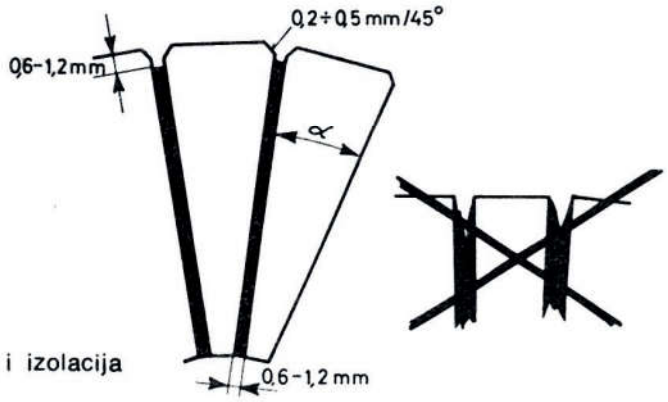


Sl. 5. Pogrešno nalijeganje lamele na vrh konusa

U turboizvedbi kolektora stežu se lamele (i ostvaruju sile F_l i F_s) pomoću čeličnih prstena postavljenih na više mjesta po kolektorskom vanjskom obodu. Na kolektor se najprije stavlja izolacija da čelični prsten ne bi kratko spajao lamele kolektora, zatim prsten (manjeg promjera, na sl. 4) kojim se stlači izolacija, a na kraju prsten (većeg promjera, na sl. 4) kojim se steže kolektor. Ostvarivanje potrebne sile za stezanje pomoću prstena postiže se njegovim navlačenjem u toplom stanju.

Za izradu lamela kolektora upotrebljava se tvrdi elektrolitski bakar, i to čist ili s dodatkom do 0,12 % srebra. Kolektorski bakar s dodatkom srebra dopušta povećano zagrijanje kolektora u pogonu za isti vijek trajanja, a služi za strojeve viših termičkih klasa izolacije (F i H) ili za one kojima je dopušteno povećano zagrijanje (npr. strojevi za električnu vuču). Tvrdoća kolektorskog bakra mora iznositi od 85 do 110 Vickersa ako se mjeri na čeonoj strani ili od 80 do 105 Brinella ako se mjeri na bočnoj strani lamele, bez obzira na to ima li ili nema dodatka srebra. Dalje, prekidna čvrstoća mora biti veća od 290 $\frac{N}{mm^2}$, a granica popuštanja minimum 250 $\frac{N}{mm^2}$. Uobičajene su debljine lamela do 10 mm, a ponekad i do 12 mm.

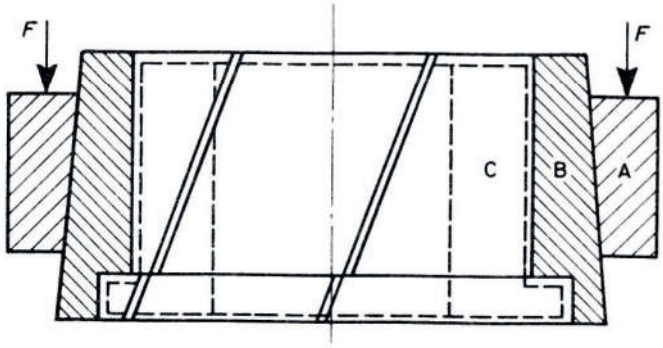
Najteži zahtjevi postavljaju se pred lamele u pogledu tolerancije debljine. Ako su lamele na jednoj strani samo 0,1 mm deblje ili tanje od proračunate vrijednosti, čini to za 100 lamela na obodu kolektora razliku od 10 mm, što znači da pri tome svodni pritisak učvršćuje kolektor samo na vanjskom ili samo na unutrašnjem obodu. U osnovi nije važna točnost debljine lamele, nego točnost kuta α profila lamele (vidi sl. 6), koja mora biti vrlo velika kako bi cijela bočna strana svake lamele u potpunosti nalijegala na susjednu lamelu.



Sl. 6. Međusobni položaj lamela i izolacija

Između kolektorskih lamela dolazi izolacija kojoj je osnovni materijal tinjac, kako je prikazano na slici 6. Debljina je te izolacije od 0,6 do 1,2 mm, a kako mora biti točno jednake debljine, brusi se s obje strane. Izolacija između lamela mora sadržavati veoma malo vezivnog sredstva, tj. valja da ga bude samo toliko da se listići tinjca drže zajedno. Danas za gradnju kolektora uglavnom služi *kolektorski mikanit* koji kao vezivo sadrži samo 3 % šelaka. Veća količina šelaka uzrokovala bi promjenu dimenzija izolacije i teškoće u formiranju kolektorskog obloga u fazi termičke obrade. U drugoj vrsti izolacije koja se danas upotrebljava za termički osobito napregnute kolektore (npr. električna vuča) koristi se za povezivanje listića mikanita anorganskim vezivom u iznosu do 4 %. Pri upotrebi mikanita s anorganskim vezivom praktički nema promjena dimenzija izolacije i brže se obavi termičko formiranje kolektorskog obloga. Pokušao se umjesto tinjca upotrijebiti drugi materijal, no bez uspjeha. Naime, u pogonu se pojavljuje iskrenje četkica, pa ako izolacija između lamela pougljeni, nastaje kratki spoj između lamela. Tinjac ne može pougljeniti i tako on odolijeva iskrenju na kolektoru.

Opišimo ukratko izradu kolektora s lastinim repom. Na ravnoj ploči sastavimo, u posebnoj napravi, od lamela i međuizolacija kolektorski oblog i pripremimo ga za prešanje, Naprava prikazana na slici 7. sastoji se od prstena B, koji je višedijelan (koso prorezan) i koničan s vanjske strane, te jednodijelnog prstena A, koji je koničan s unutrašnje strane. Prsten B mora biti višedijelan i s prorezima kako bi mogao mijenjati promjer, a prorezi moraju biti kosi da bi se ostvarivao jednoliki pritisak na sve lamele, Na slici 7. prikazan je kolektorski oblog crtkanom linijom. Djelovanjem sile F na vanjski prsten A, unutrašnji prsten B smanjuje promjer i tlači kolektorske lamele prema sredini, tj. stvara određeni pritisak između lamela.



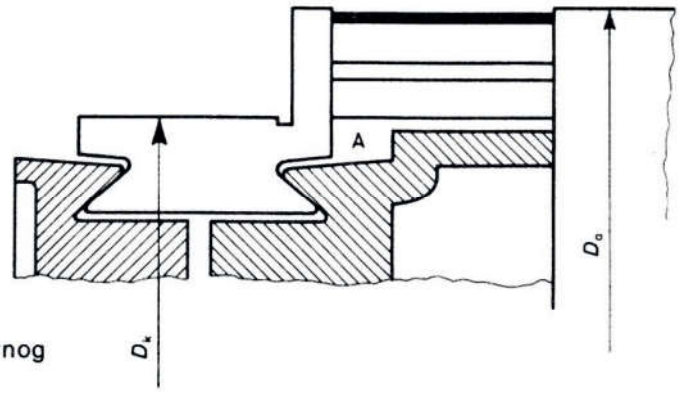
Sl. 7. Naprava za prešanje kolektorskog obloga

Kolektorski oblog podvrgavamo statičkom formiranju na taj način što ga u spomenutoj napravi više puta zagrijemo do temperature od 160 do 170°C i ohladimo te prešamo svaki put u hladnom i toplom stanju sve dok postane krut kao jedno tijelo. Pri tome dio šelaka iz izolacije među lamelama ishlapi, a dio popunjava neravnine između izolacije i lamele. Nakon toga, bez skidanja kolektorskog obloga iz naprave, tokarimo konturu lastina repa i unutrašnji promjer kolektora, premazujemo te plohe lakom, postavljamo kolektorske kape na dijelu lastina repa i montiramo konuse s elementima učvršćenja.

Kolektorske kape izrađuju se uglavnom od formnog mikanita (listići tinjca s nešto više šelaka) i one prije stavljanja na kolektor moraju biti točno oblikovane i zapečene u posebnoj napravi. Pri posebno termički i potencijalno napregnutim strojevima (npr. strojevi za električnu vuču) za izradu se kolektorskih kapa danas umjesto formnog mikanita upotrebljava aromatski poliamid (najčešći trgovački naziv nomex) s poliamidnim vezivom.

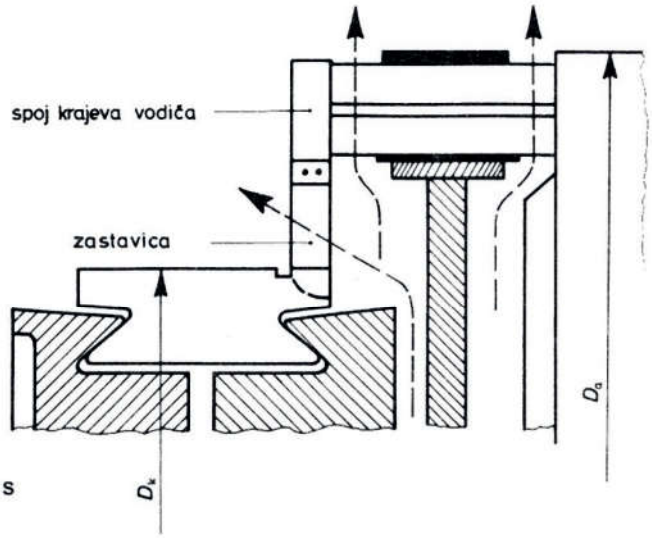
Nakon toga pristupamo daljnjemu statičkom formiranju stezanjem kolektora elementima za njegovo učvršćenje, čime preko konusa lastina repa stvaramo silu F (kao na sl. 3). Stezanje provodimo u toplom i hladnom stanju nekoliko puta uzastopce, sve dok prsteni A i B otpuste sami od sebe, tj. dok se svodni pritisak ostvari preko konusa lastina repa, a pomoću elemenata za učvršćivanje kolektora. Po završenome statičkom formiranju obavlja se grubo tokarenje kolektora na vanjskom promjeru (uz nešto povećane promjere s obzirom na konačnu mjeru).

Prije nego se sastavi kolektorski oblog za statičko formiranje, potrebno je pripremiti svaku lamelu kolektora za spajanje s vodičima namota armature. Na svaku lamelu priključuje se kraj jednoga i početak slijedećeg svitka. Taj spoj može se izvesti na dva u principu razna načina. U prvome, kad se promjer armature D_a i promjer kolektora D_k ne razlikuju mnogo (praktički dvije do tri dubine utora armature), vodiči armaturnog namota spajaju se izravno s lamelom kolektora, a ona na tom mjestu ima povećan promjer. Shematski prikaz spoja sadrži slika 8. U



Sl. 8. Izravno spajanje vodičâ armaturnog namota s kolektorskom lamelom

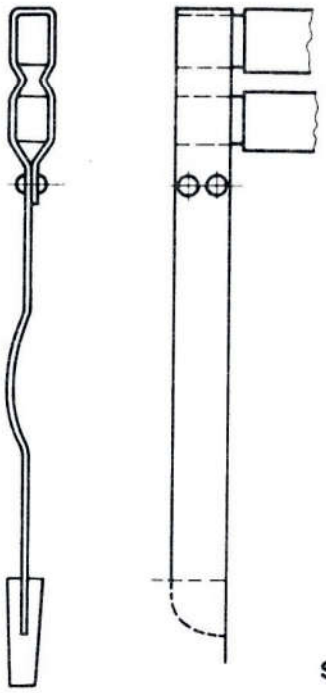
drugom načinu, kad se promjer armature D_a i promjer kolektora D_k mnogo razlikuju, priključak vodiča armaturnog namota na lamele kolektora izvodi se pomoću *zastavica*, kako je to shematski prikazano na slici 9. Pri tome krajevi vodiča namota spajaju se u zastavici.



Sl. 9. Spajanje vodiča armaturnog namota s kolektorskom lamelom preko zastavice

U oba primjera spajanja vodiča namota armature s kolektorskom lamelom, na lameli treba izvesti utor za spajanje, bilo kraja zastavice, bilo krajeva vodičâ namota. Utor se izrađuje dok je svaka lamela još slobodna. Širina utora mora biti takva da kraj zastavice ili krajevi vodičâ namota tijesno ulaze u njega. Ako se spajanje obavlja mekim lemljenjem pomoću legure kositra, potrebno je pokositriti krajeve vodičâ ili zastavice i utor na kolektorskoj lameli.

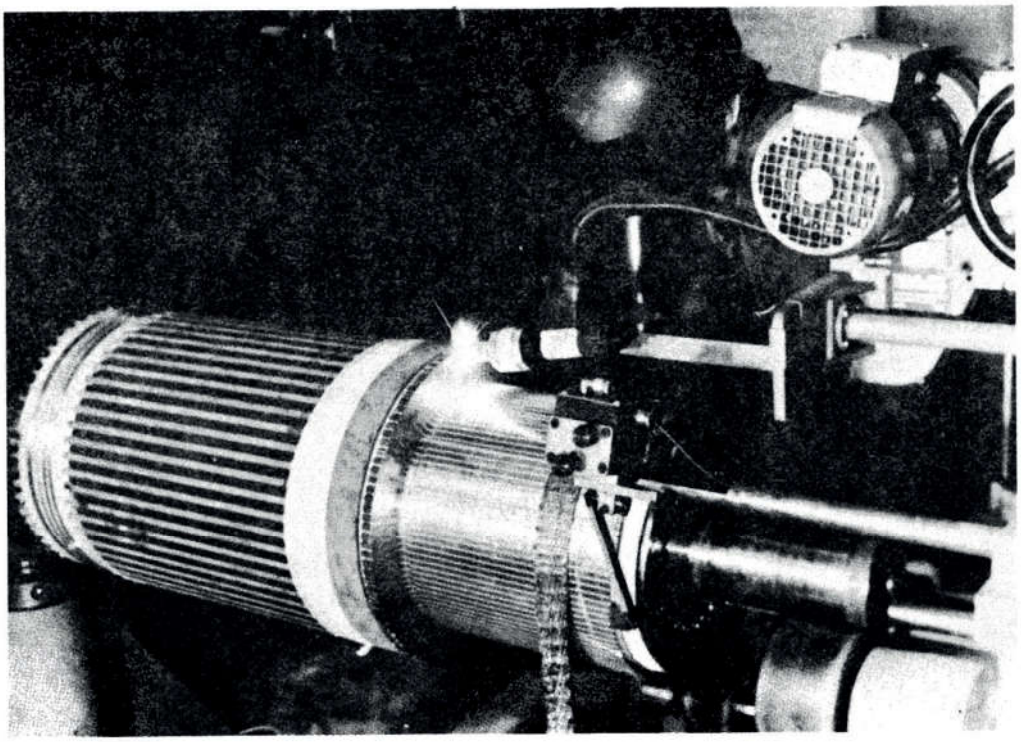
Zastavice se izrađuju od bakrenog lima debljine od 0,5 do 1 mm, a dimenzioniraju se na osnovi provođenja odgovarajuće struje i nisu namijenjene za opterećenje većim mehaničkim silama. Glave armaturnog namota uvijek imaju bandažu i zastavice ne smiju snositi ni dio centrifugalne sile glave namota. Može se, međutim, dogoditi da bi, zbog bilo kojeg razloga (npr. sušenje raznih podloga ispod bandaže), zastavica morala preuzeti dio centrifugalne sile glave namota. To bi uzrokovalo lom zastavice i zato je treba oblikovati tako da je ona elastična u radijalnom smjeru, tj. da promjenom svoje dužine može pratiti rastezanje glave namota bez preuzimanja sile. Na slici 10. prikazana je konstrukcija pri kojoj se elastičnost u radijalnom smjeru postiže savijanjem zastavice na srednjem dijelu.



Sl. 10. Izvedba elastične zastavice

Ako su zastavice dugačke, mogu u pogonu nastati njihove vibracije, što izaziva umor materijala, pa zastavice pucaju najčešće na ulazu u kolektorsku lamelu. To se sprečava tako da se zastavice na jednom ili više mjesta po visini međusobno (tangencijalno) povežu i ukrute uzicom ili vrpcom.

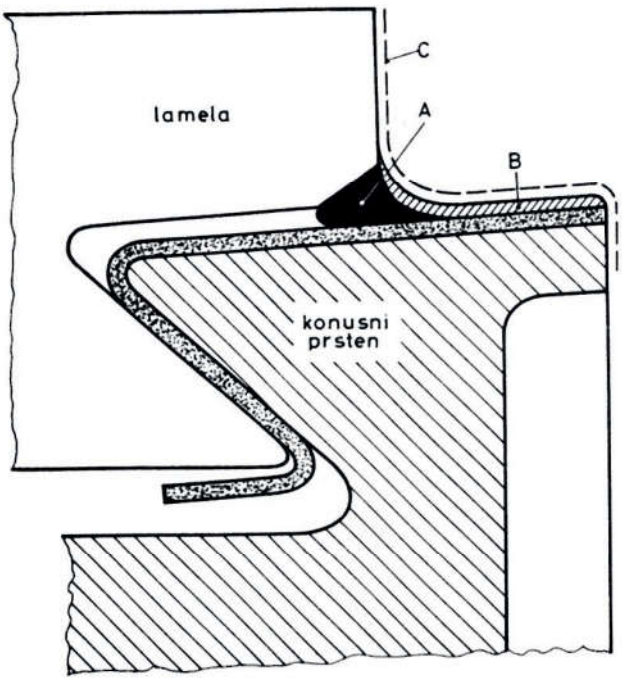
Spajanje vodiča u kolektorsku lamelu ili u zastavicu obavlja se na dva načina: mekim lemljenjem pomoću legure kositra ili zavarivanjem u neutralnoj atmosferi bez dodavanja materijala, takozvanim TIG-postupkom. Taj se postupak primjenjuje na kolektorske strojeve više termičke klase izolacije (F i H), koji imaju povišeno dopušteno zagrijanje (npr. strojevi električne vuče), ili česta strujna preopterećenja (npr. valjački motori). Na slici 11. fotografija je TIG-postupka u proizvodnom procesu »Rade Končara«, a prikazuje zavarivanje kolektorske lamele i vodiča armaturnog namota pri njihovu izravnom spoju (bez zastavica). Postupak je automatiziran po dubini zavarivanja (zbog moguće zamjene namota armature), dužini svarnog šava (visine vodiča u lameli) i kutu zakreta (broj kolektorskih lamela).



Sl. 11. Zavarivanje spoja lamele kolektora i vodiča armaturnog namota TIG-postupkom u procesu proizvodnje »Rade Končara«

Spajanje zastavica u kolektorsku lamelu obavlja se jednim od poznatih postupaka tvrdog lemljenja.

Nakon završenoga statičkog formiranja kolektora brtve se zračnosti između kolektorske kape i obloga lamela. Na slici 12. mjesto brtvljenja označeno je s A. Brtvljenjem se sprečava ulazak nečistoće (pogotovo električki vodljive ugljene



Sl. 12. Brtvljenje i bandaža kolektorske kape

prašine) i vlage u eksploataciji, čime se otklanja mogućnost nastanka kratkih spojeva između kolektorskih lamela. Sredstvo za brtvljenje mora biti takvo da se dobro lijepi za materijal kolektorske kape, bakar lamela i međulamelnu izolaciju, treba da u izolacijskom smislu izdrži temperaturu kolektora, i, što je najvažnije, mora biti elastično i bez odljepljivanja slijediti elastične deformacije materijala ugrađenih u kolektor, koje nastaju djelovanjem centrifugalnih i termičkih sila u radu stroja. Brtvljenje se izvodi u unaprijed oblikovanom utoru (prilikom tokarenja lastina repa), a kao sredstvo upotrebljava se npr. gusti silikonski elastomer.

Za one istosmjerne strojeve kojima je kolektor mehanički (zbog velikih obodnih brzina) ili termički (zbog povišenog zagrijanja ili velikog područja radnih temperatura) jako opterećen, osim statičkoga pristupa se još i dinamičkom formiranju kolektora. Izložimo malo detaljnije svrhu takva postupka.

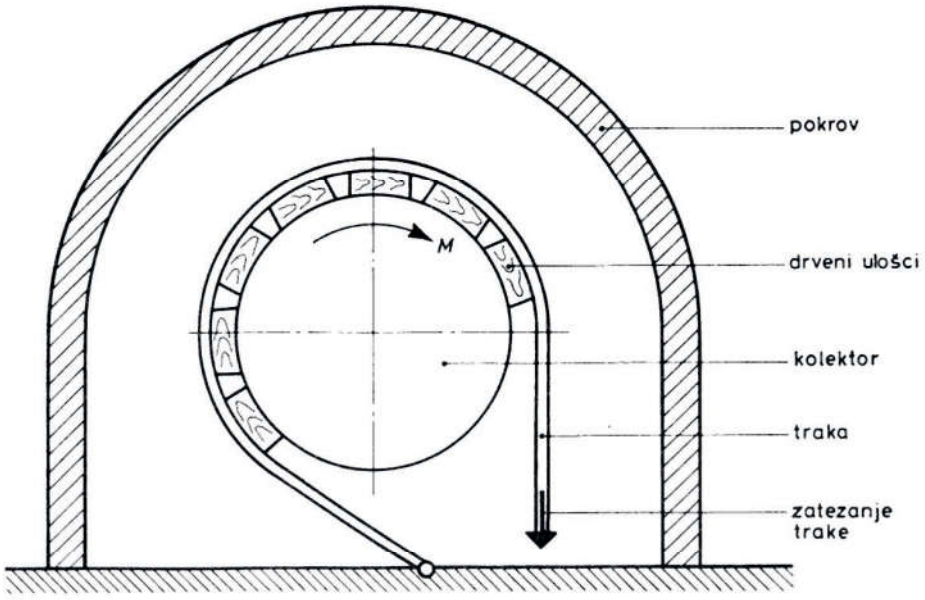
Jedan od osnovnih uvjeta eksploatacijske sigurnosti kolektorskog stroja je eksploatacijska sigurnost kolektora. Za osiguranje odgovarajuće kvalitete komutacije i što manjeg utjecaja mehaničkih faktora na komutaciju, kolektor mora biti u određenoj mjeri mehanički stabilan, tj. njegova ekscentričnost i izbacivanje pojedinačnih lamela ne smiju prekoračiti određene vrijednosti (novoizrađenom kolektoru) i ne smiju se mnogo mijenjati s vremenom upotrebe kolektora. Ekscentričnost kolektora u smislu promjene njegova cilindričnog oblika (ekscentričnost zbog loše montaže se ne razmatra) nastaje zbog pojave nejednakih radijalnih deformacija pojedinih dijelova (segmenata oboda) kolektora. Deformacije mogu biti elastične ili plastične. Mehanička stabilnost cilindričnog oblika ocjenjuje se mjerenjem ekscentričnosti u hladnom i toplom stanju pri mirovanju i u vrtnji tokom tehnološkog procesa. Treba razlikovati elastične deformacije površine kolektora u vrtnji, koje iščezavaju pri njegovu mirovanju, od plastičnih deformacija, koje ostaju i kad on miruje.

Elastične deformacije mogu se mjeriti samo u vrtnji kolektora. Obično se one ravnomjerno raspoređuju po obodu kolektora i ne narušavaju klizni kontakt četkice i kolektora, a nastaju zbog elastične deformacije elemenata učvršćenja kolektora.

Plastične deformacije oblika kolektora nastupaju kad su centrifugalne i termičke sile veće od sila učvršćenja (popuštanje trenja između lamela i kolektorskog mikanita ili u samome kolektorskom mikanitu), pa se pojavljuje proklizavanje izvjesnog broja lamela (segmenta oboda) kolektora. Te su deformacije različite za mirni kolektor i onaj u vrtnji, a kad premašuju određenu granicu, narušavaju klizni kontakt četkice i kolektora. Osobito su opasne plastične deformacije pojedinačnih lamela (tzv. izbacivanje pojedinačnih lamela), koje u vrtnji odbacuju četkicu s kolektorske klizne plohe ili je čak lome.

U radu kolektora bez plastičnih deformacija radijalna sila učvršćenja svake lamele (ostvarena formiranjem kolektora) veća je od zbroja centrifugalne i termičke sile nastalih zbog nejednolikog zagrijavanja i različitog koeficijenta toplinskog rastezanja materijala pojedinih dijelova kolektora. Pri plastičnoj deformaciji oblika kolektora osim tih sila pojavljuje se još dodatna termička sila. Zajedničko djelovanje centrifugalnih i termičkih sila te deformacije klizne plohe

mogu se tumačiti na ovaj način. Nakon mehaničke obrade kolektorske klizne plohe, na njoj ostaju neravnine, ovisne o dobroti mehaničke obrade. U radu kolektora više se zagrijavaju one lamele (ili segmenti oboda) koje se nalaze iznad idealnoga kolektorskog promjera jer osim normalnih gubitaka trenja četkice i kolektora i gubitaka prijelaza struje, tu su dodatni gubici sudara tih lamela s četkicama, pri čemu se dio mehaničke pretvara u toplinsku energiju. One kolektorske lamele koje su ispod idealnog promjera kolektora imaju niže gubitke i manje se zagrijavaju, tako da je zagrijanje lamela po obodu kolektora nejednoliko. Lamele koje se više zagrijavaju povećavaju svoje dimenzije, što zbog djelovanja centrifugalnih sila još više povećava razliku po visini s obzirom na idealni promjer kolektora, pa zato još više raste efekt sudara i nastaje vibriranje četkica. Tako, rade li četkice pod jačim opterećenjem, pojavljuje se jako iskrenje, koje u nepovoljnim potencijalnim uvjetima na kolektoru zna dovesti do preskoka među lamelama ili do kružne vatre na kolektoru. Da se spriječe te negativne posljedice deformacija klizne kolektorske plohe zbog djelovanja centrifugalnih i termičkih sila u eksploataciji vučnog motora, potrebno je još u toku tehnološkog procesa izrade kolektora *smiriti* kolektor u procesu takozvanoga dinamičkog formiranja.



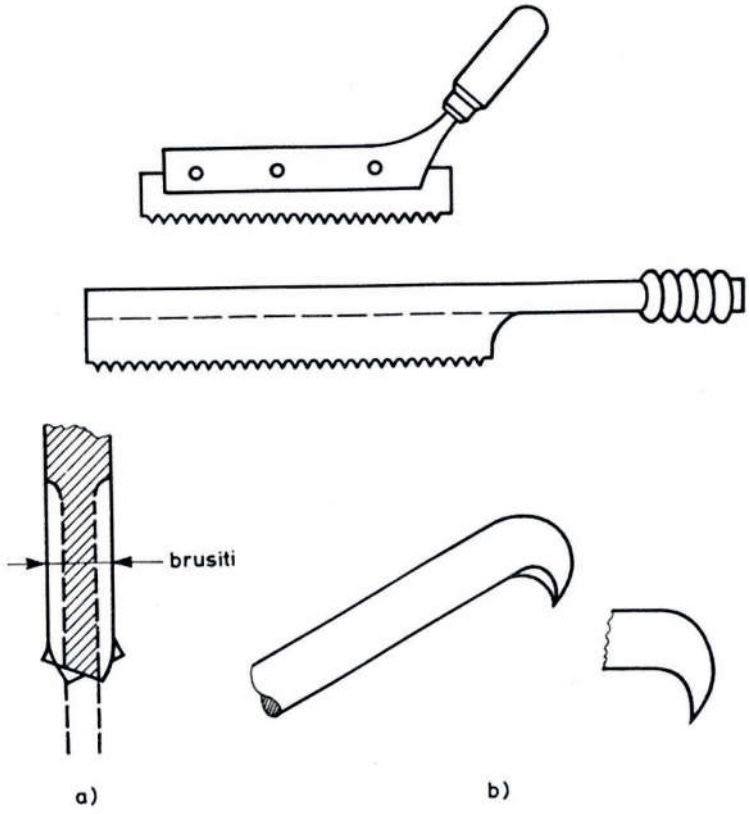
Sl. 13. Shematski prikaz uređaja za dinamičko formiranje kolektora

Dinamičko formiranje kolektora obavlja se u posebnom uređaju shematski prikazanome na slici 13. On se sastoji od elektromotornog pogona koji vrti kolektor, trake s drvenim uloščima za zagrijavanje kolektora trenjem, naprave za zatezanje trake, elemenata za mjerenje brzine, temperature i ekscentričnosti kolektora, te pokrova za mehaničku zaštitu okoline. Sam postupak dinamičkog formiranja kolektora sastoji se od tri do četiri ciklusa zagrijavanja kolektora trenjem u vrtnji na temperaturu od 140 do 150°C, zatim je tu vrtnja pri toj temperaturi u toku određenog vremena s brzinom vitlanja i stezanje vijaka za učvršćenje kolektora, te hlađenje i ponovno stezanje vijaka za učvršćenje kolektora.

Prije postupka dinamičkog formiranja potrebno je izglodati (provizorno) izolaciju između kolektorskih lamela, kako tvrdi tinjac ne bi suviše trošio drvene uloške za zagrijavanje kolektora. Prema današnjem stanju gradnje i eksploatacije brzohodnih kolektora smatra se da kolektor po završetku dinamičkog formiranja može imati ekscentričnost (udar) do najviše 0,04 mm u toplom stanju, a razlika između toplog i hladnog stanja ne smije premašivati 0,02 mm. Mjeri se indikatorom u mirnom stanju.

U daljnjem postupku izrade kolektora (sada već stavljenome na osovinu stroja) tokari se vanjska ploha na konačnu mjeru te obavlja glodanje izolacije između lamela i skidanje bridova lamela.

Tinjac u izolaciji između lamela tvrđi je od četkica, zbog čega bi se u eksploataciji povećalo njihovo trošenje i četkice bi odskakivale s kolektorske klizne plohe. Zato na gotovom kolektoru treba izolaciju između lamela izglodati do cca 1 mm dubine. Time osiguravamo da određeno vrijeme u eksploataciji tinjac neće stršiti izvan kolektorskih lamela, a četkice će imati miran mehanički rad. Izuzetak u pogledu glodanja izolacije između lamela čine kolektori za male univerzalne motore i neke specijalne strojeve, gdje se upotrebljavaju četkice od amorfnog ugljena, tvrđe od tinjca. Pri glodanju izolacije između kolektorskih lamela važno je da se do određene dubine odstrani sav tinjac (s bočnih strana lamela), a ne samo u sredini što je (precrtano) naznačeno na slici 6.



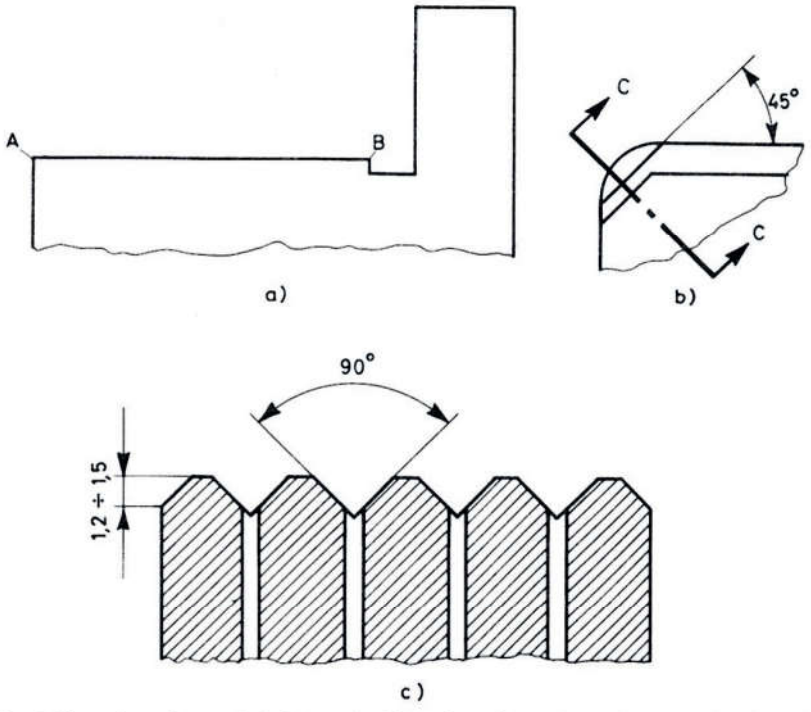
Sl. 14. Pomoćni alati za: a) glodanje izolacije između lamela; b) uklanjanje bridova s lamela kolektora

Neprilagođene četkice na novoobrađenom kolektoru s izglodanom izolacijom između lamela sudarale bi se s oštrim bridovima lamela i moglo bi doći i do loma bridova četkica. Da to spriječimo, uklanjamo na gotovom kolektoru oštre bridove lamela za 0,2 do 0,5 mm pod kutom od 45°. Na slici 6. izgled je dijela oboda kolektora s izglodanom izolacijom između lamela i odstranjenim oštrim bridovima lamela.

U industrijskoj proizvodnji kolektora srednjih i manjih promjera glodanje izolacije između lamela i uklanjanje bridova lamela obavlja se istodobno posebno oblikovanim glodalom na automatiziranom stroju, i to po dužini glodanja (dužina kolektorske klizne plohe) i kutu zakreta (broj lamela). Na kolektorima većih promjera glodanje izolacije između lamela izvodi se posebnom glodalicom (s ručnim pomakom) na elektromotorni pogon s fleksibilnom osovinom, a skidanje bridova lamela vrši se ručnim izvlačenjem pomoću alata (noža) prikazanoga na slici 14.b.

U eksploataciji gdje nema posebnih uređaja za glodanje izolacije između lamela i skidanje bridova lamela, služimo se ručnim pomoćnim alatom. Za glodanje izolacije između lamela poslužit će list pile za metal koji sa strane obrusimo na debljinu što odgovara debljini izolacije između lamela i opremimo ga nekom drškom, kao na slici 14.a, a za uklanjanje bridova lamela pomoći će alat na slici 14.b.

Kod kolektorskih strojeva višega nazivnog napona, s visokim potencijalnim i komutacijskim naprezanjima na kolektoru, a koji još imaju brze vremenske promjene struje i visoka preopterećenja, može nastati preskok (električni luk) između lamela na rubovima (A) i (B) kolektora, prema slici 15.a, ili preskok s ruba (A) kolektora na masu (po površini kolektorske kape na konusni prsten za stezanje

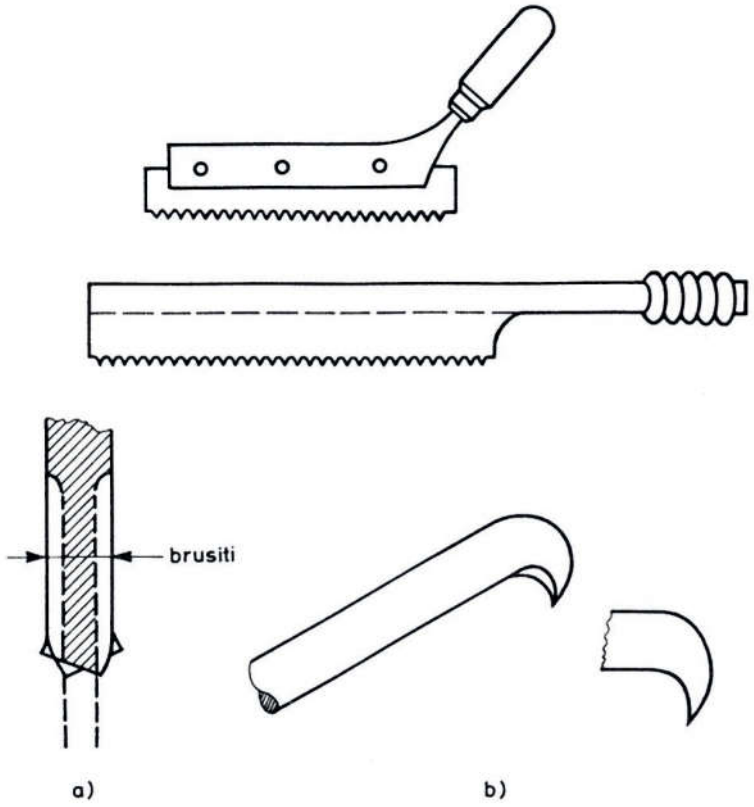


Sl. 15. Zaobljivanje rubova kolektora i skidanje vrhova lamela na rubovima kolektora

Prije postupka dinamičkog formiranja potrebno je izglodati (provizorno) izolaciju između kolektorskih lamela, kako tvrdi tinjac ne bi suviše trošio drvene uloške za zagrijavanje kolektora. Prema današnjem stanju gradnje i eksploatacije brzohodnih kolektora smatra se da kolektor po završetku dinamičkog formiranja može imati ekscentričnost (udar) do najviše 0,04 mm u toplom stanju, a razlika između toplog i hladnog stanja ne smije premašivati 0,02 mm. Mjeri se indikatorom u mirnom stanju.

U daljnjem postupku izrade kolektora (sada već stavljenome na osovinu stroja) tokari se vanjska ploha na konačnu mjeru te obavlja glodanje izolacije između lamela i skidanje bridova lamela.

Tinjac u izolaciji između lamela tvrđi je od četkica, zbog čega bi se u eksploataciji povećalo njihovo trošenje i četkice bi odskakivale s kolektorske klizne plohe. Zato na gotovom kolektoru treba izolaciju između lamela izglodati do cca 1 mm dubine. Time osiguravamo da određeno vrijeme u eksploataciji tinjac neće stršiti izvan kolektorskih lamela, a četkice će imati miran mehanički rad. Izuzetak u pogledu glodanja izolacije između lamela čine kolektori za male univerzalne motore i neke specijalne strojeve, gdje se upotrebljavaju četkice od amorfnog ugljena, tvrđe od tinjca. Pri glodanju izolacije između kolektorskih lamela važno je da se do određene dubine odstrani sav tinjac (s bočnih strana lamela), a ne samo u sredini što je (precrtano) naznačeno na slici 6.



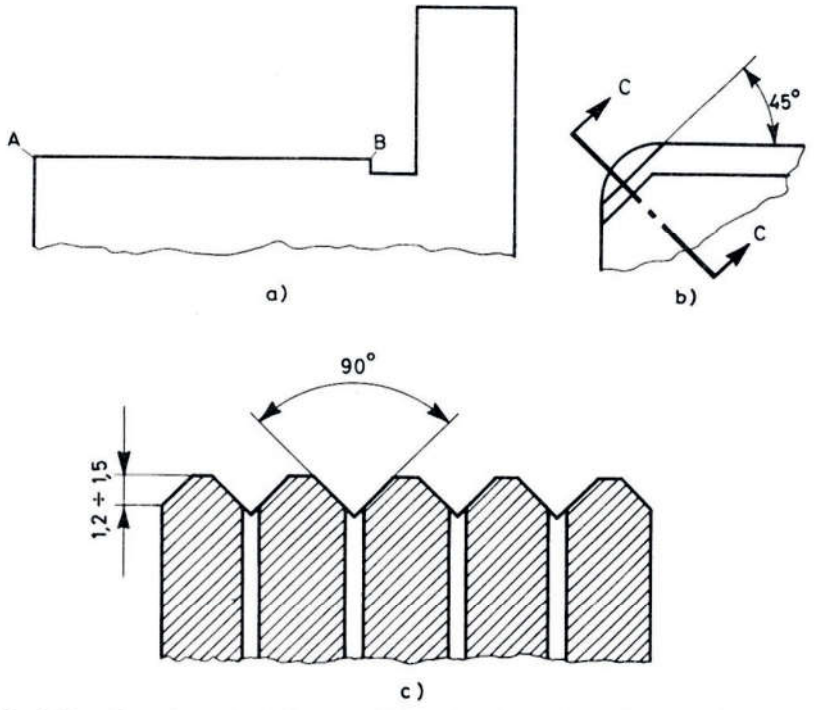
Sl. 14. Pomoćni alati za: a) glodanje izolacije između lamela; b) uklanjanje bridova s lamela kolektora

Neprilagođene četkice na novoobrađenom kolektoru s izglodanom izolacijom između lamela sudarale bi se s oštrim bridovima lamela i moglo bi doći i do loma bridova četkica. Da to spriječimo, uklanjamo na gotovom kolektoru oštre bridove lamela za 0,2 do 0,5 mm pod kutom od 45°. Na slici 6. izgled je dijela oboda kolektora s izglodanom izolacijom između lamela i odstranjenim oštrim bridovima lamela.

U industrijskoj proizvodnji kolektora srednjih i manjih promjera glodanje izolacije između lamela i uklanjanje bridova lamela obavlja se istodobno posebno oblikovanim glodalom na automatiziranom stroju, i to po dužini glodanja (dužina kolektorske klizne plohe) i kutu zakreta (broj lamela). Na kolektorima većih promjera glodanje izolacije između lamela izvodi se posebnom glodalicom (s ručnim pomakom) na elektromotorni pogon s fleksibilnom osovinom, a skidanje bridova lamela vrši se ručnim izvlačenjem pomoću alata (noža) prikazanoga na slici 14.b.

U eksploataciji gdje nema posebnih uređaja za glodanje izolacije između lamela i skidanje bridova lamela, služimo se ručnim pomoćnim alatom. Za glodanje izolacije između lamela poslužit će list pile za metal koji sa strane obrusimo na debljinu što odgovara debljini izolacije između lamela i opremimo ga nekom drškom, kao na slici 14.a, a za uklanjanje bridova lamela pomoći će alat na slici 14.b.

Kod kolektorskih strojeva višega nazivnog napona, s visokim potencijalnim i komutacijskim naprezanjima na kolektoru, a koji još imaju brze vremenske promjene struje i visoka preopterećenja, može nastati preskok (električni luk) između lamela na rubovima (A) i (B) kolektora, prema slici 15.a, ili preskok s ruba (A) kolektora na masu (po površini kolektorske kape na konusni prsten za stezanje



Sl. 15. Zaobljivanje rubova kolektora i skidanje vrhova lamela na rubovima kolektora

kolektora). Da se smanji jakost električnog polja na rubovima (A) i (B) prema slici 15.a, potrebno je zaobliti rubove kolektora, a na svakoj lameli otupiti vrhove. Na slici 15.b prikazan je detalj ruba (A) kolektora, a na slici 15.c presjek ruba kolektora u pogledu C-C sa slike 15.b. Uklanjanje vrhova lamela na rubu A izvodi se četverobridnom turpijom srednje finoće, a na rubu B malim glodalom.

U postupku izrade kolektora obavlja se zatim izrada bandaže kolektorske kape. Na slici 12. je mjesto na koje se stavlja bandaža označeno s B. Bandaža se postavlja radi mehaničke zaštite kolektorske kape od djelovanja centrifugalnih sila i od bilo kakva oštećenja, a istodobno služi kao izolacija protiv puznih (kliznih) struja između kolektorskih lamela i ruba konusnog prstena. Bandaža se izrađuje namatanjem nekoliko slojeva staklene vrpce uz istodobno premazivanje epoksidnom smolom. Nakon otvrdnjavanja površina se bandaže brusi finim brusnim papirom i zatim nanovo premazuje epoksidnom smolom. Površina bandaže mora biti ravna i glatka da se na nju ne hvata električki vodljiva prašina, posebno ona od četkica. U nekim okolnostima, ovisno o upotrijebljenim materijalima za izradu površinskog sloja bandaže, još se premazuju čeone strane lamela i bandaže lakom otpornim na puzne struje. Na slici 12. mjesto premazivanja tim lakom označeno je s C.

Izvedba bandaže kolektorske kape na strani prema paketu limova u osnovi je jednaka onoj na strani prema ležajnom štitu. Pri tome valja razlikovati *zatvorenu izvedbu glave namota* (vidi sl. 8), gdje u prostor A za spajanje vodiča namota s kolektorom gdje su i kolektorske kape, ne može ući ugljena prašina i druge nečistoće, od *otvorene izvedbe glave namota* s djelomičnom bandažom glave namota, gdje kroz kolektorske zastavice i glavu namota prolazi rashladni zrak (i sve nečistoće), kako je crtkanim linijama sa strelicom označeno na slici 9. U prvom primjeru izvedba bandaže kolektorske kape može biti čak i pojednostavnjena, a u drugome ona mora biti jednaka kao na strani prema ležajnom štitu.

Posebno treba istaknuti da se ne smije upotrebljavati izvedba kolektora bez zastavica s bandažom glave namota koja potpuno zatvara razmak od kolektora do paketa limova, kao na slici 8, uz nosač glave namota, kao na slici 9. U tom bi slučaju u prostoru A na slici 8. nastalo mjesto skupljanja ugljene prašine i drugih nečistoća (osobito pri zatvorenom ciklusu hlađenja). To bi najprije uzrokovalo da se smanji izolacijski otpor namota prema masi, a zatim bi nastao proboj namota na masu.

Posljednja operacija u tehnološkom postupku izrade kolektora je završna obrada klizne plohe. Svrha te obrade je uklanjanje srha nastaloga glodanjem izolacije između lamela i skidanjem bridova lamela, te postizavanje glatke i okrugle kolektorske klizne plohe. Završna obrada klizne plohe može se izvesti tokarenjem ili brušenjem.

Završno tokarenje obavlja se uz mali posmak, malu dubinu i povećanu brzinu rezanja. U tu svrhu redovito se koristimo dijamantnim nožem uz posmak od cca 0,04 mm, dubinu rezanja od 0,02 do 0,04 mm i brzinu rezanja od 10 do 15 ms^{-1}, čime se dobiva potpuno glatka i zrcalno sjajna klizna ploha kolektora, tako da otpada potreba poliranja. Treba napomenuti da u završnom tokarenju dijamantnim nožem brzine rezanja manje od 5 ms^{-1} ne daju željeni izgled površine kolektora.

Obrada klizne plohe brušenjem rjeđe se susreće, i to uglavnom za veće strojeve, kad se završna obrada obavlja u vlastitim ležajima. Za brušenje se koristimo brusnim pločama (ili štapovima) izrađenima od finih zrnaca silicijum-karbida uz vezivno sredstvo gumu ili bakelit. Katkad se nakon brušenja klizna ploha još i polira tvrdim drvom.

Pri završnom tokarenju veoma je važno da izbjegnemo vibracije, bilo tokarskog stroja kad se rotor obrađuje zasebno, bilo cijelog istosmjernog stroja kad se obrada izvodi u vlastitim ležajima. Posljedica vibracija u završnoj obradi je neravna klizna ploha i stvaranje patine s prugama u prvim satima rada, koje nestaju tokom eksploatacije. Pokažimo to na jednom primjeru. Pri tokarenju klizne plohe kolektora na tokarskom stroju relativno velikom brzinom rezanja, rotor zadržava os rotacije, a zbog vibracija tokarskog stroja velike mase i male frekvencije, bit će različit pritisak noža na kliznu plohu, pa na njoj nastaje neravnina u obliku spirale. U prvim satima rada stroja na kliznoj se plohi kolektora ne stvara jednolika patina, već ostaje svijetla spirala, koja se pri pogledu na pristupačan dio klizne plohe kolektora u mirovanju vidi kao više pruga što se pri zaustavljanju stroja pomiču po kolektoru. Pogledom na kliznu plohu kolektora pri zaustavljanju može se razlučiti jesu li te pruge kružnog oblika (mogu nastati od četkica) ili su spirale nastale završnom obradom.

Točnost izrade kolektora ovisi o njegovim dimenzijama (odnos dužine i promjera), obodnoj brzini, uvjetima rada i namjeni stroja, a propisuje ih proizvođač. Prikažimo orijentacijske vrijednosti točnosti u izradi kolektora.

Pri slaganju i prešanju kolektorskog obloga može doći do usukavanja lamela. Otklon brida lamela prema uzdužnoj simetrali klizne plohe na formiranome kolektorskom oblogu smije iznositi do tri milimetra po metru dužine.

Prilikom formiranja kolektorskog obloga ponekad će neke lamele biti više potisnute prema sredini u odnosu prema ostalima, pa podjela po obodu određenog kolektora ne mora biti jednolika. Odstupanje podjele lamela na obodu kolektora, mjereno po sekanti na polnom koraku, smije biti do 1 mm.

Dopuštena ekscentričnost (razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti udara u vrtnji) nakon završne obrade klizne plohe smije iznositi 0,02/0,04/0,02 mm pri brzini vrtnje od 1 500 min^{-1}, 0,03/0,05/0,03 mm pri cca 1 000 min^{-1}, 0,04/0,06/0,04 mm pri cca 500 min^{-1} i 0,1/0,15/0,1 mm pri cca 100 min^{-1}. Prva od triju vrijednosti odnosi se na hladno stanje, druga na pogonski toplo stanje nakon vitlanja, a treća vrijedi za hladno stanje nakon vitlanja.

Poslije kratkog vremena u pogonu kolektorska klizna ploha na dijelu kontakta s četkicom dobiva smeđu boju, takozvanu *patinu*. Patina se stvara na kolektoru kao rezultat složenoga kemijsko-fizikalnog procesa. Komponente međusobnim djelovanjem kojih nastaje kemijski proces jesu materijal četkica i kolektora te sastav okoline (rashladnog zraka). Parametri koji usmjeruju i intenziviraju kemijski proces su struja koja prolazi kontaktom i temperatura samog kontakta. Ako stroj radi u uvjetima čiste okoline, vlaga se iz zraka elektrolitski rastvara pod utjecajem struje. Nastali kationi H_2 i anioni 0 pred djelovanjem električnog polja idu prema katodi i anodi, što u zoni kontakta znači da se na kliznoj površini anodno polarizirane četkice skuplja kisik, a na

kolektorskoj kliznoj plohi (ispod anodno polarizirane četkice) vodik. U zoni kontakta pod katodno polariziranom četkicom slika je obrnuta, tj. na kliznoj plohi četkice skuplja se vodik, a na kliznoj plohi kolektora kisik. Kolektorska klizna ploha koja napušta katodno polariziranu četkicu oksidira (poprima tamniju boju), a dolaskom pod anodno polariziranu četkicu ona se neutralizira (postaje svjetlija). Od ta dva procesa prevladava proces oksidacije. Osim toga, zagrijani kolektor uzima kisik iz zraka, koji ubrzava stvaranje bakrenog oksida, Cu_2O, na kliznoj plohi. Trenjem četkica pri vrtnji kolektora skida se dio bakrenog oksida, a abrazivna svojstva četkice moraju biti takva da na kolektoru uvijek ostane tanki sloj bakrenog oksida. Sloj bakrenog oksida prva je komponenta patine. Druga njezina komponenta nastaje od čestica koje dolaze u zonu kontakta iz okoline, a to su produkti mehaničke potrošnje i elektroerozije kontaktnih dijelova (četkica i kolektora), te čestice iz rashladnog zraka (okoline). Djelovanjem druge komponente na oksidni sloj i njihovim kemijskim spajanjem nastaje konačna patina na kolektorskoj kliznoj plohi. Boja i sastav patine određeni još međusobnim djelovanjem više parametara. To su npr.: kvaliteta materijala četkica i kolektora, temperatura klizne plohe kolektora, električki i mehanički režimi rada, mehanički hod stroja, pritisak četkica, vibracije četkica, raspodjela struje po četkicama i slično.

Prisutnošću patine smanjuje se koeficijent mehaničkog trenja, te potrošnja četkica i kolektora, a nešto se povećava električki prelazni otpor između četkice i kolektora. Za besprijekoran rad kolektorskog stroja nije poželjna ni preslaba ni prejaka, a niti oštećena patina. Poželjna je jednolična, sjajna i glatka patina srednje smeđe boje, bez pruga, izbrazdanosti, mrlja i tragova nagaranja, uz jednoliko trošenje kolektorskih lamela.

Kad se naruše uvjeti nastajanja normalne patine, rad je komutacijskog sklopa otežan, a u nekim uvjetima i nemoguć, čime je ujedno onemogućena upotreba kolektorskog stroja. Utjecaj okoline na patinu kolektora čvrsto je povezan s četkicama i opisan je u odjeljku 5.2.

Na kliznoj plohi kolektora u pogonu mogu nastati mrlje raznih oblika i raspodjele, tragovi nagaranja, greške na lamelama kolektora i nepovoljno trošenje kolektora. Na osnovi ocjene stanja cijeloga komutacijskog sklopa u pogonu (a ne samo patine na kolektorskoj kliznoj plohi) uzevši u obzir namjenu stroja i uvjete okoline, mogu se, na temelju statističkog praćenja u eksploataciji, odrediti uzroci i potrebni zahvati pri održavanju komutacijskog sklopa, o čemu će biti riječi u odjeljku 5.5.

5.2. Četkice

Četkice ostvaruju kontakt između mirnih stezaljki stroja i lamela kolektora u vrtnji. Četkicama ih nazivamo zbog toga što su prve od njih bile izrađene od snopa tankih bakrenih žica u obliku četke (1835). U daljnjemu povijesnom razvoju četkice su se izrađivale tlačenjem brončanog praha (1895), pa nakon toga prešanjem i pečenjem metalografita, ugljenografita i grafita. Godine 1927.

pronađen je postupak elektrografitiranja i dobivanje elektrografitnih četkica. Nedostatak, velika potrošnja četkica pri radu u suhom zraku (avioni na većim visinama) i u početnoj upotrebi silikonske izolacije (od 1940. do 1950) dovode do postupka *impregnacije* četkica, koji se danas provodi za četkice raznih namjena. I na kraju, u posljednja dva desetljeća izrađuju se i grafitne četkice kojima je grafit vezan sintetičkim smolama.

Četkice se dijele prema vrsti materijala i postupku izrade na ugljene, ugljenografitne, grafitne, elektrografitne, metalografitne i grafitne vezane sintetičkim smolama. Na ovom se mjestu nećemo pobliže baviti pitanjima izrade četkica jer je to predmet tehnologije elektromaterijala, već ćemo upozoriti na neke važnije probleme u vezi s upotrebom i ponašanjem četkica u eksploataciji. Na početku valja reći da se za određeni kolektorski stroj redovito ne može potpuno teorijski odrediti najpovoljnija vrsta četkice. Složeni fizikalno-kemijski procesi u zoni kontakta između četkice i kolektora i utjecaj okoline (koja može biti različita kod proizvođača i korisnika, ili se često mijenja, kao u primjeru elektrolokomotive koja vozi u raznim podnebljima) često uvjetuju određivanje najpovoljnije vrste četkica pokusom. U nekim primjerima može se izbor najpovoljnije vrste četkica provesti u ispitnoj stanici, a u drugima prijeko je potrebno još i praćenje ponašanja u eksploataciji. Tako se u ispitnoj stanici za pojedine kvalitete četkica utvrđuje zona tamne komutacije (područje rada bez iskrenja četkica), zagrijanje četkica i kolektora, osnovni izgled klizne plohe kolektora i četkica, te se podešava zračni raspor pomoćnog pola. No, u idealnim uvjetima rada ispitne stanice i nakon nekoliko sati rada ne može se dati odgovor na ova pitanja:

a) Kakav će biti razvoj stanja klizne plohe kolektora i četkica u uvjetima eksploatacije i uvjetima realne okoline?
b) Kakav će biti razvoj stanja klizne plohe kolektora uzrokovan utjecajem zagrijanja kolektora i četkica, zatim trenjem četkice i kolektora, te mehaničkim vibracijama?
c) Kolika će biti potrošnja četkica i kolektora, što ovisi o: režimu eksploatacije, pritisku četkica, kvaliteti komutacije, gustoći stroje, mehaničkim vibracijama, vrsti montaže (stacionarni ili mobilni stroj) i uvjetima okoline (klimatski i kemijski uvjeti, te razne nečistoće u rashladnom zraku)?
d) Kako se mijenja potrošnja četkica na pojedinim držačima četkica i kliznim stazama?
e) Koliko će četkice svojom potrošnjom djelovati na prljanje komutacijskog sklopa i stroja uopće, te stvarati preduvjete da se smanji izolacijski otpor dijelova pod naponom prema masi, za preskoke i kružnu vatru na kolektoru?
f) Kakva će biti raspodjela ukupne struje po pojedinim četkicama i kako će četkice podnijeti eventualne nejednake struje ako se naruši dobra komutacija?
g) Kako će djelovati spoj uzice i četkice (kad nastupi promjena njegovoga električkog otpora) na daljnje pogoršanje ravnomjerne raspodjele struje, što može uzrokovati pojavu pregaranja uzica?
h) Koliko je mehanički spoj uzice i četkice otporan na vibracije?
i) Kako će se klizne plohe četkica i kolektora ponašati prilikom duljih preopterećenja ili podopterećenja?

Imitacija svih uvjeta eksploatacije i utjecaja okoline praktički je nemoguća u ispitnoj stanici ili pri laboratorijskom ispitivanju. Pojedinačno ispitivanje utjecaja nekog parametra u ispitnoj stanici može čak dati povoljan rezultat, no zajedničko i slučajno djelovanje više parametara zna biti nepovoljno i voditi do isključenja stroja iz eksploatacije.

Iz izloženoga izlaze osnovni zahtjevi koji se postavljaju pred materijal za izradu četkica: mala potrošnja, velika sposobnost komutacije, mali gubici, visoka električka i termička preopteretivost, visoka mehanička čvrstoća, sposobnost podopterećivanja, mala osjetljivost na razne uvjete okoline, jednolika raspodjela struje među paralelno spojenim četkicama, stvaranje jednolične patine i određena abrazivnost (skidanje suvišne patine na kolektoru ili čak i izolacije između kolektorskih lamela – npr. pri malim univerzalnim motorima). Zahtjevi koji se postavljaju na kvalitetu materijala četkice suprotne su prirode, a pri izboru najpovoljnije kvalitete za određenu vrstu stroja poznate namjene i smještaja, valja razlučiti zahtjeve primarnog i sekundarnog značaja. Zato se prilikom izbora četkica (kvaliteta materijala i konstrukcijska izvedba) za određeni kolektorski stroj osim katalоškim podacima proizvođača četkica valja služiti i rezultatima ispitivanja komutacije u ispitnoj stanici, te statističkim podacima ponašanja četkica u eksploataciji.

U tablici na slici 1. prikazan je osnovni sastav materijala, proces izrade, tehnička svojstva i grubo područje upotrebe raznih grupa kvalitete materijala četkica.

U zoni kontakta, između pomičnih dijelova nastaju složeni fizikalno-kemijski procesi. Vođenjem struje nastupa pad napona, a klizanjem četkica pojavljuju se i sile trenja pa se zagrijavaju i troše četkice i kolektor. Zbog utjecaja okoline tu nastaju kemijske reakcije, stvara se patina na kolektoru, pojavljuju se vibracije itd. Svaka od nabrojenih pojava istodobno utječe i na druge pojave, odnosno na rad kontakta u cjelini. U daljnjem izlaganju ukratko ćemo prikazati fizikalna zbivanja u zoni kontakta i međusobni utjecaj parametara.

U zoni kontakta, nakon uspostavljanja ustaljenog stanja, struja prolazi kroz tri paralelne grane. Prvu granu čine točke neposrednoga mehaničkog dodira četkice i kolektora, drugu granu čini prašina (od trošenja četkica i kolektora), koja se nalazi između četkice i kolektora, a treću neznatni zračni raspor između četkice i kolektora. Provod struje kroz te tri grane mijenja se ovisno o stanju kliznih ploha kontakta, brzini vrtnje, učestalosti promjene brzine vrtnje, opterećenju, vibracijama i slično. U određenim režimima rada svaka od paralelnih grana može biti ona koja vodi najveći dio struje. Jasno je da konstrukcija elemenata komutacijskog sklopa mora biti takva da najveći dio struje provodi neposredni mehanički dodir.

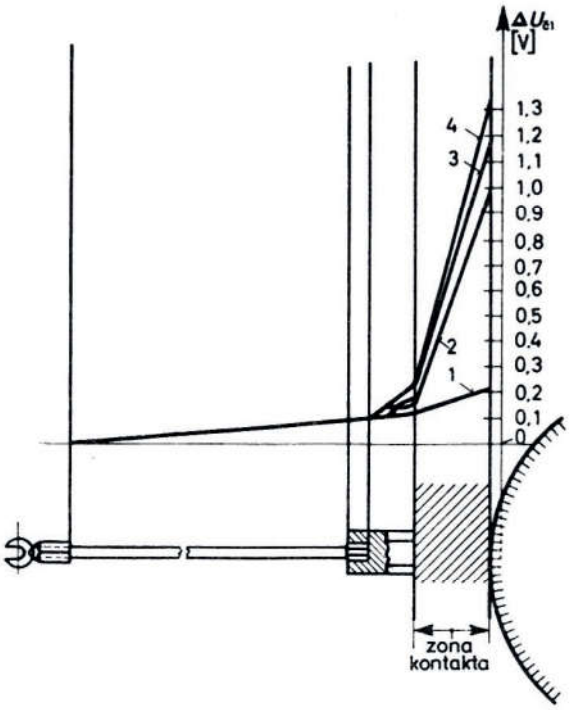
5.2.1. Pad napona

Područje pada napona za pojedine grupa kvalitete materijala četkica prikazano je u tablici na slici 1. Najniže vrijednosti pada napona imaju metalografitne četkice, a najviše vrijednosti grafitne četkice, osobito one vezane

Grupa kvalitete materijala četkica	Osnovni sastav i proces izrade	Tehnička svojstva							Područje primjene (gruba podjela)
		elek. specifični otpor	tvrdoća po Shoreu	dopuštena		pad napona za 2 četkice	koeficijent trenja	pritisak četkica	
				gustoća struje	obodna brzina				
		$\mu\Omega$m	Sh	$\frac{A}{cm^2}$	$\frac{m}{s}$	V	1	kPa	
ugljene	amorfni ugljen, čađa, retortni ugljen; prešanje i pečenje na temperaturi od 1100 do 1200 °C	30–500	50–90	4–8,5	15–30	1,4–3	0,2–0,5	14	univerzalni motori od 110 do 220 V
ugljenografitne	amorfni ugljen, čađa, retortni ugljen, prirodni grafit; prešanje i pečenje na temperaturi od cca 1200 °C	30–800	30–70	5–7	20	2,8	0,15–0,35	21	univerzalni motori i mali istosmjerni strojevi napona od 110 do 220 V
grafitne	prirodni grafit i smola; prešanje i pečenje na temperaturi od cca 1300 °C	13–20	10–30	6–10	50–80	1,4–3,4	0,12–0,2	14	izmjenični kolektorski i istosmjerni strojevi snage do 100 kW u agresivnoj atmosferi
elektrografitne	amorfni ugljen, čađa, grafit, retortni ugljen; elektrografitirani na temperaturi od 2700 do 3000 °C	9–65	35–75	8–12	30–60	1,4–3	0,1–0,2	17–23	na svim istosmjernim i izmjeničnim kolektorskim strojevima napona višega od 75 V
metalografitne	bakar, grafit, dodatak: srebro, olovo, kositar; prešanje i pečenje na temperaturi do 1000 °C.	0,08–5	10–30	10–25	20–40	< 1,4	0,1–0,2	14–25	kolektorski strojevi napona do 75 V
grafitne vezane sintetskim smolama	grafit povezan sintetskim smolama, prešan i pečen na temperaturi otvrdnjavanja smole	80–250	25–50	7–12	30–40	> 3	0,1–0,2	20–30	trofazni izmjenični kolektorski motori

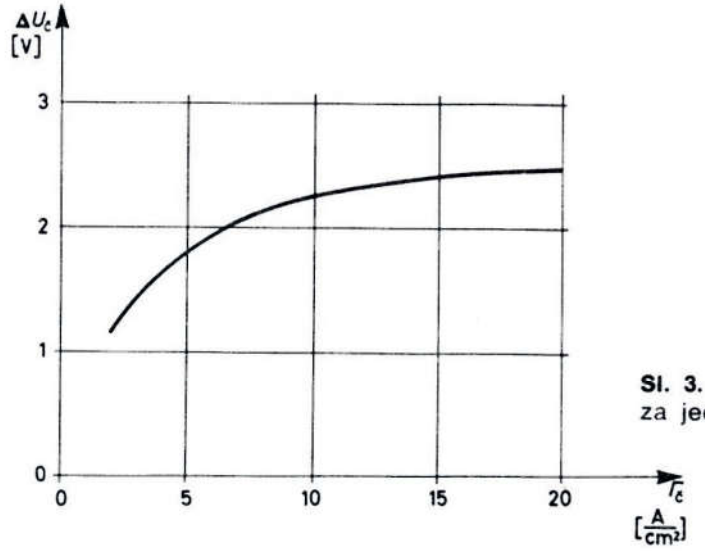
Sl. 1. Osnovni sastav, proces izrade, tehnička svojstva i područje upotrebe raznih grupa kvalitete materijala za četkice

sintetičkim smolama. Vrijednosti pada napona četkica u tablici na slici 1. odnose se na pad napona u zoni kontakta. Na slici 2. informativno je predočena raspodjela ukupnog pada napona na pojedine dijelova četkice (uzicu, spoj uzice i četkice, tijelo četkice i zonu kontakta), pri čemu krivulja 1 približno vrijedi za metalografitne, krivulja 2 za grafitne, krivulja 3 za mekane elektrografitne i krivulja 4 za tvrde elektrografitne četkice. Iz krivulja na slici 2. vidi se da najveći dio ukupnog pada napona nastaje u zoni kontakta.



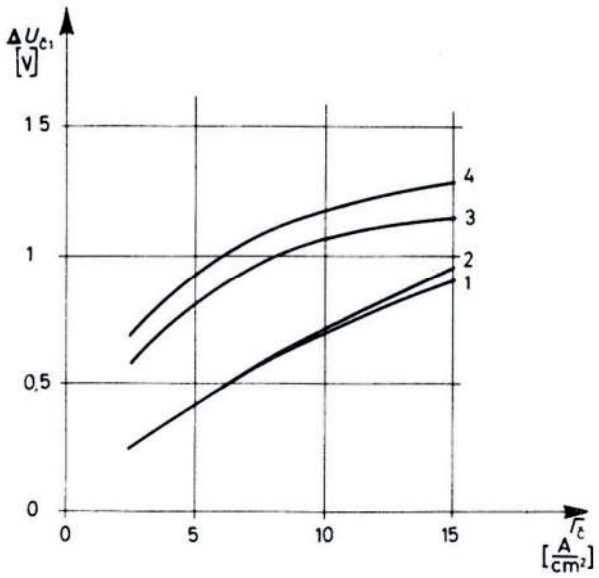
Sl. 2. Raspodjela pada napona na četkici

Osnovna je karakteristika četkice ovisnost pada napona $\Delta U_č$ (zbroj za anodno i katodno polariziranu četkicu pri vrtnji kolektora) o gustoći struje $\Gamma_č$, a služi za određivanje gubitaka zbog prijelaza struje na kolektoru. Na slici 3. nalazimo ovisnost $\Delta U_č(\Gamma_č)$ za jednu kvalitetu elektrografitne četkice.



Sl. 3. Ovisnost pada napona o gustoći struje za jednu kvalitetu elektrografitnih četkica

Karakteristika $\Delta U_č(\Gamma_č)$ razlikuje se u mirovanju i vrtnji kolektora, a osobito veliku promjenu ima pri samom prijelazu iz mirovanja u vrtnju, dok se s daljnjim porastom brzine praktički ne mijenja. Do povećanja pada napona u zoni kontakta pri vrtnji kolektora u usporedbi s mirovanjem dolazi zbog smanjenog provoda struje točkama neposrednog dodira četkice i površinskog sloja patine kolektora.



Sl. 4. Ovisnost pada napona o gustoći struje za jednu kvalitetu elektrografitnih četkica u stanju mirovanja i vrtnje kolektora

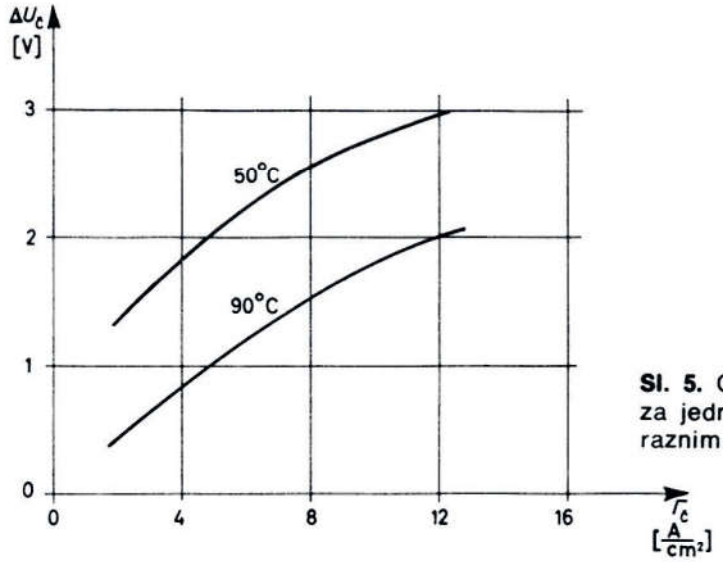
Na slici 4. prikazane su karakteristike $\Delta U_{čl}(\Gamma_č)$ jedne kvalitete elektrografitnih četkica u primjeru mirovanja (krivulje 1 i 2) i vrtnje kolektora (krivulje 3 i 4), pri čemu se krivulje 1 i 3 odnose na anodno polariziranu četkicu, a 2 i 4 na katodno polariziranu četkicu. Pad napona na četkicama u zoni kontakta nije jednak za anodno i katodno polariziranu četkicu. Zbog poluvodičkog djelovanja sloja bakrenog oksida u patini, pad napona katodno polarizirane četkice nešto je veći od onoga na anodno polariziranoj četkici. Razlika pada napona nije neka apsolutna veličina, već se njezin iznos mijenja ovisno o stanju patine, a potpuno iščezava pri kolektoru bez patine.

Na kontakt četkice i kolektora mora djelovati određeni pritisak. Potrebni pritisak četkica za razne grupe kvalitete materijala četkica sadrži tablica na slici 1. Na strojevima koji su izloženi mehaničkim udarcima i vibracijama (npr. vučni motori) vjerojatno je i da četkice odskakuju od kolektora i da se zbog toga pojavi iskrenje. Kako bi se to spriječilo, potrebno je takvim strojevima povećati pritisak na četkice. On se tad povećava obično do 30 kPa, a ponekad i do 45 kPa.

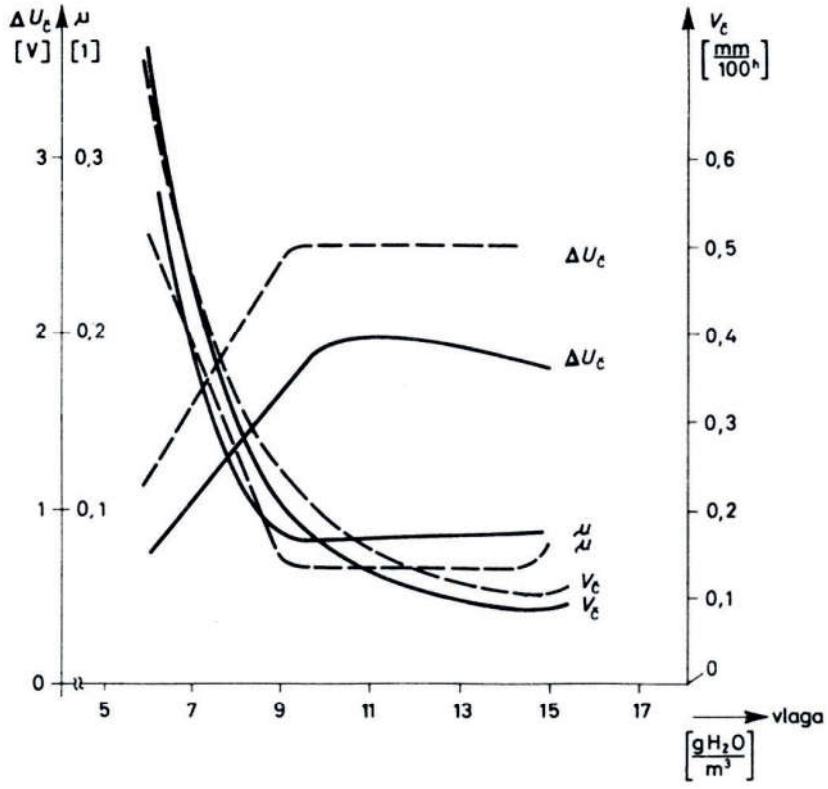
Na pad napona na četkicama utječu razni parametri, kao: pritisak na četkice, temperatura kolektora, vlaga u zraku, tlak zraka, kemijski agresivni plinovi i slično. Razmotrimo utjecaj nekih parametara.

S promjenom pritiska četkica elastično se deformiraju točke neposrednog dodira četkice i kolektora, a posljedično se mijenja prelazni otpor između četkice i kolektora te pad napona na četkicama. Pri povećanom pritisku povećava se provod struje, tj. smanjuje se prelazni otpor i pad napona na četkicama. U području promjene pritiska od 15 do 30 kPa pad napona četkicama opada [L 23] približno po hiperboličkoj raspodjeli.

S promjenom temperature klizne plohe kolektora (i četkica) praktički se mijenjaju svi lokalni padovi napona. S porastom temperature pad se napona na bakru povećava (pozitivan temperaturni koeficijent promjene otpora s temperaturom), a na ugljenu se smanjuje (negativan temperaturni koeficijent promjene otpora s temperaturom). Dalje, s porastom temperature povećava se električna vodljivost poluvodičkog sloja patine, ali ujedno raste i intenzitet oksidacije bakra. U konačnom rezultatu s porastom se temperature smanjuje pad napona na četkicama. Na slici 5. su karakteristike $\Delta U_č(\Gamma_č)$ jedne elektrografitne kvalitete materijala četkica za temperature kolektorske klizne plohe od 50 i 90°C.

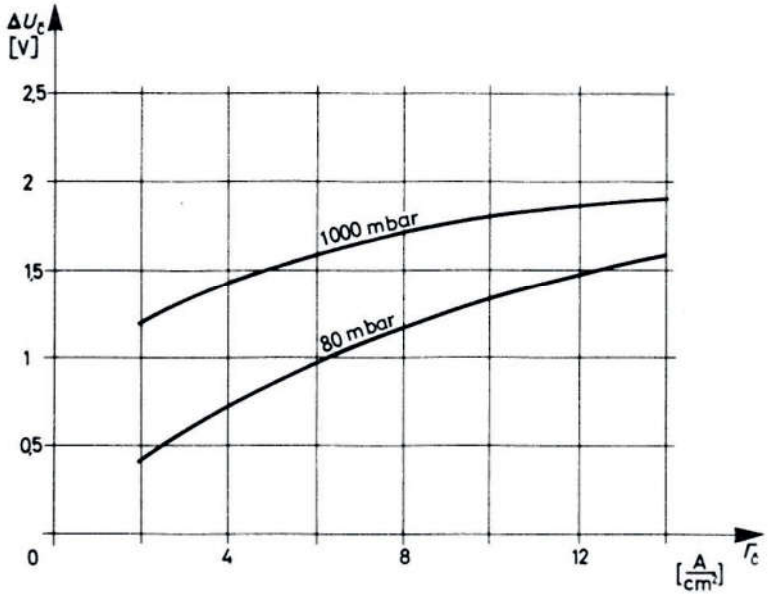


Sl. 5. Ovisnost pada napona o gustoći struje za jednu kvalitetu elektrografitnih četkica pri raznim temperaturama kolektora



Sl. 6. Ovisnost pada napona $\Delta U_č$, koeficijenta trenja μ i potrošnje četkica $V_č$ o količini vlage

Za normalno ponašanje električnoga kliznog kontakta prijeko je potrebno osigurati uvjete nastajanja i održavanja određene patine. Jedan od osnovnih uvjeta nastanka patine je prisutnost vlage u kolektorskom prostoru. Optimalna količina vlage u kolektorskom prostoru, uzevši u obzir njezin utjecaj i na druge parametre, u normalnim atmosferskim uvjetima [L 60] iznosi od 10 do 15 $\frac{gH_2O}{m^3}$. Ako je vlage manje od cca 10 $\frac{gH_2O}{m^3}$, na kliznoj plohi kolektora nastaje slabija patina, a pad se napona na četkicama smanjuje s opadanjem količine vlage. Pri vlazi od 10 do 15 $\frac{gH_2O}{m^3}$ nastaje normalna patina, a pad napona na četkicama praktički se ne mijenja. S daljnjim porastom količine vlage stvara se prejaka patina, koja uzrokuje povećan pad napona na četkicama. Slika 6. sadrži krivulje pada napona na četkicama $\Delta U_č$, koeficijenta trenja μ i potrošnje četkica $V_č$ ovisno o količini vlage pri normalnim atmosferskim uvjetima uz pritisak četkica od 22 kPa, obodnu brzinu kolektora od 30 ms^{-1} i temperaturu kolektora od 105°C. Podaci se odnose na jednu elektrografitnu kvalitetu materijala četkica nakon 100 sati rada, pri čemu pune crte vrijede za gustoću struje četkica 10 $\frac{A}{cm^2}$, a crtkane linije za gustoću struje 20 $\frac{A}{cm^2}$.



Sl. 7. Ovisnost pada napona o gustoći struje za jednu kvalitetu elektrografitnih četkica pri raznim tlakovima zraka

Promjena tlaka zraka utječe na oksidaciju i pojavu patine, te prilijeganje četkica na kolektor. S opadanjem tlaka zraka uz nepromijenjene ostale parametre (temperatura, vlaga, pritisak četkica) smanjuje se nastajanje oksidnog sloja patine i time debljina zračnog sloja između četkica i kolektora (četkice bolje priliježu na kolektor), zbog čega je manji i pad napona na četkicama. Na slici 7. prikazane su krivulje pada napona na četkicama [L 47] ovisno o gustoći struje za različite vrijednosti tlaka zraka. Pri promjeni tlaka zraka uzrokovanoj mijenjanjem nadmorske visine, mora se uzeti u obzir promjena temperature, te vjerojatnost smanjenja količine vlage. S povećanjem nadmorske visine uz pad tlaka smanjuju se temperatura i količina vlage, a to uzrokuje smanjenje ili, na većim visinama, i potpuni izostanak elektrolitskog procesa u zoni kontakta i stvaranja patine. Bez patine se jako smanjuje pad napona na četkicama, a rad kolektorskih strojeva s normalnim četkicama praktički je onemogućen. Zato se na kolektorskim strojevima u zrakoplovstvu upotrebljavaju posebne vrste impregniranih četkica.

Pri radu u atmosferi vodika pad se napona na četkicama jako smanjuje, jer se zbog pomanjkanja kisika stvara tanki sloj patine.

Pri radu u atmosferi ugljik-dioksida pad je napona na četkicama smanjen u usporedbi s radom u čistoj atmosferi, ali je veći od onoga u atmosferi vodika.

Kad se u zoni kontakta pojave kemijski agresivni plinovi, mijenja se sastav patine, pa i električki i mehanički parametri kontakta.

Ako se pojavi sumporovodik u kolektorskom prostoru, u patini se stvara visokoomski sloj bakrenog sulfida, ona postaje deblja i čvršće je povezana s bakrom kolektora. Za provod struje mora nastupiti električni proboj patine, a pad napona četkica raste i povećava se do 30% u usporedbi s radom u čistoj atmosferi.

Utjecaj simpor-dioksida na zbivanja u zoni kontakta sličan je onome sumporovodika. Uz povećane koncentracije sumporovodika ili sumpor-dioksida u rashladnom zraku, toliko se narušava rad kontakta da postaje nemoguća upotreba kolektora izrađenoga od bakra.

Pri pojavi klora u kolektorskom prostoru uništava se patina na kolektoru. Klor se spaja s vlagom, nastaje solna kiselina, koja s kolektorske klizne plohe skida sloj bakar(I)-oksida i sloj materijala četkice. Pri tom se procesu na katodno polariziranu četkicu talože čestice bakra, a na kolektorsku kliznu plohu nečistoće. Praksa je pokazala da u okolini sa sadržajem klora nije moguć rad kolektorskog stroja ako klor dolazi u kolektorski prostor. Ako kolektorski stroj ipak mora raditi u takvoj sredini, treba mu za hlađenje dovesti čisti zrak iz nezagađene atmosfere.

Iz provedenih razmatranja utjecaja raznih parametara na pad napona na četkicama dobiven je osnovni prikaz o električkim zbivanjima u zoni kontakta, iz čega se mogu izvući neki općeniti zaključci bez obzira na odabranu kvalitetu materijala četkica.

Na istom stroju ne smiju se istodobno postavljati četkice raznih kvaliteta. U najgorem slučaju može se pomoći tako da se za jedan polaritet upotrijebi jedna kvaliteta, a za drugi polaritet druga kvaliteta četkice. Razlog je tome u činjenici što četkice imaju negativni temperaturni koeficijent mijenjanja otpora s temperaturom. Poznato je da četkica koja sama po sebi ima veću vodljivost, preuzima na sebe veću struju, pa se zbog toga više grije. Time se još više povećava njezina vodljivost, pa četkica preuzima još veći teret na sebe, dok konačno neke četkice postanu jako preopterećene, a neke potpuno rasterećene. Četkice raznih kvaliteta nikad nemaju točno istu vodljivost, a to ima za posljedicu upravo opisanu pojavu. Nesimetrija tereta može postati tako velika da se pojedina četkica toliko preoptereti da se užari i potpuno izgori.

Da bi se ostvarila jednolika raspodjela struje po električki paralelno spojenim četkicama, mora svim četkicama biti praktički jednak pritisak, ali, i otpor spoja uzice i četkice.

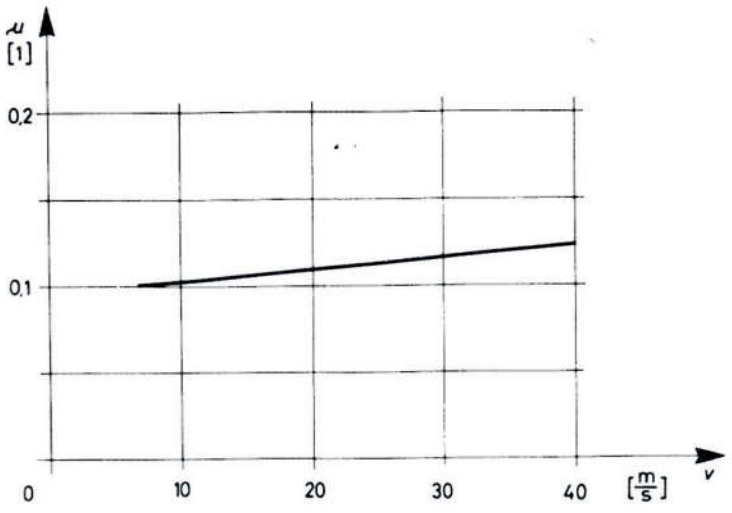
Na stroju se raspodjela struje po četkicama kontrolira vrlo jednostavno. Na pojedinim četkicama, odnosno na uzicama četkica, mjeri se na jednakim dužinama pad napona osjetljivim milivoltmetrom, i na taj se način ustanovi raspodjela struje jer je otčitana vrijednost pada napona proporcionalna veličini struje.

Za stvaranje potrebne patine na kolektorskoj kliznoj plohi moraju uvijek po istom tragu kolektora kliziti anodno i katodno polarizirana četkica (vidi sl. 5.3–12).

5.2.2. Koeficijent trenja

Osnovni prikaz zajedničkoga mehaničkog i molekularnog djelovanja između površina u zoni kontakta dobivamo razmatranjem koeficijenta trenja, te potrošnje četkica i kolektora. Mehaničko djelovanje proizlazi iz elastičnih i plastičnih deformacija površine tijela koja se taru pod relativno visokim pritiskom u stvarnim točkama kontakta, a molekularno djelovanje proizlazi iz sila veze atoma u kristalnim rešetkama približenih tijela. Koeficijent je trenja omjer sile trenja četkice (tangencijalno na kolektorsku kliznu plohu) i sile pritiska četkice (radijalno na kolektorsku kliznu plohu). Područje vrijednosti koeficijenta trenja μ za pojedine grupe kvalitete materijala četkice prikazano je u tablici na slici 1. Najnižu vrijednost koeficijenta trenja imaju elektrografitne i metalografitne četkice, a najviše vrijednosti ugljene četkice. Koeficijent trenja za neku kvalitetu materijala četkice nije određen samo kristalnom strukturom sirovine već i strukturom gotova materijala četkice, pri čemu posebnu ulogu ima veličina zrna i pora.

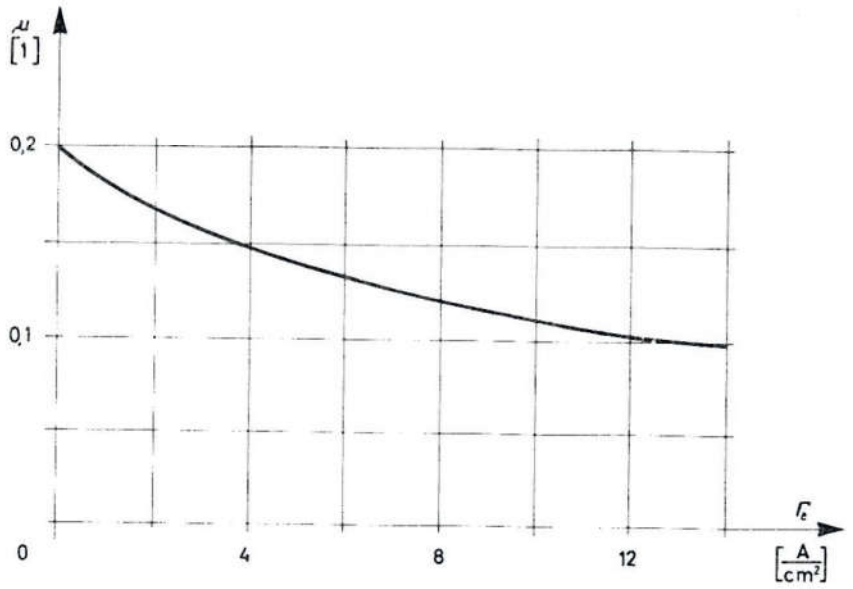
Osnovna karakteristika četkice je ovisnost koeficijenta trenja μ (prosječna vrijednost anodno i katodno polarizirane četkice) o obodnoj brzini kolektora v, a služi i za izračunavanje gubitaka trenja na kolektoru. Na slici 8. prikazana je ovisnost $\mu\ (v)$ za jednu kvalitetu elektrografitne četkice. Vrijednosti $\mu(v)$ snimljene su pri konstantnim vrijednostima pritiska četkice od 22 kPa, gustoće struje od 10 $\frac{A}{cm^2}$ i temperature kolektora od 105°C.



Sl. 8. Ovisnost koeficijenta trenja o obodnoj brzini za jednu kvalitetu elektrografitnih četkica

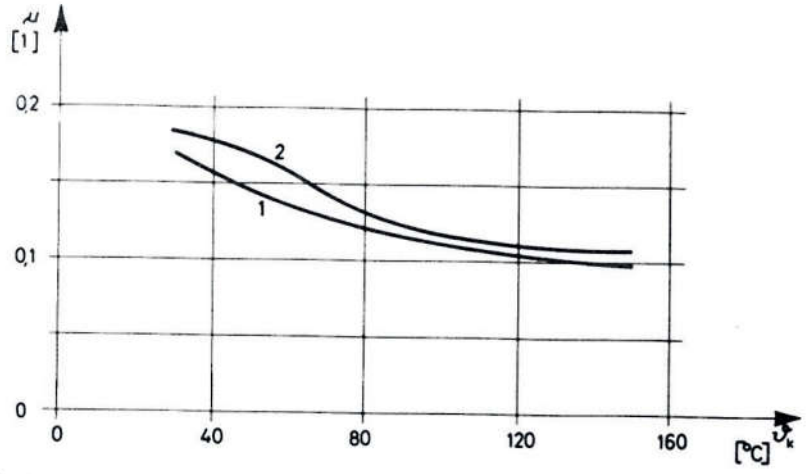
Koeficijent trenja strujno neopterećnih četkica jednak je za anodno i katodno polariziranu četkicu. Sa strujnim opterećenjem četkica, ovisno o kvaliteti njihova materijala, dolazi do različitog stanja kliznih ploha na suprotno polariziranim četkicama. Pod katodno polariziranom četkicom metalna je površina uvijek hrapavija, pa je toj četkici nešto veća vrijednost koeficijenta trenja nego anodno polariziranoj.

S promjenom strujnog opterećenja, uz konstantan pritisak četkica i konstantnu obodnu brzinu kolektora, koeficijent se trenja mijenja. Metalografitnim četkicama i nekim kvalitetama elektrografitnih četkica (osnovni materijal čađa) promjene koeficijenta trenja zanemarivo su male, a drugim se kvalitetama materijala koeficijent trenja smanjuje s porastom strujnog opterećenja. Na slici 9. nalazimo ovisnost koeficijenta trenja μ o gustoći struje četkica $\Gamma_č$ za jednu kvalitetu elektrografitnih četkica. Smanjenje koeficijenta trenja sa strujnim opterećenjem nastupa zbog kemijskih i fizikalnih promjena na kliznim plohama u zoni kontakta, te promjene temperature u zoni kontakta i njezina utjecaja na stvaranje patine. Vrijednosti koeficijenta trenja u tablici na slici 1. ili karakteristike $\mu(v)$ odnose se uvijek na stanje pri nazivnoj gustoći struje i nazivnom pritisku četkica.



Sl. 9. Ovisnost koeficijenta trenja o gustoći struje za jednu kvalitetu elektrografitnih četkica

Pri povišenoj temperaturi kolektora, uz normalnu količinu vlage u rashladnom zraku, koeficijent je trenja manji. Na slici 10. prikazana je ovisnost koeficijenta trenja o temperaturi kolektora pri pritisku od 22 kPa, obodnoj brzini od 10 ms^{-1} i gustoći struje



Sl. 10. Ovisnost koeficijenta trenja o temperaturi kolektora za elektrografitne četkice

četkica od 10 $\frac{A}{cm^2}$ za dvije kvalitete elektrografitnih četkica. Krivulja 1 odnosi se na četkicu kojoj je osnovni materijal čađa, a krivulja 2 na četkicu koje je osnovni materijal petrolkoks.

S porastom pritiska četkica koeficijent se trenja praktički ne mijenja metalografitnim četkicama, a grafitnim, ugljenografitnim i elektrografitnim neznatno se smanjuje, ali ugljenim četkicama neznatno raste.

S promjenom količine vlage u rashladnom zraku mijenja se koeficijent trenja. Najniže vrijednosti ostvaruju se pri normalnoj patini u području vlage od 10 do 15 $\frac{gH_2O}{m^3}$. Pri količini vlage manjoj od 10 $\frac{gH_2O}{m^3}$, zbog preslabe patine, koeficijent se trenja naglo povećava. U slučaju kada količina vlage premašuje 15 $\frac{gH_2O}{m^3}$, na kliznoj se plohi kolektora pojavljuje hrapava patina i sitna izbrazdanost, a koeficijent trenja raste. Ovisnost koeficijenta trenja o količini vlage u rashladnom zraku, za jednu elektrografitnu kvalitetu materijala četkice, prikazana je na slici 6 (za vrijednosti ostalih parametara vidi opis uz sl. 6. u odjeljku 5.2.1).

Osjetan utjecaj na koeficijent trenja ima stanje patine i onda kad nema utjecaja kemijski agresivnih plinova. Patina u osnovi može biti oksidnoga ili grafitnog karaktera. Oksidna patina na stazi klizanja četkica sadrži veoma malo čestica nastalih potrošnjom četkica, a u grafitnoj se patini nalazi mnogo čestica grafita koje su ugnječene u patinu. Grafitnoj je patini koeficijent trenja osjetno viši nego oksidnoj patini, i to za stanje s teretom i bez njega, pa i pri porastu temperature kolektora. U tablici na slici 11. nalazimo vrijednosti [L 47] koeficijenta trenja ovisno o temperaturi kolektora i opterećenju za grafitnu i oksidnu patinu jedne kvalitete elektrografitne četkice.

Patina	Temperatura kolektora °C	Gustoća struje $\frac{A}{cm^2}$	Koeficijent trenja 1	Patina	Temperatura kolektora °C	Gustoća struje $\frac{A}{cm^2}$	Koeficijent trenja 1
grafitna	55 100 150	12	0,19 0,19 0,07	grafitna	21 100 150	0	0,26 0,15 0,08
oksidna	35 100 150	12	0,14 0,07 0,06	oksidna	30 100 150	0	0,14 0,08 0,07

Sl. 11. Utjecaj grafitne i oksidne patine na koeficijent trenja za elektrografitnu četkicu

Veliki utjecaj na koeficijent trenja ima okolina (rashladni zrak) s mehaničkim primjesama (više ili manje abrazivna prašina i druge nečistoće), kemijskim sastavom (sumporovodik, sumpor-dioksid, amonijak, klor, pare sumporne, solne i dušične kiseline, silikona, raznih boja, zatim terpentin, aceton, špirit i slani zrak) i termodinamičkim svojstvima (promjena temperature, vlage i tlaka). Za sve utjecaje okoline može se reći da povećavaju koeficijent trenja od nekoliko desetaka postotaka do nekoliko puta. Za smanjenje utjecaja okoline, ali u većini slučajeva ne i za rješenje, danas se upotrebljavaju posebne vrste impregniranih četkica.

U eksploataciji se pojavljuju još dodatni utjecaji koji mogu povećati koeficijent trenja, a to su: kloparanje četkica u njihovu držaču (pomaci četkica tangencijalno i aksijalno s obzirom na kolektorsku kliznu plohu), čime se stalno mijenjaju stvarne dodirne točke četkice i kolektora, te smanjenje vlage u zoni kontakta zbog iskrenja četkica unatoč konstantnoj vlazi rashladnog zraka.

5.2.3. Trošenje dijelova komutacijskog sklopa

Provedena razmatranja problematike pada napona na četkicama i koeficijenta trenja četkica, koja su neobično važna za rad kolektorskog stroja, nisu nam dala neposredan odgovor i o eksploatacijskim svojstvima kontakta četkice i kolektora. Jedan od pokazatelja za određivanje eksploatacijskih svojstava kolektorskog stroja je potrošnja elemenata kliznog kontakta, tj. četkica i kolektora. Potrošnja četkica mjeri se potrošenom dužinom četkice, a kolektora potrošnjom radijusa, i to za stacionarne strojeve u određenom trajanju rada, a za mobilne strojeve (vučni motori) po određenome prijeđenom putu.

Općenito je potrošnja četkica i kolektora određena djelovanjem mehaničkih, električkih, kemijskih i termodinamičkih parametara.

Djelovanje mehaničkih parametara odražava se narušavanjem veze među česticama krutih tijela, kad se ta tijela gibaju jedno u odnosu prema drugome. Narušavanje veze među četkicama zbiva se na četiri razna načina (procesa). Prvi, odrezivanje isturenih čestica kontaktnih površina (abrazivno trošenje); drugi, molekularno povezivanje čestica iz kontaktnih ploha, lijepljenje tih čestica na jednu od kontaktnih ploha, njihovo premještanje po kontaktnoj plohi i izbacivanje s kontaktne plohe (adhezijsko trošenje); treći, plastično istiskivanje materijala iz zone kontakta zbog djelovanja sila trenja (trošenje zbog plastičnih deformacija); četvrto, umor materijala na površini kontakata, koji nastaje zbog ponavljanja elastičnih naprezanja na točkama stvarnog kontakta.

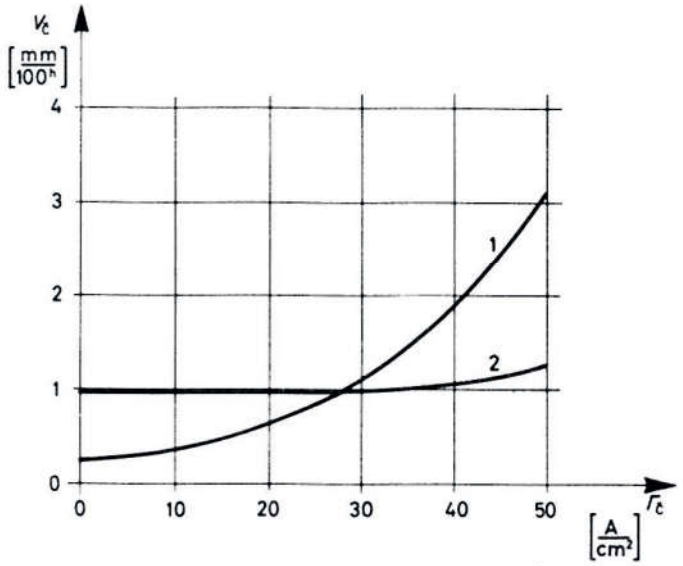
Djelovanje električkih parametara na trošenje četkica i kolektora valja razmatrati odvojeno, ovisno o tome obavlja li se vođenje struje bez iskrenja ili s njim. U primjeru kad se vođenje struje ostvaruje bez iskrenja, potrošnju ne valja razmatrati količinom odnijetog materijala s elektroda zbog seobe električki nabijenih čestica (erozija elektroda), već djelovanjem mehaničkih parametara na kliznim plohama kad u zoni kontakta nastaje seoba tih čestica. U primjeru kad se vođenje struje obavlja uz iskrenje trošenje valja razmatrati djelovanjem izbijanja struje kroz plinovitu smjesu (erozija elektroda) i djelovanjem mehaničkih parametara na promijenjenom stanju kliznih ploha.

Djelovanje kemijskih i termodinamičkih parametara valja razmatrati zajedno s učinkom mehaničkih parametara uzevši u obzir sastav i stanje kliznih ploha u zoni kontakta.

Treba napomenuti da utjecaj nekih parametara nije moguće ustanoviti na stvarnom stroju, već se ispitivanja provode na imitaciji kolektora, tj. na bakrenom prstenu s izrađenim utorima, tako da klizna ploha prstena ima izgled kolektora.

5.2.3.1. Trošenje i potrošnja četkica

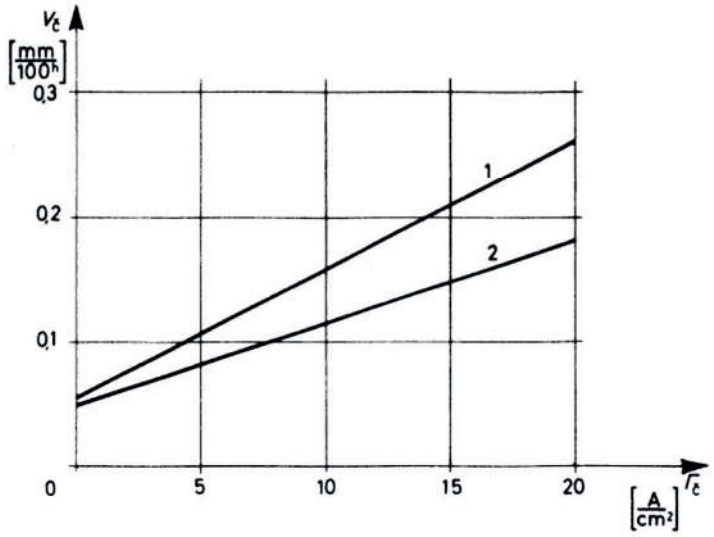
S porastom gustoće struje potrošnja se četkica povećava. Pri manjim gustoćama struje osnovni utjecaj na njihovo trošenje ima stanje oksidnog sloja patine, pri srednjim gustoćama struje već se narušava patina električnim probojima, čime se povećava hrapavost i potrošnja četkice, a uz veće gustoće struje i pogoršano stanje patine nastupa još i jako zagrijanje stvarnih dodirnih točaka četkice i kolektora, zbog čega nastaje izgaranje materijala ili raspucavanje točaka dodira (ugljeni materijali se ne tope i rasprskavaju u obliku kapljica, već sublimiraju) i još veće trošenje. Na slici 12. prikazana je ovisnost potrošnje četkica $V_č$ o gustoći struje $\Gamma_č$ za elektrografitne četkice [L 47] mjerena na bakrenom prstenu s utorima. Tu se krivulja 1 odnosi na osnovni materijal – čađu, a krivulja 2 na osnovni materijal – petrolkoks. Posebno treba napomenuti da se potrošnja četkica smanjuje ako uz istu gustoću struje postavimo više četkicâ manje površine jer time se povećava broj stvarnih dodirnih točaka.



Sl. 12. Ovisnost potrošnje četkica o gustoći struje za elektrografitne četkice

Pozitivne i negativne četkice na kolektoru od bakra ne troše se jednako. Pri strujnom opterećenju kliznog kontakta kationi se premještaju od anodno polarizirane četkice prema kolektoru i od kolektora prema katodno polariziranoj četkici. U primjeru kad su četkice izrađene od crnih materijala (sve četkice osim metalografitnih), u zoni kontakta katodno polarizirane četkice nastaju kationi bakra, a u zoni anodno polarizirane četkice kationi ugljenografitnih materijala. U zoni kontakta katodno polarizirane četkice nastaju čestice bakra i njegovih oksida, površina kontakta postaje hrapava, zbog čega se, djelovanjem mehaničkih parametara, pojavljuje veće trošenje. U zoni anodno polarizirane četkice ne nastaju čestice bakra (osim mehanički prenijetih iz druge kontaktne zone), površina je kontakta manje hrapava i trošenje je manje. Na slici 13. predočena je ovisnost $V_č(\Gamma_č)$ za jednu kvalitetu elektrografitne četkice [L 23], pri čemu je

krivulja 1 za katodno polariziranu četkicu, a krivulja 2 za anodno polariziranu. Iz slika 12.i 13. vidi se da potrošnja elektrografitnih četkica u području gustoće struje od 0 do 20 $\frac{A}{cm^2}$ raste praktički linearno s porastom gustoće struje. U primjeru metalografitnih četkica s većim postotkom bakra u zoni kontakta anodno i katodno polarizirane četkice nastaju kationi bakra. Budući da je materijal kolektora kompaktan, a četkica porozna, trošenje anodno polarizirane četkice bit će nešto veće od onoga u katodno polarizirane.

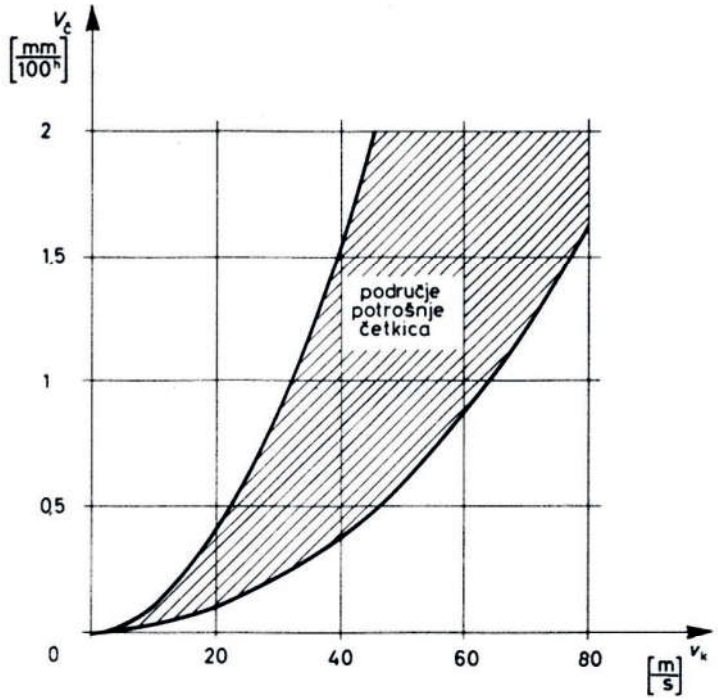


Sl. 13. Ovisnost potrošnje četkica o gustoći struje za različito polarizirane četkice jednoga elektrografitnog materijala četkica

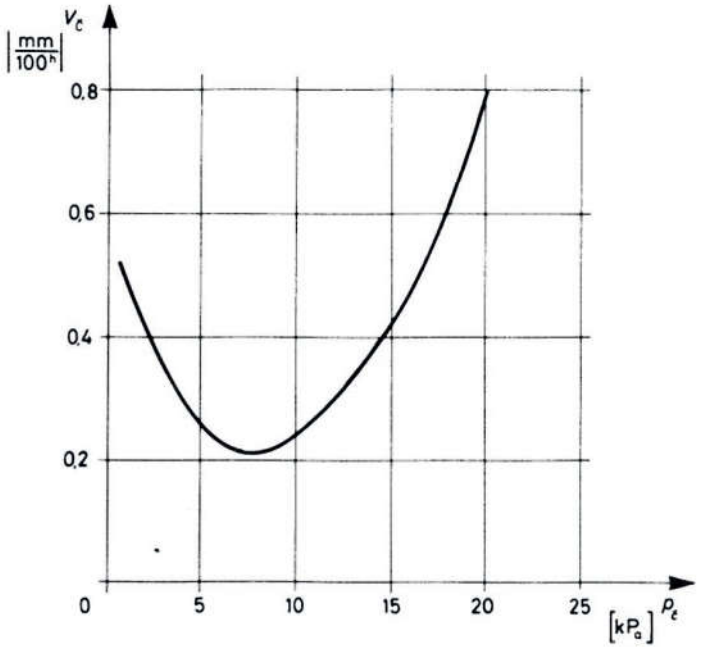
Obodna brzina kolektora ima veliki utjecaj na trošenje četkica. S promjenom obodne brzine pojavljuje se utjecaj raznih međusobno povezanih parametara, npr.: brzine vrtnje, ekscentričnosti kolektora, zračnog sloja između četkice i kolektora, vibracija, temperature, stanja kliznih ploha u zoni kontakta itd. Iz tih razloga nemoguće je za određeni stroj sigurno predvidjeti potrošnju četkica. Može se reći da se trošenje četkica određene kvalitete materijala mijenja približno s kvadratom obodne brzine, te da se najmanje troše neke grafitne i elektrografitne kvalitete (veća dopuštena obodna brzina u tablici na sl. 1), a najviše metalografitne s većim postotkom bakra (manja dopuštena obodna brzina u tablici na sl. 1). Na slici 14. nalazimo informativnu potrošnju elektrografitnih četkica srednjih i većih istosmjernih strojeva na osnovi statističkog praćenja u eksploataciji.

Minimalno trošenje četkica ostvaruje se pri optimalnom pritisku. S porastom pritiska četkica povećava se njihovo trošenje zbog utjecaja mehaničkog trošenja, a u nekim okolnostima i zbog utjecaja termičke deformacije kliznih ploha kontakta. Sa smanjenjem pritiska četkica, već pri neznatnim udarcima ili vibraciji četkica, povećava se trošenje zbog mjestimično velikih gustoća struje ili čak iskrenja (prekid kontakta). Slika 15. predočuje ovisnost potrošnje četkica o njihovu pritisku za jednu kvalitetu elektrografitnih četkica [L 47] pri temperaturi

kolektora od 90°C i obodnoj brzini od 40 ms^{-1}. Veličina pritiska četkice za minimalo trošenje ovisi uglavnom o mirnoći mehaničkog rada kontakta četkice i kolektora. Što je nemirniji mehanički rad kontakta, to je optimalni pritisak veći. Kolektorskim strojevima s čestim strujnim preopterećenjem potrebno je također nešto povećati pritisak četkica.

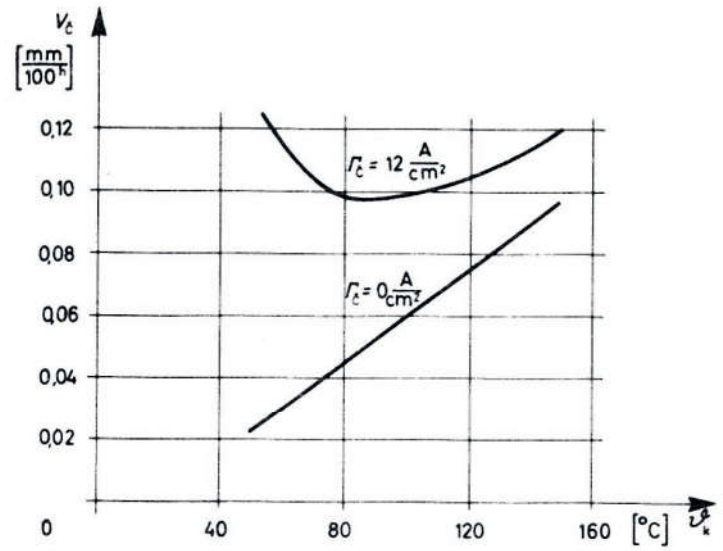


Sl. 14. Ovisnost potrošnje elektrografitnih četkica o obodnoj brzini

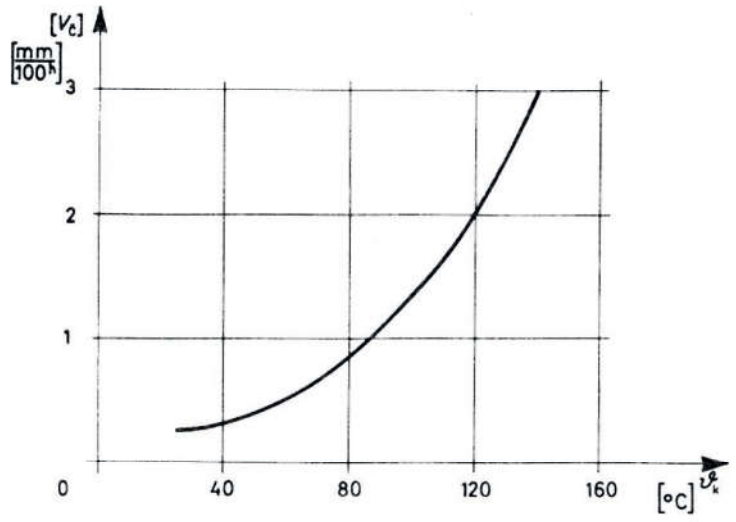


Sl. 15. Ovisnost potrošnje četkica o pritisku za jednu kvalitetu elektrografitnih četkica

S promjenom temperature kolektora mijenja se trošenje četkica. S porastom temperature kolektora intenzivira se proces oksidacije, patina na klizoj plohi postaje hrapavija i trošenje se četkice povećava. Razmotrimo najprije ovisnost trošenja o temperaturi za četkice izrađene od crnih materijala. Strujno neopterećenoj četkici mijenja se trošenje pravocrtno s porastom temperature. Za neke kvalitete materijala, pri strujno opterećenoj četkici uz određenu gustoću struje, uočena je neka temperatura kolektora pri kojoj je trošenje minimalno. S porastom ili sa smanjenjem temperature ono se povećava. Povećanje trošenja pri nižim temperaturama tumači se porastom hrapavosti patine do kojeg dolazi zbog velikoga strujnog opterećenja stvarnih dodirnih točaka četkice i kolektora, jer se sa snižavanjem temperature kolektora smanjuje broj točaka električnog proboja patine. Na slici 16. prikazana je ovisnost potrošnje četkica o temperaturi kolektora jedne kvalitete elektrografitnih četkica [L 47] za gustoću struje $\Gamma_č = 0$ i $\Gamma_č = 12 \frac{A}{cm^2}$.



Sl. 16. Potrošnja četkice ovisno o temperaturi kolektora za jedan elektrografitni materijal četkice pri neopterećenom i opterećenom strujnom stanju



Sl. 17. Potrošnja bakrenografitne četkice ovisno o temperaturi kolektora za strujno neopterećeno stanje

Metalografitnim četkicama trošenje se četkica jako povećava s porastom temperature kolektora jer porast temperature intenzivira oksidaciju ne samo kolektora već i četkica. Na slici 17. nalazimo potrošnju bakrenografitne četkice (sa 75 % bakra) ovisno o temperaturi kolektora za strujno neopterećenu četkicu [L 47].

Utjecaj temperature okoline i načina hlađenja (otvoreni, zatvoreni stroj) na potrošnju četkica treba uzeti u obzir sa stvarnom temperaturom kolektorske klizne plohe.

S promjenom količine vlage u rashladnom zraku mijenja se trošenje četkica. Najniža potrošnja ostvaruju se pri normalnoj patini u području vlage od 10 do 15 $\frac{gH_2O}{m^3}$. Pri količini vlage manjoj od 10 $\frac{gH_2O}{m^3}$, zbog preslabe patine, povećava se molekularna veza čestica kontaktnih ploha, te kao posljedica toga raste adhezivno i ukupno trošenje. U slučaju kada količina vlage premašuje 15 $\frac{gH_2O}{m^3}$, nastaje prejaka, hrapava i sitno izbrazdana patina, pa povećava abrazivno i ukupno trošenje četkica. Ovisnost potrošnje četkica o količini vlage u rashladnom zraku za jednu elektrografitnu kvalitetu materijala četkice prikazana je na slici 6 (vrijednosti ostalih parametara vidi u opisu uz sl. 6). Za rad kolektorskog stroja s obzirom na vlagu rashladnog zraka može se reći da je optimalna količina vlage od 10 do 15 $\frac{gH_2O}{m^3}$, da stroj može još ispravno raditi do količine vlage od 4 do 5 $\frac{gH_2O}{m^3}$, i da sa smanjenjem količine vlage nastaju teškoće, a da je rad kolektorskog stroja nemoguć pri količini vlage manjoj od 0,5 $\frac{gH_2O}{m^3}$. Iz tih je razloga otežan rad kolektorskih strojeva u područjima s niskim temperaturama, na većim nadmorskim visinama, a osobito u zrakoplovstvu. U tim nepovoljnim uvjetima rada za ublažavanje problema velike potrošnje četkica upotrebljavaju se posebne vrste impregniranih četkica.

Osjetan utjecaj na potrošnju četkica ima njihov nemirni hod na kolektoru (vibriranje, često odskakivanje i kloparanje) uzrokovan raznim unutrašnjim mehaničkim uzbudama (ekscentričnost kolektora, rezonancija dijelova komutacijskog sklopa itd.) i vanjskim mehaničkim uzbudama (vibracije i udarci radnog mehanizma ili pogonskog stroja, prijenos vibracija kroz temelj, udarci pri vučnom motoru zbog loše pruge itd.). Svojstveno je nemirnom radu četkica, bez obzira na uzroke, da neke od njih povremeno ne provode ili loše provode struju i da tad struju provode ostale paralelno spojene četkice. Zbog toga nastaje preopterećenje nekih četkica (mjestimično velike gustoće struje) i pojava iskrenja na njima, te je posljedica toga povećano trošenje četkica. Odlučujuću ulogu u toj pojavi imaju pritisak četkica, sistem ostvarenja pritiska, masa četkice i prigušno djelovanje njezina materijala. Iz podataka ispitivanja [L 54] izlazi da se pri vibracijama s ubrzanjem od 8g povećava potrošnja cca 15 %, a s ubrzanjem od 12 g cca 70 %.

Značajan utjecaj na trošenje četkica ima iskrenje na njima, koje može biti mehaničke ili je elektromagnetske prirode.

Trošenje se četkica povećava s pojavom i pojačanjem iskrenja. Iskra na četkicama je kratkotrajan električni luk, pri kojem su četkica i kolektor podvrgnuti eroziji (izgaranju ili isparavanju materijala, jer točke dodira električnog luka s elektrodama imaju visoku temperaturu), iz čega proistječe relativno veliko trošenje, takozvano trošenje zbog izgaranja. Ono izravno ovisi o kvaliteti materijala četkica, a za crne materijale najmanje je za četkice izrađene na bazi retortnog ugljena, zatim za elektrografitne, a najveće je kod onih od tvrdog ugljena. Bakrenografitnim četkicama trošenje zbog izgaranja znatno je veća nego elektrografitnima zbog niže temperature izgaranja u usporedbi s ugljenom. Uslijed iskrenja raste hrapavost kliznih ploha pa se zato povećava abrazivno trošenje.

Pri iskrenju na četkicama trošenje je katodno polarizirane četkice veće nego anodno polarizirane, a zajednička potrošnja se povećava s jačinom iskrenja. Razni proizvođači

ocjenjuju jačinu iskrenja na različite načine. U tablici na slici 18. prikazano je stupnjevanje iskrenja četkica koje se upotrebljava u »Radi Končaru«. Ovisno o otpornosti na izgaranje upotrijebljene kvalitete četkica, potrošnja se četkica pri stupnju iskrenja $1\frac{1}{4}$ neznatno povećava, pri stupnju iskrenja $1\frac{1}{2}$ raste za nekoliko desetaka postotaka, a pri stupnju iskrenja 2 čak do deset puta.

Stupanj iskrenja	Karakteristika stupnja iskrenja	Izgled kolektora i četkica
1	nema iskrenja (tamna komutacija)	
$1\frac{1}{4}$	slabo točkasto iskrenje na manjem dijelu četkice	nema pocrnjenja kolektora ni nagaranja četkica
$1\frac{1}{2}$	slabo iskrenje pod većim dijelom četkice	pojavljuju se tragovi pocrnjenja na kolektoru, koji se lagano odstranjuju brisanjem površine kolektora benzinom; ima tragova nagaranja na četkicama
2	iskrenje pod cijelim bridom četkice; dopušta se samo za kratkotrajna preopterećenja	pojavljuju se tragovi pocrnjenja na kolektoru, koji se ne mogu odstraniti brisanjem površine kolektora benzinom; ima tragova nagaranja na četkicama
3	znatno iskrenje pod cijelim bridom četkice s postojanjem jakih i otkidajućih iskra; dopušta se samo za vrijeme direktnog zaleta (bez predotpora ili promjene napona) ili reverziranja stroja, ali samo tad kad kolektor i četkice ostanu u stanju sposobnom za daljnji pogon	značajno pocrnjenje na kolektoru koje se ne može odstraniti brisanjem površine kolektora benzinom; izgaranje i narušenje klizne plohe i brida četkice

Sl. 18. Stupnjevanje iskrenja četkica kolektorskog stroja

Daljnji veći utjecaj na potrošnju četkica imaju mehaničke primjese i nepovoljan kemijski sastav okolnog zraka. Prašina, koja u kolektorski prostor dolazi s rashladnim zrakom, ulazi između četkica i kolektora, te uzrokuje povećanu potrošnju četkica i narušava stanje kolektorske klizne plohe. Posebno je štetna cementna prašina, zatim pijesak, ulična prašina, fina zrnata šljaka, te prašina nastala od umjetnih vlakana i teksila. Djelovanje uljnih para, koje kemijski ne reagiraju s bakrom, može biti dvojako, što ovisi o debljini uljnog sloja (filma), viskoznosti i o temperaturi kolektora. Deblji uljni sloj na kolektoru ometa vođenje struje, uzrokuje izbrazdanost kolektorske klizne plohe i povećano trošenje četkica. Tanki sloj ulja (1–2 sloja molekula), koji nastaje pri uravnoteženom stanju kondenzacije i isparavanja (redovito pri višoj temperaturi kolektora) čak poboljšava uvjete rada kliznog kontakta i trošenje se četkica smanjuje. Posebno valja napomenuti da ovo razmatranje ne vrijedi kad se u ulju ili masti nalaze aditivi na bazi silicija. Osobito teške zahtjeve pred rad četkica postavlja djelovanje okoline u papirnoj, gumenoj i šećernoj industriji, zatim u pogonima galvanizacije, koksarama, željezarama i slično. Tamo nastali plinovi i pare kemijski reagiraju s bakrom i na kolektorskoj kliznoj plohi stvaraju izolacijski sloj (npr. sumporovodik, sumpor-dioksid) ili razaraju patinu (npr. klor, amonijak). Ukratko

se može reći da kemijskim utjecajem nastaje izbrazdana kolektorska klizna ploha s povećanom potrošnjom četkica.

Pri radu u vodiku četkice se jače troše jer vodik reducira stvaranje patine. Da bi se smanjilo trošenje četkica, potrebno je vodiku dodati vlage.

Poseban problem ponašanja kliznog kontakta nastaje kad su u kolektorskom prostoru pare organskih silicijskih spojeva, takzvane silikonske pare. Osnovni su izvori tih para silikonska izolacija namota i maziva s aditivima na bazi silicija. Pri zagrijavanju tih spojeva do temperature više od 100°C isparava silikon, silikonske pare dolaze na kolektor i pri elektrolitskom procesu rastvaranja vlage zbog djelovanja struje, na patini kolektora nastaje sloj silicij-dioksida Sio_2 (silikonski sloj) koji tvori električnu izolaciju. Treba napomenuti da odlučujuću ulogu pri nastajanju silonskog sloja na kolektoru ima vlaga uz prolazak struje kontaktnom plohom, jer uz samo silikonske pare i vlagu bez prolaska struje ne nastaje sloj silikona na kolektoru. Kad je prisutan silikonski sloj na patini, potrebno ga je za vođenje struje električki probiti jer on djeluje izolacijski. Zbog toga se povećava pad napona na četkicama, a na kolektoru nastaje hrapava i izbrazdana površina, s velikim trošenjem četkica (do desetak puta i više) kao posljedicom. Utjecaj silikonskih para veoma je značajan pri kolektorskim strojevima sa zatvorenim sistemom ventilacije, a za one s otvorenim sistemom ventilacije praktički je nebitan. Pri zatvorenom sistemu ventilacije viša je temperatura zraka u unutrašnjosti stroja, viša je temperatura kolektora i manja količina vlage. Tad povećano trošenje četkica osim djelovanja silikonskih para uzrokuje i viša temperatura kolektora i smanjena količina vlage. Da bi se smanjio utjecaj silikonskih para na trošenje četkica, danas se na visoko iskorištene kolektorske strojeve postavljaju posebno impregnirane elektrografitne četkice.

Prašina uzrokovana trošenjem četkica veoma je fina. Čestice prašine elektrografitnih četkica nastale mehaničkim trošenjem cilindričnog su oblika, promjera od 1 do 2 μm i dužine cca 20 μm, a one nastale električnim trošenjem raznog su oblika i promjera od jednog do nekoliko μm. Specifična površina prašine vrlo je velika i iznosi nekoliko stotina m^2g^{-1}. Ona jako apsorbira plinove i vodenu paru te ih kemijski veže. U radu strojeva sa zatvorenim sistemom hlađenja to je svojstvo važno jer stvorena prašina smanjuje vlagu u zatvorenom prostoru.

Pri jako hrapavom kolektoru čestice su prašine većih dimenzija, a kod bakrenografitnih četkica s visokim sadržajem bakra čestice su jako grube i imaju oblik krupice.

5.2.3.2. Potrošnja kolektora

Na kliznom kontaktu uz četkicu se troši i kolektor, a pri radu u čistoj atmosferi potrošnja mu je za dva reda veličine manja od potrošnje četkica. Fizikalno-kemijska zbivanja u zoni kontakta, koja se odnose na trošenje kolektora, većim su dijelom prikazana u razmatranju trošenja četkica, pa ih ovdje nećemo ponavljati. Protumačimo još samo ona zbivanja specifična za kolektor.

Tvrdoća materijala četkice djeluje na mehaničko trošenje kolektora. Tvrde negrafitirane četkice znatno više troše kolektor od elektrografitnih, pa se već nakon nekoliko dana rada na kolektoru vide jasni tragovi četkica, pogotovo kad mu je tvrdoća bakra manja. Jednako je djelovanje četkica od prirodnog grafita, koje često sadrže izvjestan iznos nečistoća što uzrokuju abrazivno djelovanje.

S porastom strujnog opterećenja neznatno se povećava trošenje kolektora. Pri opterećenju gustoćama struje većim od 50 $\frac{A}{cm^2}$ potrošnja kolektora naglo raste

jer se na patini ne može stvoriti zaštitni grafitni sloj. Potrošnja kolektora pod katodno polariziranom četkicom veća je od one pod anodno polariziranom (fizikalno je proces elektrolitske prirode).

Iskrenje četkica povećava trošenje kolektora, a potrošnja zbog iskre približno je proporcionalna količini elektriciteta prenesenoga iskrom. Trošenje kolektora pod četkicama ovisi o polaritetu, a veće je pod katodno polariziranom četkicom.

S rashladnim zrakom ulazi prašina između četkica i kolektora, i ona ima abrazivno djelovanje, a potrošnja kolektora ovisi o koncentraciji prašine, te o tvrdoći i veličini zrna.

Značajan utjecaj na trošenje kolektora ima nastanak izolacijskog sloja na patini. Zbog prisutnosti uljnih para, masti i drugih materijala na patini se kolektora stvara izolacijski sloj, koji treba električki probiti pri vođenju struje. Na točkama dodira električnog luka s kolektorom nastaju visoke temperature i bakar teži k taljenju. U tom procesu nastaju mostići bakra koje djelomično odstranjuju četkice, a djelomično oni prelaze u pore četkice. Nakon duljeg vremena rada, na kliznoj se plohi kolektora pojavljuju tragovi svjetlije patine, dolazi do izbrazdanosti klizne plohe i do povećanog trošenja kolektora.

Pri temperaturama kolektora višima od 130 °C na njegovo trošenje utječe i električni potencijal kontakta. Kontaktom četkice s oksidnim slojem bakra kolektora uspostavlja se električno polje u oksidnom sloju, a na krajevima kontakta pojavljuje se električni potencijal (takozvani Volta-napon termočlanka), bez obzira na to je li vanjski napon priključen ili nije. Potencijal kontakta iznosi nekoliko desetih dijelova volta. Pri višim temperaturama kolektora (više od 130 °C) nastaje intenzivno pokretanje iona bakra u oksidnom sloju, i to u smjeru bakar-oksidni sloj – vanjska površina kolektora. U tom procesu dolazi do hrapavosti kolektora i njegova povećanog trošenja. Utjecaj električnog potencijala kontakta praktički je zanemariv pri temperaturama kolektora do 120 °C.

Potrošnju kolektora praktički je nemoguće ustanoviti raznim laboratorijskim istraživanjima, već se ona mjeri nakon duljeg rada u eksploataciji. Tako dobivene vrijednosti su informativne jer je često teško ocijeniti koliko je sati stroj stvarno bio u

Vrsta i namjena kolektorskog stroja	Brzina vrtnje	Potrošnja kolektora
	min^{-1}	$\frac{mm}{10\,000\,h}$
Univerzalni motori razne primjene s četkicama bez sadržaja metala	3000 – 15000	4,5 – 15
Istosmjerni strojevi srednjih snaga novije konstrukcije	cca 1500	0,3 – 1
Veliki istosmjerni motori	50 – 90	0,03 – 0,08
Veliki istosmjerni motori u zagađenoj atmosferi	150 – 200	0,25 – 0,3
Generatori Ilgnerova agregata	400 – 600	0,15 – 0,4
Uzbudnik elastično spojen na osovinu generatora	3000	0,8 – 1
Uzbudnik na kraju osovine generatora	3000	1 – 1,2

Sl. 19. Potrošnja kolektora za razne vrste i namjene kolektorskih strojeva

pogonu, a koliko je stajao, te u kojim je uvjetima eksploatiran (promjena opterećenja, podešavanje brzine vrtnje itd.). U tablici na slici 19. prikazani su podaci informativne potrošnje kolektora raznih vrsta i namjene kolektorskih strojeva.

5.2.4. Gubici na kontaktu četkice i kolektora

Zagrijanje kolektora proporcionalno je gubicima koji nastaju na kliznom kontaktu između četkice i kolektora. Tu nastaju mehanički gubici $P_{trč}$ uzrokovani trenjem i električni gubici $P_{elč}$ izazvani padom napona na kontaktu pri prijelazu struje.

Mehanički gubici ovise o pritisku i površini četkice, koeficijentu trenja i obodnoj brzini kolektora, pa iznose:

$$P_{km} = 0{,}1\,\mu p_č\ S_č v_k\ [\mathrm{W}], \tag{1}$$

pri čemu je μ koeficijent trenja [1], $p_č$ pritisak četkica [kPa] $S_č$ ukupna površina prilijeganja četkica na kolektor [cm^2] i v_k obodna brzina kolektora [ms^{-1}].

Električni gubici ovise o padu napona na četkicama i struji:

$$P_{elč} = \Delta U_č I_a\ [\mathrm{W}], \tag{2}$$

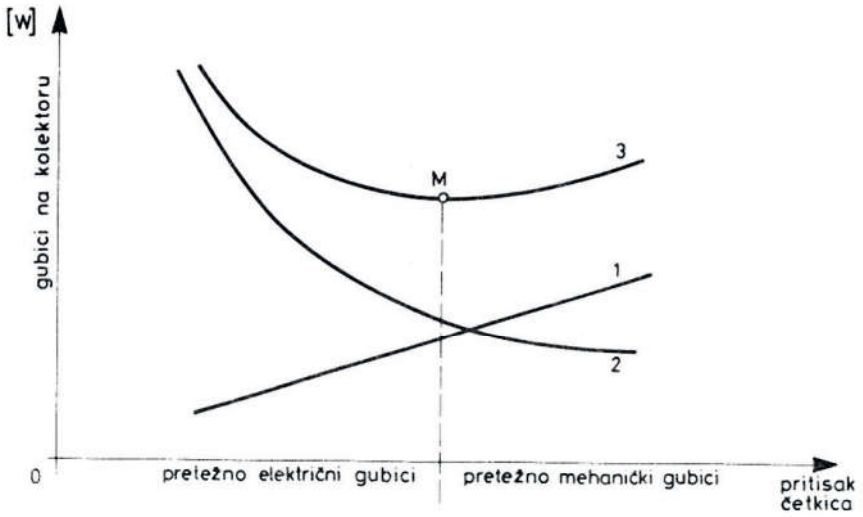
a $\Delta U_č$ je pad napona za dvije u seriju spojene četkice.

Vrijednost ukupnih gubitaka na kolektoru mijenja se s pritiskom i površinom četkica.

Za kolektor određenih dimenzija, brzine vrtnje i struje, te za odabranu kvalitetu materijala četkica, postoji neki pritisak četkica pri kojem su ukupni gubici na kolektoru najmanji. S porastom pritiska četkica praktički se ne mijenja koeficijent trenja, a prema izrazu (1) povećavaju se mehanički gubici. Istodobno, pri povećanom pritisku četkica smanjuje se pad napona na četkicama prema izrazu (2) pa i električki gubici. Na slici 20. predočena je ovisnost gubitaka na kolektoru o pritisku četkica, pri čemu krivulja 1 prikazuje mehaničke gubitke, krivulja 2 električne gubitke, a krivulja 3 ukupne gubitke. Sa slike 20. vidi se da su najmanji ukupni gubici u točki M, pa će i pripadni pritisak četkica u točki M biti optimalni pritisak četkica s obzirom na zagrijavanje kolektora.

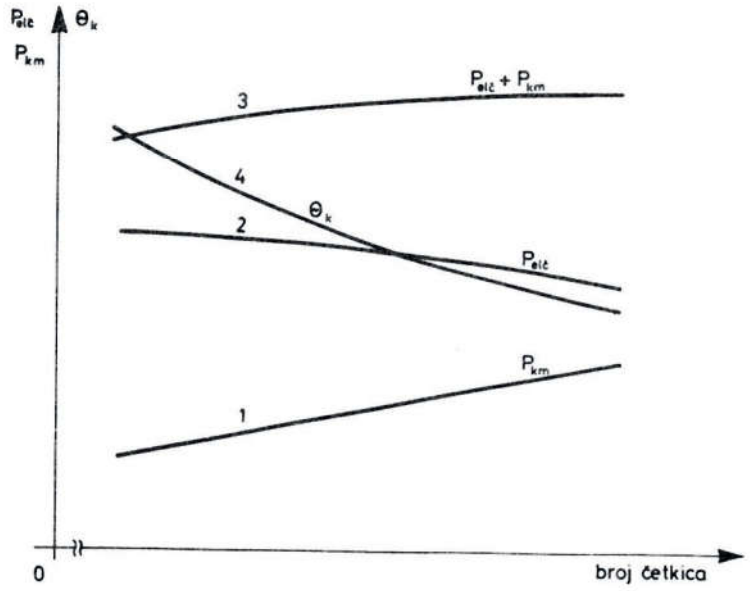
Protumačimo, dalje, promjenu ukupnih gubitaka i zagrijanja kolektora u primjeru gdje se mijenja površina četkica. Za kolektor određenog promjera i brzine vrtnje, uz konstantni pritisak četkica, koeficijent trenja i dimenziju četkice po luku kolektora, sa smanjenjem površine četkica (ili broja četkica), povećava se gustoća struje, pa rastu pad napona na četkicama i električni gubici na kolektoru. Istodobno se smanjuju mehanički gubici i ukupni gubici na kolektoru. Uz nepromijenjenu dužinu klizne plohe kolektora smanjit će se tad i zagrijanje kolektora, ali će tad dio dužine klizne plohe kolektora biti bez četkica. U ovom razmatranju nismo mijenjali dimenzije (dužinu) kolektora i nisu se mijenjali uvjeti hlađenja, pa je zagrijanje kolektora uvijek bilo proporcionalno nastalim gubicima.

Skratimo li dužinu kolektorske klizne plohe proporcionalno smanjenju broja četkica, mijenjaju se uvjeti hlađenja kolektora, tj. proporcionalno opada i odvod gubitaka s kolektora. Budući da se pri tome odvod gubitaka s kolektora više smanjuje nego što se smanjuju nastali gubici, povećava se zagrijanje kolektora.



Sl. 20. Ovisnost gubitaka na kolektoru o pritisku četkica

Pri izradi konstrukcijskog osnutka stroja može se uzeti da je optimalan onaj broj četkica pri kojem zagrijanje kolektora ne premašuje dopušteno, a dužina je klizne plohe kolektora potpuno popunjena četkicama. Jasno je da pri tome valja uračunati predviđeno strujno preopterećenje stroja, kako gustoća struje na četkicama ne bi prekoračila dopuštene vrijednosti. Na slici 21. prikazana je ovisnost gubitaka i zagrijanja kolektora o broju četkica za primjer gdje je dužina klizne plohe kolektora potpuno popunjena četkicama, pri čemu krivulja 1



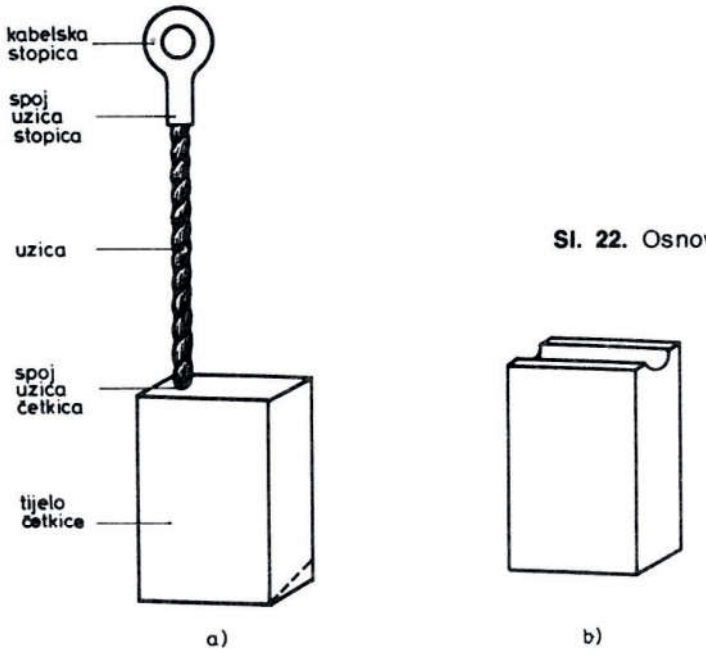
Sl. 21. Ovisnost gubitaka i zagrijavanja kolektora o broju četkica kad one sasvim popunjavaju dužinu kolektorske klizne plohe

prikazuje mehaničke gubitke P_{km}, krivulja 2 električne gubitke $P_{elč}$, krivulja 3 ukupne gubitke $P_{km} + P_{elč}$ i krivulja 4 zagrijanje Θ_k kolektora.

Iz provedenih razmatranja uočavamo da pritisak četkica može biti odabran na osnovi općenitih preporuka njihovih proizvođača (sl. 1), s obzirom na minimalnu potrošnju četkica (sl. 15) ili s obzirom na minimalne gubitke i zagrijanje kolektora (sl. 20). Gustoća struje četkica može se odabrati prema preporuci proizvođača četkica (sl. 1) ili na osnovi minimalnih dimenzija kolektora uz dopušteno zagrijanje kolektora (sl. 21).

5.2.5. Izvedba četkica

Prema načinu kako se vodi struja od četkice na njezin držač, četkice se dijele na dvije osnovne izvedbe – na četkice s uzicom i četkice bez uzice. Na slici 22.a je četkica s uzicom. Ona se sastoji od tijela četkice, uzice i kabelske stopice, a ima dva karakteristična spoja: spoj uzice s tijelom četkice i spoj uzice s kabelskom stopicom. Na slici 22.b nalazimo četkicu bez uzice, koja se sastoji samo od tijela, na vrhu kojeg je izveden utor polukružna oblika za ostvarenje kontakta s držačem četkice.



Sl. 22. Osnovne izvedbe četkice

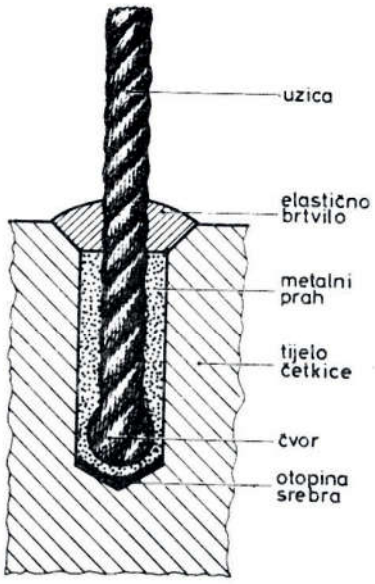
Razmotrimo najprije izvedbu četkice s uzicom, koja se u kolektorskim strojevima najviše upotrebljava.

Tijelo se četkice izrađuje od nekoga materijala prema tablici na slici 1, a ima oblik kvadra, pri radijalnom položaju četkice prema kliznoj plohi kolektora. Ako se četkica upotrebljava u kosom položaju prema kliznoj plohi kolektora, tad joj je dno skošeno za odgovarajući kut, kako je crtkanom linijom prikazano na slici 22.a. Zasad samo spomenimo da se tijelo četkice može sastojati od jednoga ili više dijelova.

Uzica služi za električni spoj tijela četkice s njezinim držačem jer se ni pod koju cijenu ne smije dopustiti da struja prolazi neposrednim kontaktom preko ormarića držača četkica u koji je smještena. Zbog stalnih vibracija s relativno visokim frekvencijama, uzica mora biti vrlo fleksibilna, a izrađuje se pletenjem od mnogo tankih bakrenih žica promjera od 0,05 do 0,07 mm. Dužina uzice mora biti tolika da omogućuje normalan hod tijela četkice u ormariću držača četkica. Ne smije biti predugačka kako u novom (prije trošenja) stanju četkice ne bi doticala dijelove stroja u svojoj okolini, a ni prekratka da četkicu u istrošenom stanju ne zadrži u položaju bez kontakta s kolektorom.

Kabelska stopica služi za ostvarenje električnog kontakta uzice s držačem četkica, a izrađuje se od bakra u raznim standardnim oblicima.

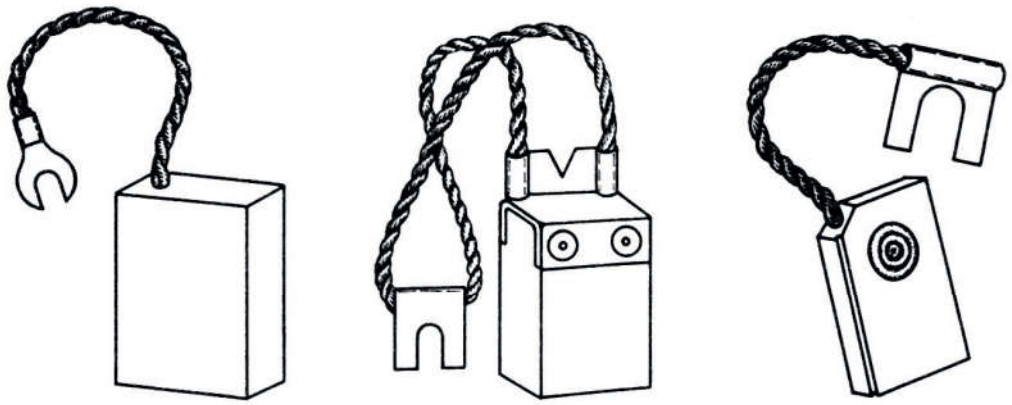
Spoj uzice s tijelom četkice jedan je od najvažnijih elemenata za ispravni rad i četkice i cijeloga komutacijskog sklopa u eksploataciji. Zbog loše izvedenoga ili vremenski nepostojanog spoja (u smislu električnog kontakta), u eksploataciji dolazi do porasta prelaznog otpora tog spoja, što ima loše posljedice. Povećanje prijelaznog otpora spoja direktno utječe na raspodjelu struje među četkicama i uzrokuje veće zagrijanje na mjestu tog spoja. Zbog povećanog zagrijanja i vibracija ispada uzica iz tijela četkice ili čak pregara, čime se dalje pogoršava raspodjela struje, preopterećuju se ostale četkice, komutacija postaje lošija, oštećenje se klizna kolektorska ploha i pojavljuje se ponekad kružna vatra na kolektoru. U nekim primjerima, ovisno o vrsti armaturnog namota, može nastupiti i termičko uništenje izolacije spojki za izjednačenje potencijala.



Sl. 23. Izvedba spoja uzice s tijelom četkice utiskivanjem uzice i sabijanjem metalne prašine

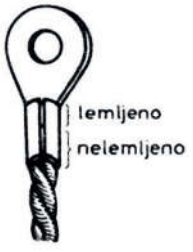
Spoj uzice s tijelom četkice izvodi se na više načina. Najčešće je to utiskivanje uzice u odgovarajuću rupu na vrhu četkice i sabijanje metalnoga (bakrenog, a ponekad i željeznog) praha u međuprostor između uzice i tijela četkice, kako je to shematski prikazano na slici 23. Da bi se smanjio prelazni otpor, u dno rupe na tijelu četkice stavlja se kap otopine srebra. Pri tom načinu izvedbe ne smije

metalni prah biti sabijen do vrha rupe, već 1 do 2 mm niže, a konusno prošireni dio rupe na vrhu tijela četkice valja zaliti elastičnim brtvilom. Time se sprečava nagla promjena mehaničkog momenta otpora, koja bi uz prisutnost vibracija mogla biti uzrok lomu uzica, a ujedno se osigurava vremenska postojanost prelaznog otpora pri radu četkice u vlažnoj ili agresivnoj atmosferi. Kao elastično brtvilo, služe neoprenske mase ili silikonski elastomeri. Takva se izvedba upotrebljava pri mehanički čvrstim materijalima (visoka mehanička naprezanja pri sabijanju metalnog praha) i za dimenzije tijela četkice veće od 5 do 6 mm. Drugi način izvedbe spoja uzice s tijelom četkice je onaj pomoću bakrenoga limenog obloga zakovicama učvršćenoga na vrh tijela četkice (vidi sl. 24.b). Pri toj izvedbi mora biti pobakrena vanjska površina vrha tijela četkice s rupama za zakovice, jer se time smanjuje prelazni otpor spoja. Ta se izvedba odabire pri materijalima četkica manje mehaničke čvrstoće. Na slici 24.c prikazana je još jedna izvedba spoja uzice s tijelom četkice, gdje je taj spoj pojačan cijevnom zakovicom.



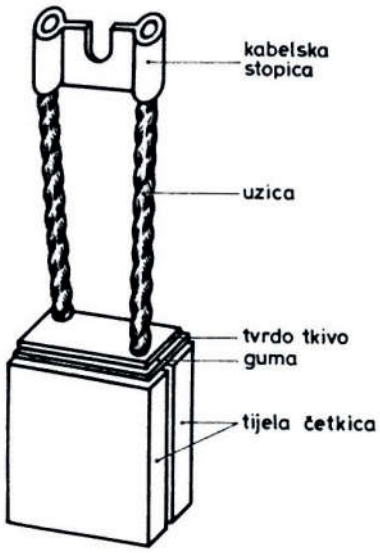
Sl. 24. Spoj uzice s tijelom četkice

Spoj uzice s kabelskom stopicom je mjesto gdje, zbog vibracija, može nastati mehanički prekid uzice. Da bi se spriječilo pucanje uzica, taj spoj mora biti izveden tako da nema naglih promjena mehaničkog momenta otpora. Uzica se za kabelsku stopicu učvršćuje prešanjem, a ponekad i lemljenjem. Za oba načina učvršćivanja vrijedi pravilo da učvršćenje mora biti izvedeno na 1/3 visine ušice, a u 2/3 njezine visine mora uzica biti slobodna. Na slici 25. predočen je taj spoj u primjeru učvršćivanja lemljenjem. Za primjere s osobito jakim vibracijama slobodni (neučvršćeni) dio ušice stopice oblikuje se konusno.



Sl. 25. Spoj uzice s kabelskom stopicom za primjer lemljenja

S porastom iskorištenja kolektorskih strojeva postale su neprikladne četkice kojima se tijelo sastoji od samo jednog komada. Da bi se ostvario bolji kontakt četkice s kolektorom (više točaka stvarnog dodira) i povećao poprečni otpor četkice, potrebno je tijelo četkice u tangencijalnom smjeru (prema kolektorskoj kliznoj plohi) izvesti od više dijelova. U primjeru gdje je tijelo četkice u jednom komadu to se ne spominje posebno, ali gdje je tijelo četkice izvedeno od dva dijela, četkica se naziva *dvodijelna četkica*, ili iz tri dijela *trodijelna četkica*. Na slici 26. dvodijelna je četkica, gdje je na vrhove dvaju dijelova tijela četkice zalijepljena guma, a na nju tvrdo tkivo.



Sl. 26. Izvedba dvodijelne četkice s uzicama

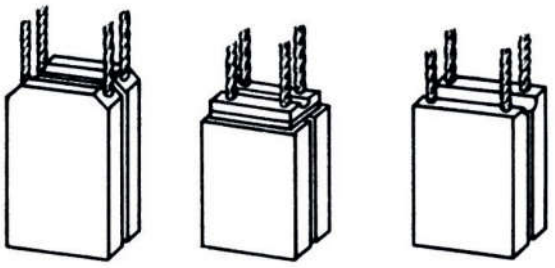
Guma na vrhu tijela četkice ima debljinu od 3 do 5 mm, a kvalitetom mora zadovoljavati zagrijanje četkice u najnepovoljnijim uvjetima opterećenja zbog maloga toplinskog kapaciteta četkice. Zato je redovito izrađena od materijala na bazi silikona. Osnovna joj je namjena izjednačenje potrošnje dijelova tijela četkice (praktički ne prigušuje vibracije jer je tanka).

Tvrdo tkivo zalijepljeno na gumu ima debljinu od cca 0,5 mm, a mehanička je zaštita gume od oštećenja pritiskivačem držača četkica.

S obzirom na mehaničku čvrstoću materijala četkica (crni materijali) i potrebu izvođenja spoja uzice sa svakim dijelom tijela četkice, debljina dijela tijela četkice ne može biti manja od 5 do 6 mm. Pri danas ostvarenom iskorištenju kolektorskih strojeva upotrebljavaju se četkice s tangencijalnom mjerom do 12,5 mm kao jednodijelne, pri 16 mm kao jednodijelne i dvodijelne, a pri 20 i više mm redovito kao dvodijelne. Trodijelne se četkice susreću praktički samo u nekim strojevima s osobito otežanom komutacijom.

Pri dvodijelnoj četkici, osim izvedbe prema slici 26. ima jednostavnijih (za lakše pogone) i kompliciranijih (za teže pogone) izvedaba vrha tijela četkice. Na slikama 27.a i c prikazana je jednostavnija izvedba bez gume i pločice tvrdog tkiva, ali s utorom na vrhu tijela četkice, kojim se pritiskivač držača četkica zadržava u određenom položaju kako bi se osigurala raspodjela pritiska na oba

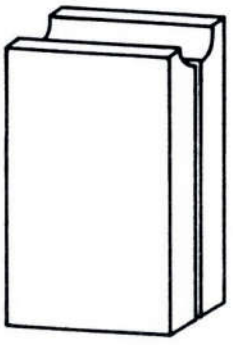
dijela tijela četkice. Na slici 27.b nalazimo kompliciraniju izvedbu s gumom na koju je zalijepljen oblikovani dio od tvrdog tkiva s utorom za postavljanje pritiskivača držača četkica u željeni položaj, čime se osigurava još povoljnija raspodjela pritiska na oba dijela tijela četkice.



Sl. 27. Razne izvedbe tijela dvodijelne četkice

Osim višedijelnih ima još i *višeslojnih četkica,* koje su u osnovi jednodijelne, ali im je tijelo sastavljeno lijepljenjem slojeva različitih kvaliteta materijala četkica. Takve se izvedbe susreću pri kolektorskim strojevima jednog smjera vrtnje s jako otežanim uvjetima komutacije.

U kolektorskim strojevima (osobito za vuču) upotrebljava se izvedba četkice bez uzice. Pri tome se četkica sastoji samo od tijela (vidi sl. 22.b). Na vrhu tijela četkice izrađen je utor polukružna oblika, u koji ulazi metalni valjak kao sastavni dio pritiskivača držača četkica. Taj metalni valjak ima dvostruku funkciju. Prvo, mora osigurati četkici potrebni pritisak i, drugo, mora s četkicom ostvariti dobar električni kontakt. Da se spriječi prolazak struje kroz pritiskivač i njegove okretne zglobove, metalni se valjak izravno spaja s fleksibilnim bakrenim užetom ili pletenicom na mjestu izvoda struje iz držača četkica. Jednako tako, sistem poluga držača četkica za postizanje pritiska mora biti izoliran prema tijelu držača četkica. Četkice bez uzice se ne izrađuju za četkice kraće od 40 mm jer za manje dužine nema mogućnosti ostvarenja potrebne kontaktne površine četkice i metalnog valjka.



Sl. 28. Izvedba dvodijelne četkice bez uzice

Osnovna prednost četkice bez uzice prema onoj s uzicom jest niža cijena jer nema dijelova od skupog bakra. Dalje, za istu masu četkice kao cjeline, četkica bez uzice može biti veće visine, iz čega slijede manji troškovi održavanja, lagana je i zamjena četkica jer nema vijčanih spojeva, a veća je sigurnost u pogonu jer nema izrazito osjetljivih mjesta (npr. spoj uzice s četkicom).

Osnovni nedostaci četkice bez uzice su: nešto lošija raspodjela struje među paralelno spojenim četkicama, ne upotrebljiva je kad su četkice manjih dimenzija i ne odgovara za strojeve s velikim strujnim preopterećenjem (maksimalno podnosi opterećenje do dvostruke nazivne struje).

Na slici 28. dvodijelna je izvedba četkice bez uzice. U izradi četkica te izvedbe treba obratiti posebnu pažnju obliku utora na vrhu četkice, radi osiguranja jednakog pritiska i trošenja za oba dijela četkice. Prilikom montaže i održavanja u eksploataciji valja paziti na to da se međusobno ne zamijene polovice raznih četkica. Ako se to dogodi, potrebno je izmjeriti dimenzije četkica i nanovo brusiti njihovu kliznu „plohu.

I na kraju spomenimo koliko se četkica smije istrošiti u eksploataciji. Pri prevelikom istrošenju visine četkice u eksploataciji može nastati struganje uzica četkica po kolektorskoj kliznoj plohi što će kliznu plohu kolektora oštetiti. Zato se četkica s uzicom mora zamijeniti prije nego što se to dogodi. Pri prevelikom istrošenju, četkica u držaču postaje labava, pogoršava se komutacija, povećava se trošenje četkice, a to uzrokuje naglo smanjivanje već ionako njezine male visine. Zato se četkica smije trošiti samo do oznake koju na nju stavlja proizvođač. Ako takve oznake nema, možemo je istrošiti do 2/3 njezine prvobitne visine.

5.3. Držači četkica

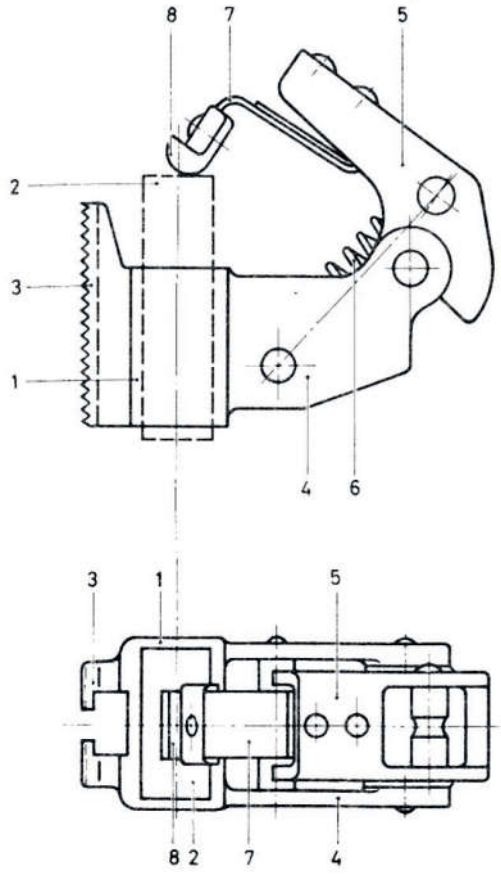
Osnovna je zadaća držača četkica vođenje četkice u određenom smjeru prema kolektorskoj kliznoj plohi i ostvarenje dobrog kontakta četkice s kolektorom pri novoj i istrošenoj četkici, sve u raznim uvjetima eksploatacije. Da se to postigne, potrebno je da držač četkica ispunjava određene općenite zahtjeve (točnost dimenzija otvora ormarića za vođenje četkice, veličina pritiska i njegova tolerancija, okomitost i paralelnost ploha za vođenje četkica prema priključnoj plohi, nepostojanje rezonancije u određenom području frekvencije, mogućnost podešavanja razmaka prema kolektorskoj kliznoj plohi itd.) i još razne dodatne zahtjeve koji proizlaze iz specifičnosti pogona (npr. mehaničke vibracije određenog iznosa i područja frekvencije, mehaničke udarce određenog intenziteta, česte promjene smjera vrtnje i sl.) te uvjeta okoline (npr. slana vlaga, agresivni plinovi i pare, povišena temperatura itd.).

Danas ima *standardnih izvedaba* držača četkica koje udovoljavaju općenitim zahtjevima, lako se prilagođuju ispunjavanju nekih dodatnih zahtjeva (npr. promjena pritiska, korozijska zaštita i sl.), a odgovaraju za razne veličine kolektorskih strojeva slične namjene. *Posebne izvedbe* držača četkica upotrebljavaju se pri samo jednom stroju strogo naznačene namjene (npr. vučni motor).

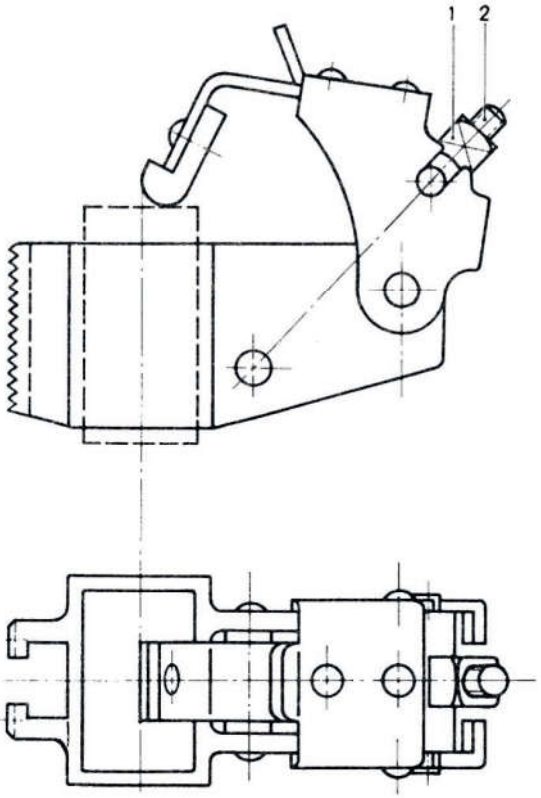
5.3.1. Izvedbe držača četkica

Svaki držač četkica (vidi sl. 1) sastoji se od ormarića (1) koji služi vođenju četkice (2), priključnog kraja (3) za učvršćenje držača na nosač držača četkica, oslonca poluge (4), poluge (5) s perom (6) za stvaranje sile, elastičnog pritiskivača (7) s izoliranim krajem (8) za prijenos sile na četkicu. Ormarić (1), priključni kraj

(3) i oslonac poluge (4) mogu biti zasebni dijelovi međusobno spojeni zakivanjem ili tvrdim lemljenjem, a mogu biti fizički jedan dio izrađen od vučenog profila ili lijevanjem.



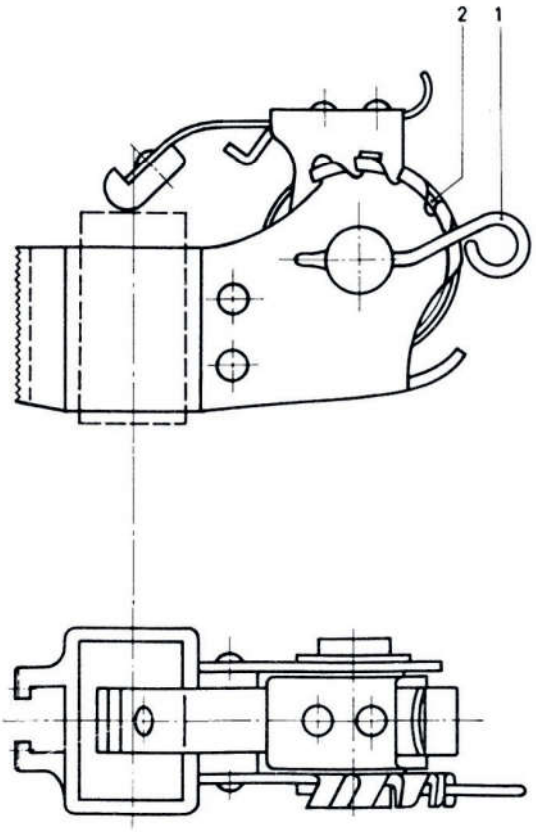
Sl. 1. Radijalni držač četkica s cilindričnim perom, bez podešavanja pritiska



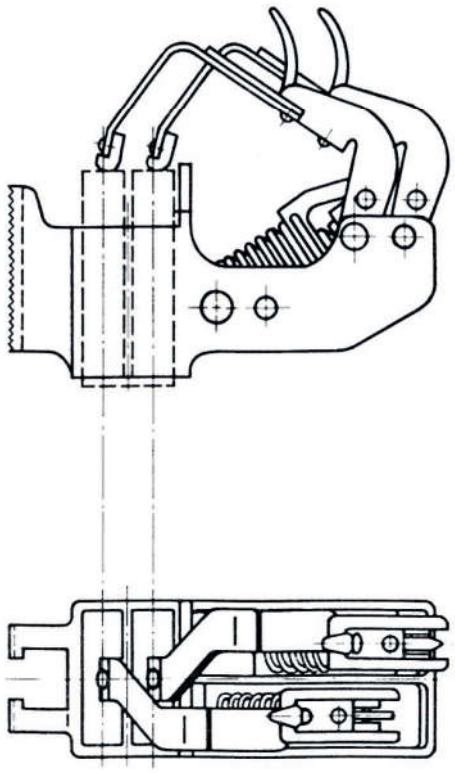
Sl. 2. Radijalni držač četkica s cilindričnim perom i podešavanjem pritiska

Prema smjeru vođenja četkice u odnosu prema kliznoj plohi kolektora razlikujemo *radijalne i kose držače četkica*. Najčešći su radijalni držači, koji vode četkicu okomito na kolektorsku kliznu plohu i omogućuju rad stroja u oba smjera vrtnje. Radijalni držači četkica prikazani su na slikama od 1. do 5. i na slici 7. Kosi držač četkica nalazimo na slici 6. On vodi četkicu pod kutom α prema kolektorskoj kliznoj plohi. Kosi držači namijenjeni su za male nereverzibilne strojeve većih brzina vrtnje, a ponekad i za velike nereverzibilne strojeve s jakim vanjskim mehaničkim udarcima i vibracijama. Današnjim izvedbama kut α iznosi cca 8°, a stare se izvedbe s kutom $\alpha = 30°$ danas više ne ugrađuju, uglavnom zbog relativno male moguće dužine istrošenja četkica.

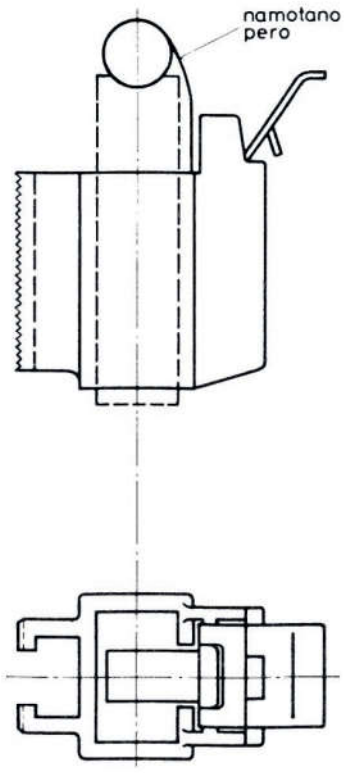
Za funkcionalno vođenje četkice mora otvor ormarića držaču četkica biti točno dimenzioniran. Četkica mora lako kliziti u otvoru bez naginjanja, vibriranja i poskakivanja. Tablica na slici 8. sadrži dopuštene tolerancije dimenzija četkica i držača četkica prema IEC-preporukama za elektrografitne četkice. Iz vrijednosti u tablici vidi se da četkice i njihovi držači moraju biti veoma točno izrađeni, osobito u pravcu vrtnje (mjera t). Posebno valja napomenuti da se spomenute tolerancije



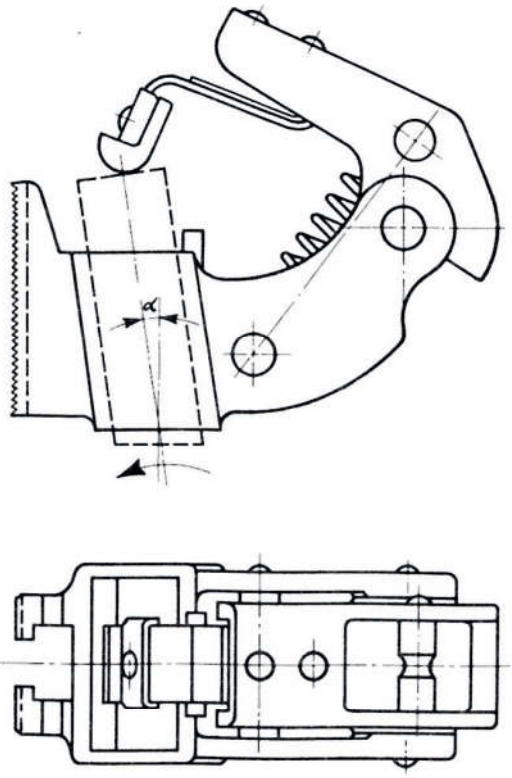
Sl. 3. Radijalni držač četkica sa spiralnim perom i podešavanjem pritiska



Sl. 4. Radijalni tandem-držač četkica s cilindričnim perom, bez podešavanja pritiska

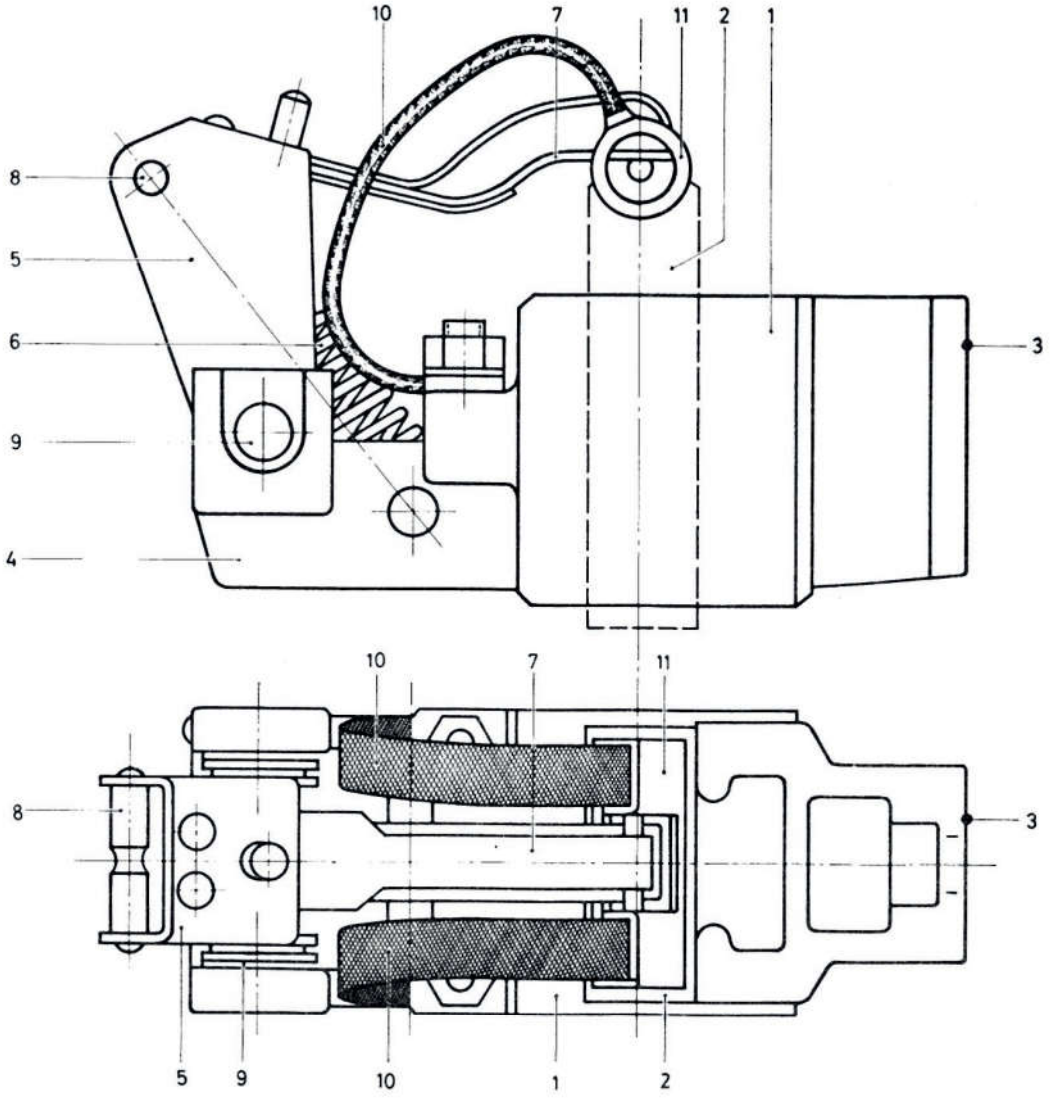


Sl. 5. Radijalni držač četkica s perom od namotane trake, bez podešavanja pritiska



Sl. 6. Kosi držač četkica s cilindričnim perom, bez podešavanja pritiska

odnose na dimenzije oblika tijela četkice, pri čemu moraju zadovoljavati u svim presjecima četkice, pa se mogu utvrđivati samo kalibrom, a ne pomičnim mjerilom. Metalografitne četkice imaju veći temperaturni koeficijent rastezanja i za njih vrijede drugi iznosi tolerancija, a tolerancije držača četkica ostaju nepromijenjene.

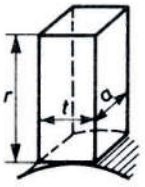


Sl. 7. Radijalni držač četkica s cilindričnim perom, bez podešavanja pritiska, za četkicu bez uzice

Svaki držač četkica mora osiguravati praktički konstantan pritisak četkice na kolektor u području trošenja visine četkice (mjera r na sl. 8), tj. od nove do potpuno istrošene četkice. To se postiže raznim konstrukcijama pomoću pera i poluga ili samo pomoću pera. Tako držači četkica na slikama 1, 2, 4, 6. i 7. imaju polugu i cilindrično pero, držač četkica na slici 3. samo spiralno pero i držač četkica, na slici 5. samo pero od namotane trake. Ne ulazeći u detalje konstrukcije može se reći da najveću promjenu pritiska u području istrošenja četkice ima držač četkica s polugom i cilindričnim perom, a najmanju onaj s perom od namotane

Tolerancije za t i a u [μm] a za r u [mm]

Nazivne dimenzije	Držač četkice t, a			Četkica t, a			Zračnost četkica--ormarić		Visina r
mm.	max.	min.	raz.	max.	min.	raz.	max.	min.	mm.
1,6; 2; 2,5	+ 54	+14	40	− 90	−30	60	144	44	±0,3
3,2	+ 68	+20	48	− 90	−30	60	158	50	±0,3
4; 5	+ 68	+20	48	−110	−30	80	178	50	±0,3
6,3; 8; 10	+ 83	+25	58	−110	−30	80	193	55	±0,3
12,5; 16	+102	+32	70	−130	−40	90	232	72	±0,5
20; 25	+124	+40	84	−130	−40	90	254	80	±0,5
32; 40; 50	+150	+50	100	−150	−50	100	300	100	±0,8
64; 80	+180	+60	120	−150	−50	100	330	110	±0,8



Sl. 8. Tolerancije dimenzija četkica i njihova držača po IEC-preporukama za elektrografitne četkice

trake. Dalje, ima držača četkica kojima se dade podešavati pritisak. Na slici 2. držač je četkica s cilindričnim perom kojem se pritisak podešava okretanjem matice (1) na vijku (2), čime se mijenja prednapon pera (skraćuje se ili produžuje pero). Slika 3. predočuje držač četkica sa spiralnim perom kojem se pritisak mijenja zatezanjem ili otpuštanjem spiralnog pera postavljanjem ručice (1) u neki drugi utor, npr. (2). Držači četkica s podešavanjem pritiska imaju prednost u tome što se uvijek može dobiti točan pritisak, ali i priličnu manu jer pritisak može podešavati bilo tko i na bilo koju vrijednost, zbog čega zna nastupiti oštećenje kolektora. Zato se ipak povoljnije koristiti držačima četkica bez podešavanja pritiska, a ako tokom eksploatacije oslabi pritisak, treba zamijeniti pera. Pritisak četkica lako se mjeri pomoću perne vage, kako je prikazano na slici 10. Zatezanjem vage pokušava se pri tome četkica odvojiti od kolektora i u trenutku kad se to postigne, na pernoj se vagi otčita sila, a iz nje se uz pomoć površine četkice izračunava pritisak. Prije mjerenja sile treba provjeriti jesu li svi zglobovi poluga držača četkica normalno gibljivi, kako mjereni rezultat ne bi bio pogrešan za iznos trenja.

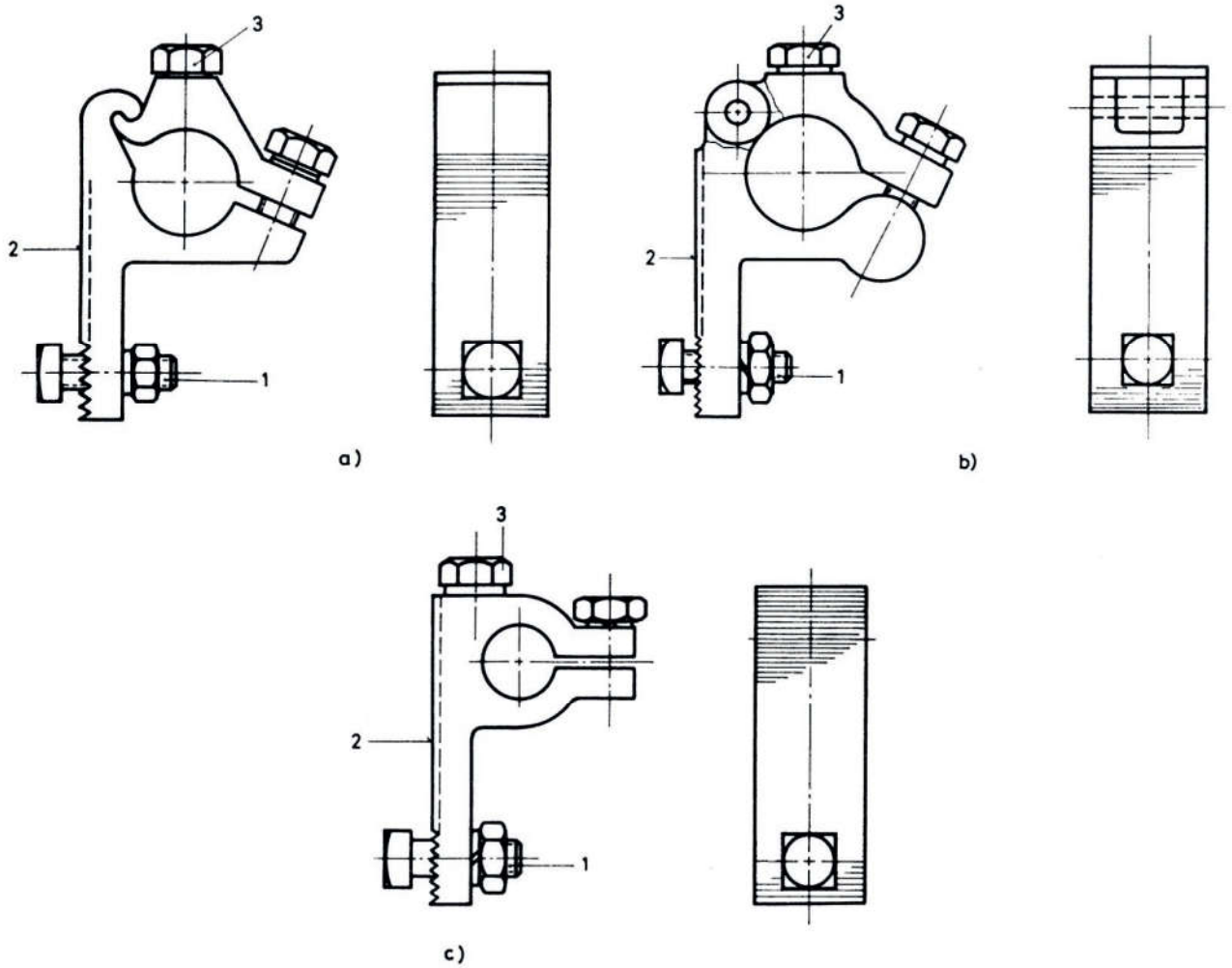
Na slici 7. nalazimo držač za četkicu bez uzica. On se sastoji od ormarića (1) za vođenje četkice (2), priključnog kraja (3), oslonca poluge (4), poluge (5) s perom (6), elastičnog pritiskivača (7), izoliranog ovjesišta pera (8), izolirane osovine (9) i pletenice (10) za provod struje s valjka (11). Valjak (11) za kontakt s četkicom je šupalj, kako bi pri istrošenju četkice kroz njega mogao kliziti pritiskivač (7). Iz opisa držača četkice i slike 7. vidi se, da je sistem za stvaranje pritiska izoliran od ormarića držača četkica, a da se struja od valjka do izvoda za priključak vodi pomoću pletenica relativno velikog presjeka, kako bi se smanjio provod struje između četkice i ormarića držača četkica.

Osim prikazanih izvedaba držača četkica ima još standardnih oblika koji su nastali raznim kombinacijama opisanih elemenata, ili iz posebnog razloga imaju neki dio konstrukcijski posebno prilagođen stanovitoj namjeni.

Posebne izvedbe držača četkica koji se upotrebljavaju za stroj strogo određene namjene, nećemo razmatrati.

5.3.2. Ugradnja držača četkica

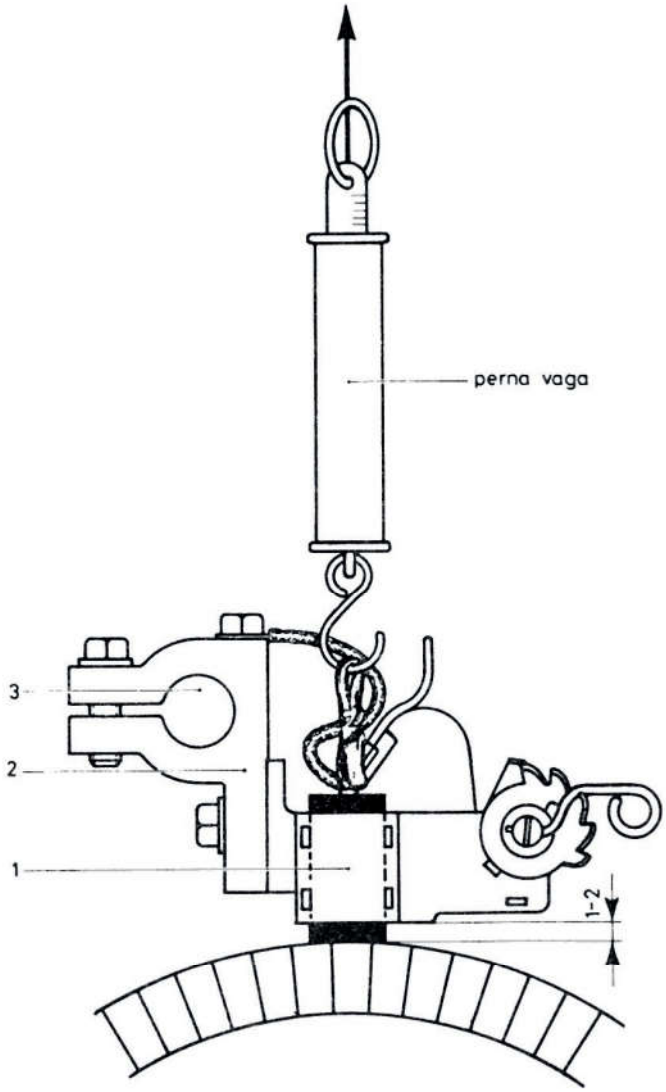
U ovom dijelu razmotrit ćemo problematiku ugradnje držača četkica u vezi s radom komutacijskog sklopa, a osnovni su principi ugradnje držača četkica s njihovim nosačem s obzirom na kućište statora, poznati iz slika montiranih kolektorskih strojeva u odjeljku 1. 2.



Sl. 9. Razne izvedbe hvataljki

Držači četkica standardne izvedbe mogu se postaviti u određeni položaj prema kućištu statora na razne načine. Opišimo dva koji su najčešći u kolektorskim strojevima.

U prvom načinu (vidi sl. 10) držač se četkica (1) pomoću hvataljke (2) učvrsti na svornjak (3), koji se dalje izolirano učvršćuje na prsten nosača držača četkica, a on, uz mogućnost zakretanja, na kućište statora. Na slici 9. razni su oblici hvataljki, i to na slici 9.a sa zubom, na slici 9.b sa šarnirom i na slici 9.c puna hvataljka. Na svim oblicima hvataljki vijkom (1) učvršćuje se hvataljka i držač četkica, zubima (2) definira se točan položaj hvataljke prema držaču četkica, a vijak (3) služi za spoj uzica četkice.

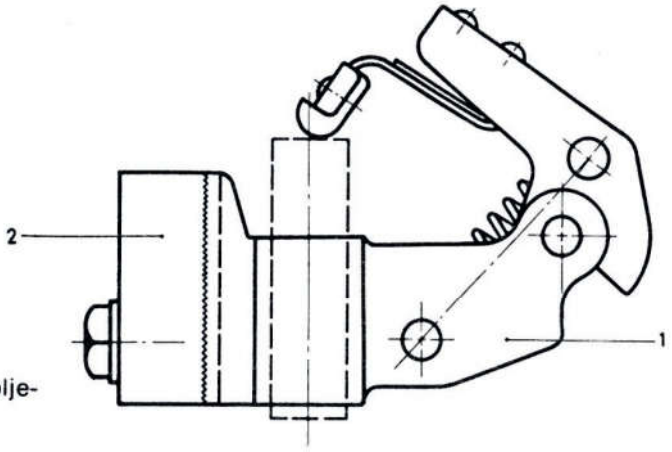


Sl. 10. Učvršćenje držača četkica pomoću hvataljke na svornjak; mjerenje pritiska četkice na kolektor

U drugom načinu, sa slike 11, držač se četkica (1) učvršćuje izravno na nazubljeni profil (2), koji se, dalje, izolirano pričvršćuje na prsten nosača držača četkica, a on, uz mogućnost zakretanja, na kućište statora.

Svaki držač četkica mora biti prema kolektoru u točno određenome prostornom položaju. Taj je položaj uvjetovan položajem simetrale otvora za prolazak četkice u ormariću, razmakom ormarića držača četkica i kolektora, paralelnošću otvora ormarića s aksijalnim bridom kolektorskih lamela i, još, jednolikom raspodjelom držača četkica raznog polariteta po obodu kolektora.

Za radijalne držače četkica mora biti simetrala otvora ormarića držača četkica okomita na kolektorsku kliznu plohu, a za kose držače četkica ona je nagnuta za kut α. Kosi držač četkica pri jednom smjeru vrtnje mora biti tako postavljen da kolektor smjerom vrtnje nastoji odbaciti četkicu s klizne plohe (vidi strelicu na sl. 6), a ne je podvući između držača četkice i kolektorske klizne plohe.



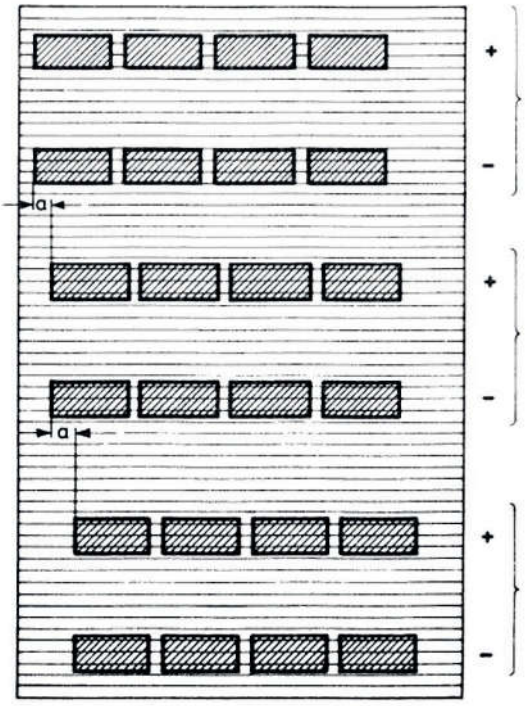
Sl. 11. Učvršćenje držača četkica na nazubljeni profil

Razmak između ormarića držača četkica i kolektorske klizne plohe mora biti od 1 do 2 mm (vidi sl. 10). Pri premalom razmaku između držača četkica i kolektora mogla bi se oštetiti kolektorska klizna staza, a uz prevelik razmak nastupiti vibriranje četkice u ormariću. Taj se razmak najjednostavnije postiže tako da se prije postavljanja držača četkica na stroj kolektorska klizna ploha omota nekoliko puta trakom savitljiva materijala debljine od 0,5 mm, a nakon toga se postave drčači četkica tako da nalegnu na namotanu traku. Kad se u ovom položaju učvrste držači četkica i ukloni namotana traka, svi će oni prema kliznoj stazi imati jednak i potreban razmak. S radom stroja troši se kolektor i povećava se razmak između držača četkica i kolektorske klizne plohe. Nakon izvjesnog trajanja pogona ili nakon obrade kolektorske klizne plohe treba joj držače četkica približiti. To se, uz nepromijenjeni prostorni položaj hvataljki ili profilâ, radi tako da se pomiče samo držač četkica po ozubljenome priključnom kraju. Ozubljeni priključni krajevi onemogućuju zakretanje držača četkica oko hvataljke ili profila zbog vibracija koje nastaju u pogonu.

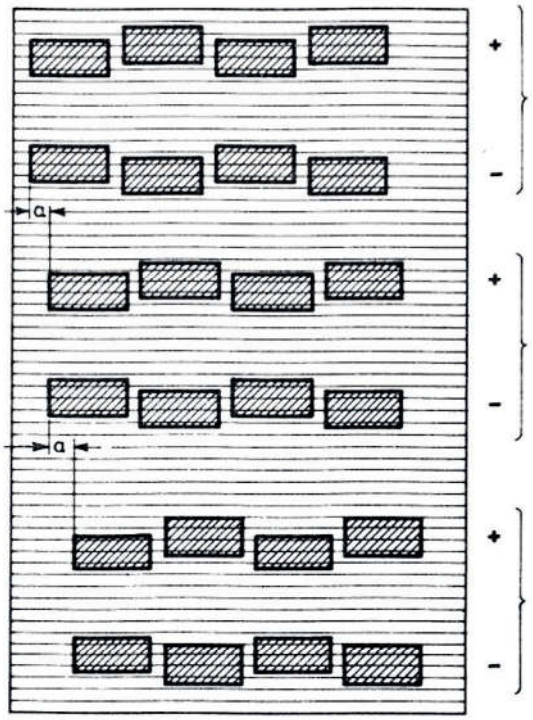
Otvori ormarića držača četkica (ili bridovi četkica) smješteni na jedan svornjak ili profil moraju biti paralelni s uzdužnim bridom kolektorskih lamela, kako bi sve četkice istodobno napuštale brid lamele. Ovisno o komutacijskim naprezanjima stroja, otklon linije bridova četkice od uzdužnog brida lamele smije iznositi od 3 do 5 mm po metru kolektorske klizne plohe.

Slogovi držača četkica raznih polariteta moraju biti jednoliko raspodijeljeni po kolektorskom obodu. Razmak između pozitivnih i negativnih slogova držača četkica mjeren po obodu kolektora smije odstupati za $\pm 0{,}7$ mm. Raspodjela držača četkica po kolektorskom obodu provjerava se tako da se po obodu kolektorske klizne plohe zalijepi papir i na njega ucrta položaj brida četkica. Na skinutom i razvučenom papiru otčitavaju se vrijednosti pojedinih razmaka i provjerava je li raspodjela jednolika.

Držače četkica treba na stroj postaviti tako da se kolektorska klizna ploha troši što jednoličnije. To se postiže na taj način da se pozitivni i negativni slog postave jedan za drugim, a idući se par slogova pomakne tako da se brazde četkica ne poklapaju. Na slici 12. načelno je prikazan pravilni raspored četkica po kolektorskom obodu za šesteropolni stroj.



Sl. 12. Pravilan raspored četkica po obodu kolektora (kolektor razvijen u ravninu)

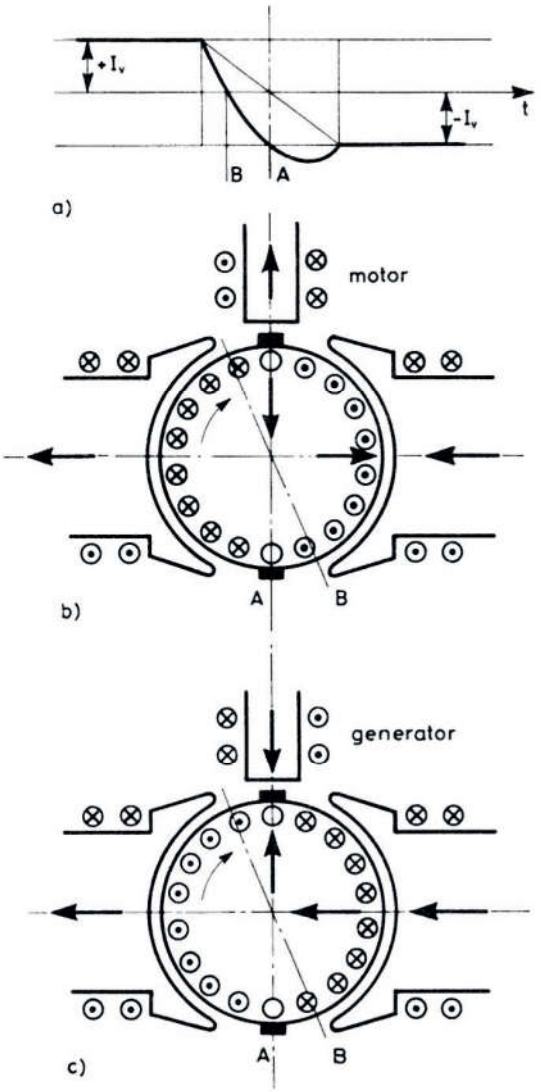


Sl. 13. Stupnjevanje četkica po obodu kolektora (kolektor razvijen u ravninu)

U primjeru kolektora s većom širinom lamela (pri istosmjernom stroju za velike struje i niski napon širina lamela može biti veća i od 20 mm) za normalno odvijanje komutacije bila bi potrebna širina četkice (lučna mjera) veća od 30 mm. Već smo protumačili da se četkice većih dimenzija ne upotrebljavaju za kolektorske strojeve iz mehaničkih (zbog velike tromosti četkica ne može slijediti ekscentričnost kolektora) i iz električkih razloga (veća klizna ploha četkice ima manje točaka stvarnog dodira četkice i kolektora). Za veće širine kolektorskih lamela služe *tandem*-držači četkica (vidi sl. 4), gdje su po širini, umjesto jedne, dvije četkice, svaka sa svojim sistemom za stvaranje pritiska. Umjesto tandem-držača četkica često se susreće stupnjevanje četkica, kako je to prikazano na slici 13. Tu potrebno prekrivanje postižemo upotrebom četkica normalne širine, ali držače četkica postavljamo tako da slog držača četkica svakog polariteta prekriva potrebni broj lamela. Stupnjevanje četkica upotrebljava se i u primjeru gdje kolektor ima normalnu širinu kolektorskih lamela, ali mu je potrebna veća širina komutacijske zone.

Istosmjernim strojevima s pomoćnim polovima valja držače četkica postaviti točno u neutralnu zonu. Bilo bi pogrešno iz toga zaključiti da pri tome uzdužna

komponenta protjecanja namota armature nema nikakva utjecaja na glavno polje. Motorima s velikim područjem podešavanja brzine vrtnje (koji pri visokim brzinama vrtnje imaju relativno slabo glavno magnetsko polje) često se pojavljuje nestabilnost u radu pri oslabljenom polju, koja se očituje na jednak način kao da uzdužna komponenta protjecanja armature smanjuje glavno magnetsko polje, tj. s povećanjem opterećenja raste brzina vrtnje. Ako se pri pojavi nestabilnosti ustanovi da držači četkica leže točno u neutralnoj zoni, onda je lako zaključiti da uzrok toj pojavi može biti samo u procesu komutacije i njegovu utjecaju na glavno magnetsko polje. Iz razmatranja komutacije u odjeljku 4.4. poznato je da za optimalnu komutaciju stroj mora imati blagu natkomutaciju. Dakle, on mora imati nešto pojačano protjecanje pomoćnih polova nego što bi to bilo za pravocrtnu komutaciju. Na slici 14.a vremenski je tok struje svitka u primjeru



Sl. 14. Utjecaj oblika komutacijskog procesa na stabilnost stroja

natkomutacije, slika 14.b sadrži protjecanje namota stroja s pomoćnim polovima za motorski rad, a slika 14.c ista protjecanja, samo za generatorski rad stroja. Na slici 14. vidi se da se četkice nalaze u neutralnoj zoni (položaj A), koja odgovara pravocrtnoj komutaciji. Kad stroj ima natkomutaciju, struja svitka u komutaciji

prolazi kroz nulu vremenski uvijek prije nego pri pravocrtnoj komutaciji, a to znači da se pojava odigrava kao da smo četkice pomaknuli iz neutralne zone (položaj A) suprotno smjeru vrtnje (položaj B). Tako prejaki pomoćni polovi u motorskom radu slabe, a u generatorskome jačaju glavno polje, pa u oba režima rada uzrokuju pojavu nestabilnosti.

Da bi se spriječila nestabilnost i održala optimalna (blago natkomutirana) komutacija, nezavisnim i porednim strojevima treba dodati serijsku uzbudu, koja pri motorskom radu pojačava glavno polje, a pri generatorskome ga smanjuje. Tako, istosmjerni motori s većim opsegom podešavanja brzine vrtnje, radi jačanja polja redovito imaju kompaundni namot, a kompenzirani generatori s podešavanjem napona poljem protukompaundni namot, dok nekompenziranim se generatorima ne stavlja serijski namot jer već reakcija armature dovoljno slabi glavno magnetsko polje.

Utjecaj polja pomoćnih polova na komutaciju i karakteristiku $n(I)$ lijepo se može promatrati ispitivanjem nezavisno uzbuđenog motora s oslabljenim glavnim poljem, kojemu na namot pomoćnih polova prigradimo šant. U radu bez šanta motor ima optimalnu komutaciju i nestabilnu karakteristiku. Pri radu sa šantom, uz smanjivanje njegova otpora, kroz namot pomoćnih polova prolazi manja struja (za istu struju armature), polje pomoćnih polova slabi, proces komutcije prelazi iz natkomutacije u pravocrtnu komutaciju i četkice počinju iskriti na odlaznom bridu. Istodobno se počinje smanjivati utjecaj polja pomoćnih polova na glavno magnetsko polje, ono počinje jačati, a brzina se vrtnje smanjuje (pri istoj struji armature).

5.4. Naprezanja kolektora

Radom stroja nastaju na kolektoru mehanička, termička, komutacijska i potencijalna naprezanja, koja za siguran rad kolektora u eksploataciji ne smiju premašivati stanovite vrijednosti.

Mehanička naprezanja određena su dimenzijama, brzinom vrtnje i termičkim stanjem kolektora, te njegovom konstrukcijskom i tehnološkom izvedbom. Mehanički i tehnološki proračuni povezani s konstrukcijom stroja ovdje neće biti razmatrani.

Komutacijska naprezanja kolektora povezana su s naponom samoindukcije i nekompenziranim naponom svitka u komutaciji za trajno i kratkotrajno opterećenje, a detaljno su razrađena pri tumačenju procesa komutacije, pa ih nećemo ponavljati.

5.4.1. Termičko naprezanje kolektora

Termičko naprezanje očituje se u zagrijavanju kolektora, koje nastaje zbog mehaničkih gubitaka P_{km} prema izrazu (5.2 – 1) i gubitaka prelaza struje $P_{elč}$ prema izrazu (5.2 – 2).

Zagrijanje kolektora u stacionarnom stanju, kad su nastali gubici jednaki odvodu topline, bit će:

$$\Theta_k = \frac{P_{km} + P_{elč}}{h_k D_k \pi l_k} \cdot 10^6 \ [°C], \tag{1}$$

pri čemu su P_{km} mehanički gubici [W], $P_{elč}$ gubici prelaza struje [W], a D_k je promjer klizne plohe kolektora [mm], l_k dužina klizne plohe kolektora [mm] i h_k koeficijent odvoda topline $[\frac{W}{m^2°C}]$, a on iznosi:

$$h_k = 50 \ (1 + \alpha_k \sqrt{v_k}) \left[\frac{W}{m^2°C}\right]. \tag{2}$$

U jednadžbi (2) v_k je obodna brzina kolektora [ms^{-1}], a α_k je koeficijent kojim se uzima u obzir efikasnost ventilacije. On iznosi od 0,4 do 0,7 za otvorene strojeve s vlastitom ventilacijom, od 0,8 do 1 pri prisilnoj ventilaciji cijelog stroja i od 1,2 do 1,3 pri prisilnoj ventilaciji kolektora.

Kad zagrijanje kolektora premašuje vrijednosti dopuštene propisima, a ono se ne može smanjiti drugim tehničkim mjerama (optimiranje gubitaka, povoljnije četkice, poboljšana ventilacija itd.), mora se povećati dužina kolektorske klizne plohe, više nego je potrebno za smještaj četkica. Dopuštene vrijednosti zagrijanja pojedinih dijelova kolektorskih strojeva opće namjene prema IEC-preporukama, uz temperaturu okoline do 40 °C i nadmorsku visinu do 1 000 m, prikazane su u tablici na slici 1. Pri tome se zagrijanje namota određuje mjerenjem porasta otpora, a zagrijanje kolektora termometrom.

Dio kolektorskog stroja	Dopušteno zagrijavanje [°C] za klasu izolacije				
	A	E	B	F	H
Namoti izmjenične i istosmjerne struje	60	75	80	100	125
Kolektor	60	70	80	90*	100*

*Može se upotrijebiti kad to dopušta odabrana kvaliteta četkica

Sl. 1. Dopuštena zagrijanja pojedinih dijelova kolektorskih strojeva

5.4.2. Potencijalna naprezanja na kolektoru

Potencijalno stanje na kolektoru (vrijednost i raspodjela napona po obodu) nastaje kao rezultat elektromagnetskog stanja stroja u zračnom rasporu, a kad je ono nepovoljno, na kolektoru nastaje kružna vatra. Kružna je vatra jaki električni luk po kolektorskoj kliznoj plohi ili njezinim oštrim bridovima, a nastaje zbog kratkog spoja stroja na kolektoru, pa se veoma često prenese s kolektorske klizne plohe i na uzemljene dijelove kolektorskog prostora. Nastankom kružne vatre dolazi do nagaranja i površinskog taljenja kolektorske klizne plohe, do termičkog deformiranja i taljenje dijelova držača četkica, nagaranja

bandaže kolektorske kape, te istrošenja i loma četkica. Ukratko se može reći da je stroju nakon kružne vatre većinom potreban popravak. Kolektorski se stroj ne može zaštititi od kružne vatre jer je proces njezina nastajanja veoma brz, ali se zato strojevima koji u eksploataciji mogu doći u nepovoljno potencijalno stanje kolektora, raznim mjerama, još u fazi konstrukcijske razrade, dade smanjiti sklonost prema kružnoj vatri.

5.4.2.1. Kružna vatra na kolektoru

Pod pojmom kružne vatre smatra se nastajanje pojedinačnih kratkih električnih lukova između kolektorskih susjednih lamela koji prelaze u jaki električni luk. Taj luk pokriva veći dio kolektora i kratko spaja držače četkica raznog polariteta. Pojava kružne vatre popraćena je jakim zvučnim i svjetlosnim efektom.

Električni je luk izbijanje naboja u sredini ioniziranih plinova s termičkim karakterom ionizacije. Nužni uvjeti pojave električnog luka su nastajanje katodne mrlje koja osigurava termičku ionizaciju i prisutnost vanjskog napona koji održava električni luk.

Na kolektoru katodna mrlja može nastati izgaranjem vodljivih mostića između susjednih lamela (npr. krhotine četkica) ili zbog jakog iskrenja pod odlaznim bridom četkica. Vanjski napon koji održava električni luk na kolektoru mora biti veći od pada napona na njemu, tj.:

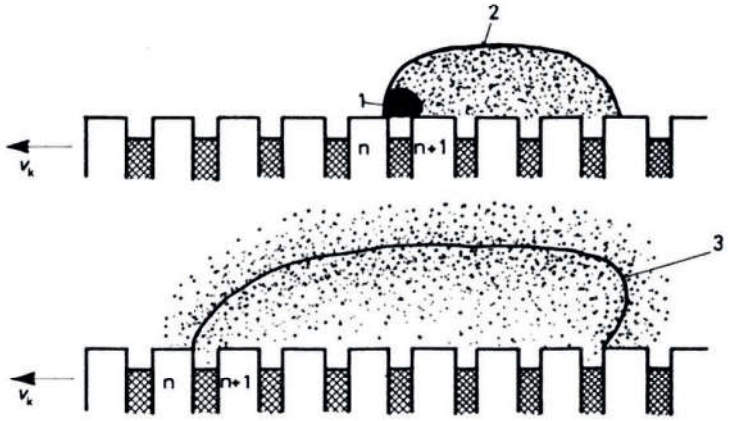
$$\int_0^{l_l} e_{kx} > U_l(l_l), \tag{3}$$

pri čemu je e_{kx} napon između susjednih kolektorskih lamela ovisan o raspodjeli indukcije u zračnom rasporu glavnih polova, U_l je pad napona na električnom luku, a l_l dužina električnog luka.

Iz lijeve strane izraza (3) vidi se da su napon između susjednih lamela i njegova raspodjela po obodu kolektora važni parametri koji određuju nastanak kružne vatre.

Iz provedenog izlaganja očito je da za pojavu kružne vatre mora biti istodobno ispunjeno više uvjeta, pa možemo zaključiti da je to slučajna pojava, a za određeni stroj (osim onih neiskorištenih ili niskog napona) moguće je reći je li više ili manje sklon kružnoj vatri.

Razmotrimo, dalje, pojavu kružne vatre za dva primjera nastajanja katodne mrlje, i to izgaranjem mostića između lamela i narušenjem komutacije.



Sl. 2. Shematski prikaz razvoja električnog luka između dvije susjedne lamele u kružnu vatru

a) Nastanak kružne vatre izgaranjem mostića između lamela

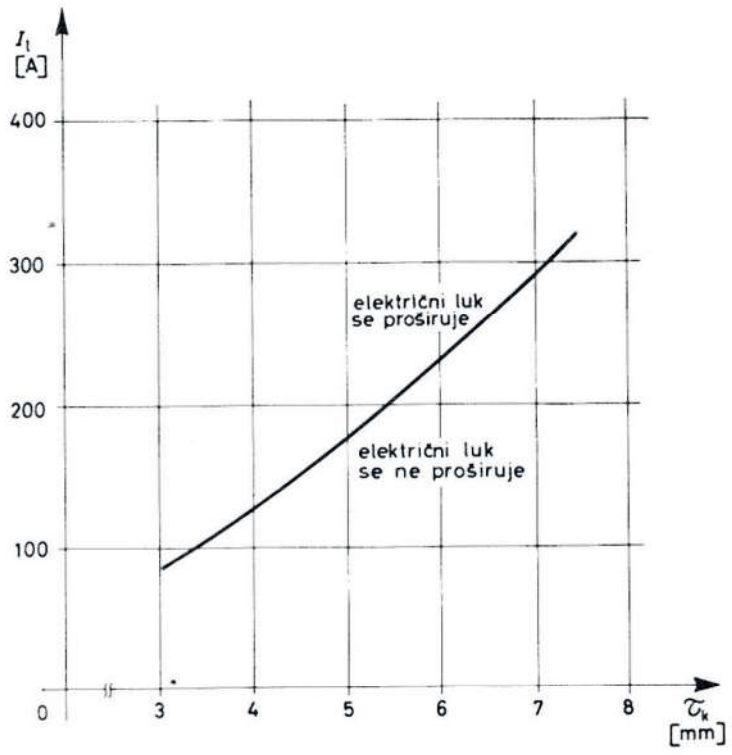
Na slici 2. shematski je prikaz razvoja električnog luka između dvije susjedne lamele u kružnu vatru. Izgaranjem mostića između lamela n i n + 1 nastaje na tome mjestu katodna mrlja (1) i električni luk između njih, pa termička ionizacija s plinom i parama bakra (2), koja se zbog gibanja kolektora širi suprotno smjeru gibanja. Ako su prisutni naponski uvjeti prema izrazu (1), električni će luk između susjednih lamela prerasti u veći električni luk (3), koji obuhvaća nekoliko lamela kolektora, i dalje u kružnu vatru. U vezi s nastankom i razvojem kružne vatre izgaranjem mostića, postavlja se još nekoliko pitanja: pri kojemu minimalnom naponu između dvije lamele počinje izgaranje mostića koje stvara katodnu mrlju i uspostavlja električki luk između te dvije lamele, kolika je struja i napon električnog luka između dvije lamele, kolika bi trebalo da bude struja tog električnog luka između dvije lamele i koliki bi napon morao vladati između iduće dvije lamele da se električni luk proširi.

Pri naponu između susjednih lamela [L 20] manjemu od 34 V možda će nastupiti izgaranje mostića od materijala četkica (suha i masna prašina niskog otpora), ali se neće pojaviti električni luk između tih lamela. Međutim, pri naponu većemu od 34 V počinju izgarati sitne krhotine četkica i uspostavlja se električni luk.

Pad napona električnog luka ili napon održavanja električnog luka između dvije lamele, bez obzira na vrijednost struje, iznosi od 25 do 27 V. Struja električnog luka između dvije lamele je:

$$I_l = \frac{e_{kx} - U_l}{Z} \text{ [A]}, \tag{4}$$

gdje je Z kompleksni otpor namota između dviju lamela.



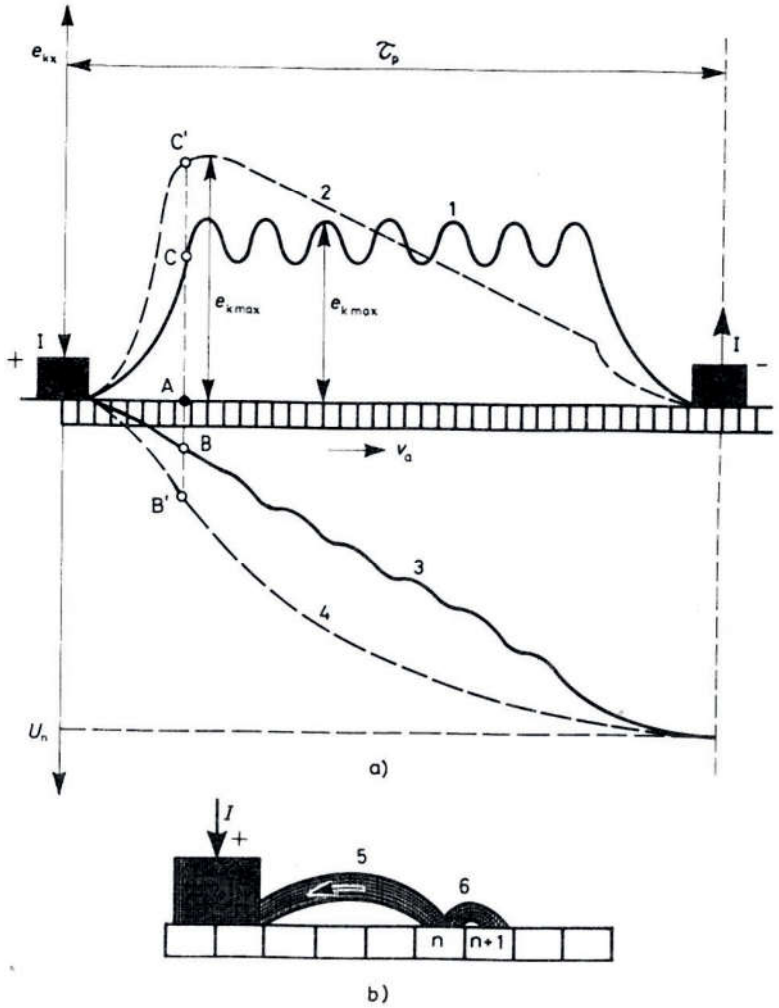
Sl. 3. Granične vrijednosti struje električnog luka između susjednih lamela ovisno o koraku kolektorske lamele

Uz jednake naponske uvjete između susjednih kolektorskih lamela 1 i 2 te 2 i 3, električni luk nastao između lamela 1 i 2 proširit će se na lamele 2 i 3 ako je struja električnog luka između lamela 1 i 2, ovisno o koraku kolektorskih lamela, viša od vrijednosti sa slike 3. To praktički znači da se strojevima snage veće od 200 kW s jednim zavojem između lamela kolektora, svaki električni luk nastao između dviju lamela širi na iduće dvije ako su povoljni naponski uvjeti za paljenje i održavanje luka. I, dalje, da za sasvim male strojeve s velikim brojem zavoja po lameli, gdje su struje električnog luka manje od 100 A, maksimalni napon između kolektorskih lamela može iznositi od 60 do 70 V.

Iz provedenog razmatranja može se zaključiti da za istosmjerne strojeve (osim sasvim malih) maksimalna vrijednost napona između dviju lamela uz najnepovoljnije radne uvjete ne smije premašivati vrijednost od 34 V.

b) Nastajanje kružne vatre pri narušenoj komutaciji

Narušenje komutacije ili intenzivno iskrenje pod odlaznim bridom četkica nastupa uglavnom u prelaznim stanjima stroja. Protumačimo najprije utjecaj polariteta četkica na gibanje električnog luka. Pri anodno polariziranoj četkici (smjer struje četkica – kolektor) katodna mrlja nastaje na kolektoru i snjim se giba, pa se električni luk razvlači po kolektoru, a pri katodno polariziranoj četkici katodna mrlja na četkici i električni luk miruju. Iz spomenutih razloga nastankom kružne vatre na stroju redovito stradaju anodno polarizirani držači četkica.



Sl. 4. Potencijalno stanje na kolektoru s položajem lamela i električnog luka za motorski rad stroja

Na slici 4.a prikazana je raspodjela potencijala po kolektorskom obodu za jedan polni korak u motorskom radu stroja, pri čemu krivulja 1 (2) predočuje napon između susjednih lamela kolektora kompenziranog (nekompenziranog) motora, a krivulja 3 (4) napon između anodno polarizirane četkice i odgovarajuće lamele kompenziranog (nekompenziranog) motora. Na slici 4.b je položaj električnog luka 5 i 6 u odnosu prema anodno polariziranoj četkici. Pri određivanju krivulja od 1 do 4 pretpostavljena je kontinuirana raspodjela armaturnog namota i zanemarena je promjena magnetskog otpora zračnog raspora zbog utora armature, a napon krivulja 1 i 3 ima pulsacije, nastale uslijed promjenjivoga magnetskog otpora zračnog raspora zbog utora kompenzacijskog namota i njegova protjecanja. Najveća se amplituda pulsacija pojavljuje pri oslabljenome magnetskom polju glavnog pola i povećanoj armaturnoj struji. Krivulja 2 ima jako izobličenje magnetskog polja glavnog pola u zračnom rasporu zbog protjecanja armaturnog namota, a najveće izobličenje nastaje pri oslabljenome magnetskom polju glavnih polova i povećanoj struji u armaturi.

Pojava kružne vatre pri narušenoj komutaciji, uz oznake na slici 4. tumači se na ovaj način. Zbog jakog iskrenja na kolektorskoj lameli koja se nalazi ispod anodno polarizirane četkice ili je napušta, nastaje katodna mrlja (koja se giba s kolektorom) i električni luk, koji se jednom stranom drži lamele n s katodnom mrljom, a drugom stranom anodno polarizirane četkice. Zbog gibanja kolektora lamela n s katodnom mrljom odmiče se od četkice i električni luk (5) će se ugasiti ili održati ako za to ima potencijalnih uvjeta. Kod nekoga n-tog položaja lamele s katodnom mrljom električni se luk (5) neće ugasiti kad je napon $\overline{AB}$ ili $\overline{AB'}$ između anodno polarizirane četkice i n-tog položaja lamele jednak ili je veći od napona potrebnoga za njegovo održavanje, prema izrazu (3). Kad u n-tom položaju lamele s katodnom mrljom napon $\overline{AC}$ ili $\overline{AC'}$ između lamela n i n + 1 premašuje napon paljenja električnog luka, proširit će se električni luk (6) s n-te na lamelu n + 1 i dalje redom na iduće lamele do nastajanja kružne vatre.

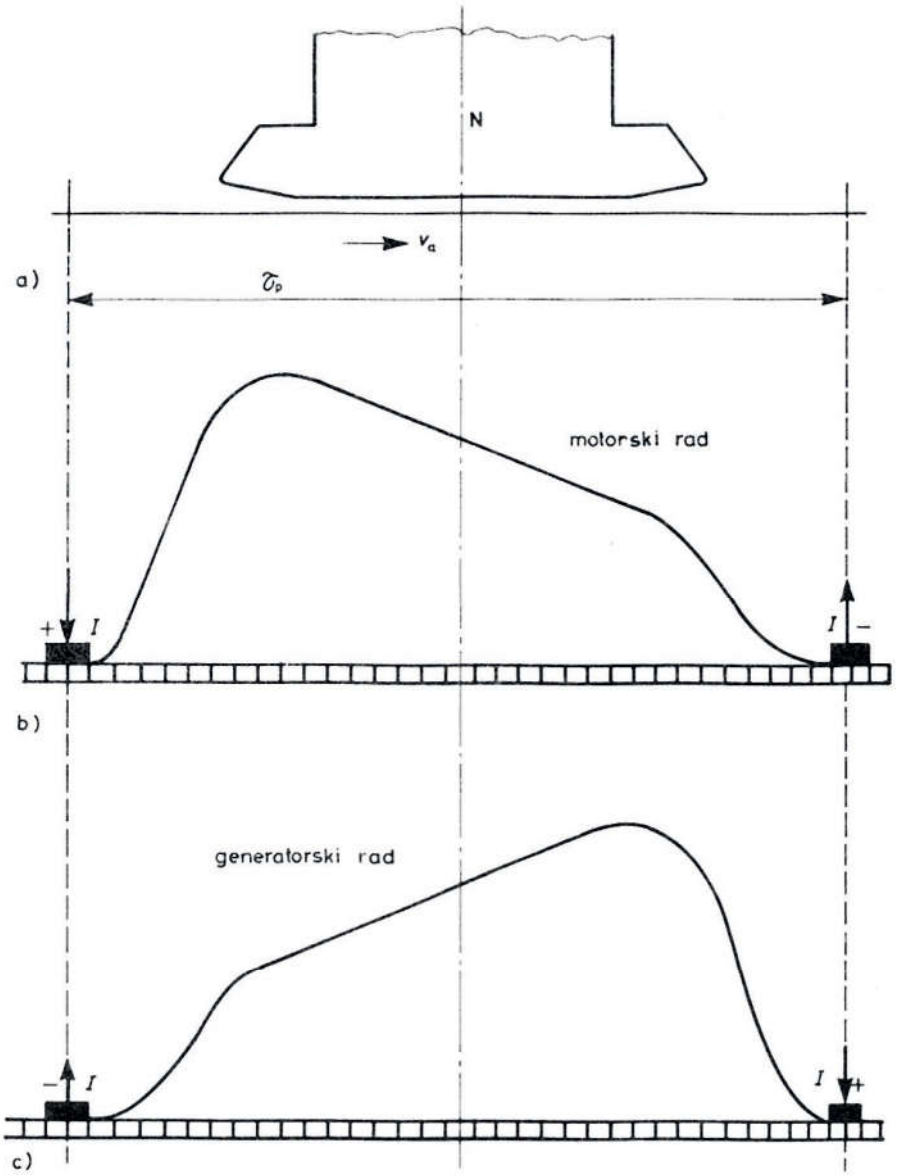
Potencijalni uvjeti za kružnu vatru zbog narušene komutacije za motorski i generatorski rad praktički su jednaki kod kompenziranih strojeva, a razlikuju se pri nekompenziranim strojevima. Na slici 5. nalazimo raspodjelu napona između kolektorskih lamela nekompenziranog stroja za jedan polni korak, pri čemu se slika 5.b odnosi na motorski, a slika 5.c na generatorski rad. Na slici 5. je anodno polarizirana četkica označena s +, a ona katodno polarizirana s −. Iz slike 5.b vidi se da se lamele s najvećom razlikom potencijala pri motorskom radu nalaze blizu odlaznog brida četkica, a iz slike 5.c izlazi da su lamele s najvećom razlikom potencijala pri generatorskom radu udaljene od odlaznog brida četkica. Iz toga se zaključuje da je za nekompenzirani stroj u generatorskom radu mnogo manja vjerojatnost nastajanja kružne vatre zbog narušene komutacije nego kad je on u motorskom radu.

Nakon tumačenja nastanka kružne vatre postavlja se pitanje mjerila sklonosti stroja toj pojavi. Na osnovi iznesenoga može se reći da je neki stroj to skloniji kružnoj vatri što mu napon potreban za održavanje električnog luka nastaje bliže anodno polariziranoj četkici, dok se električni luk (5) na sl. 4. još nije ugasio, i kad napon između kolektorskih lamela premašuje napon paljenja električnog luka – za proširenje električnog luka (5) novim električnim lukom (6) na slici 4. Uz uobičajenu geometriju izvođenja stroja (prekrivanje glavnog pola, oblik polne papuče glavnog pola, širina zone komutacije) može se reći da će napon potreban za održavanje električnog luka nastati to bliže anodno polariziranoj četkici što je viši maksimalni napon između lamela i manji korak kolektorske lamele. Tako se kao mjerilo sklonosti stroja kružnoj vatri osim maksimalnog napona između kolektorskih lamela uzima i vrijednost maksimalne promjene napona po obodu kolektora, tj.:

$$\varepsilon_{max} = \frac{e_{kmax}}{\tau_k} \left[\frac{V}{mm}\right], \tag{5}$$

gdje je e_{kmax} maksimalni napon između susjednih kolektorskih lamela u najnepovoljnijem radnom stanju.

Dopuštene vrijednosti maksimalne promjene napona po obodu kolektora ε_{max} iznose od 8 do 9 $\frac{V}{mm}$, s tim što pri generatorskom radu mogu biti povišene od 5 do 10%.



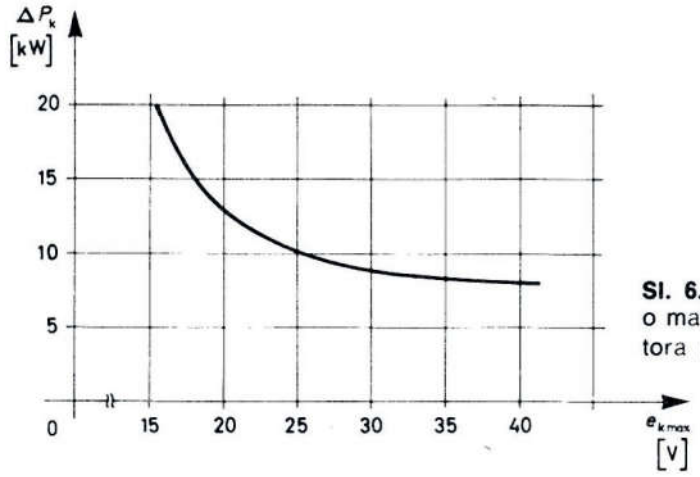
Sl. 5. Raspodjela napona između kolektorskih lamela nekompenziranog stroja za motorski i generatorski rad

Praksa je pokazala da kružna vatra nastupa i kod kompenziranih strojeva s niskim vrijednostima promjene napona po kolektorskom obodu, a to znači da vrijednost maksimalnog napona i vrijednost ε_{max} prema izrazu (5) nisu dovoljan kriterij za ocjenu mogućnosti nastanka kružne vatre narušenom komutacijom. To se tumači na taj način što izraz za vrijednost ε_{max} prema izrazu (5) ne sadrži parametre jačine (snage) električnog

luka, napon paljenja električnog luka i udaljenost područja s povišenim naponom do anodno polarizirane četkice. Zato se istraživanjima koja se provode u posljednje vrijeme nastoji povezati sklonost određene izvedbe stroja kružnoj vatri sa snagom električnog luka (snaga nedovršene komutacije) i s naponom paljenja električnog luka (maksimalni napon između kolektorskih lamela). Snaga nedovršene komutacije, prema teoriji energetske komutacije (vidi odjeljak 4.6), iznosi:

$$\Delta P_k = \Delta e_{kom} I_v \beta \cdot 10^{-3} \text{ [kW]}. \tag{6}$$

pri čemu je Δe_{kom} ukupni nekompenzirani napon svitka u komutaciji, I_v struja grane (vodiča) armaturnog namota i β prekrivanje četkica.



Sl. 6. Ovisnost snage nedovršene komutacije o maksimalnom naponu između lamela kolektora pri kompenziranome vučnom motoru

Na slici 6. prikazan je odnos snage nedovršene komutacije i maksimalnog napona između kolektorskih lamela, koji se ne smije premašiti zbog nastanka kružne vatre [L 20] u primjeru kompenziranoga vučnog motora.

5.4.2.2. Kriteriji potencijalne stabilnosti kolektora

Pod pojmom *potencijalna stabilnost kolektora* smatra se takvo potencijalno stanje na kolektoru pri kojem ne nastupa kružna vatra. Prethodnim razmatranjem kružne vatre na kolektoru utvrđeno je da se ona neće pojaviti, bez obzira na druge utjecaje, ako zato nema naponskih uvjeta. Kriteriji koji prikazuju potencijalno stanje na kolektoru i služe za ocjenu njegove potencijalne stabilnosti jesu srednji napon po lameli e_k, maksimalni napon između susjednih lamela e_{kmax} i maksimalna promjena napona po kolektorskom obodu ε_{max}.

Srednji napon po lameli kolektora je:

$$e_k = 2p \frac{U}{k} \text{ [V]}, \tag{7}$$

a uobičajene vrijednosti za nekompenzirani stroj su $e_k \leq 16$ V i za kompenzirani stroj $e_k \leq 20$ V. Motorima napajanima valovitom strujom dopuštene vrijednosti e_k su niže do 10 %, ovisno o spoju pretvarača. Srednji napon po kolektorskoj lameli samo je osnovna računska veličina kojom se koristimo u proračunu ili iz koje se preračunavaju druge veličine, a nema fizikalnog značenja u procesu kružne vatre.

Maksimalni napon između susjednih kolektorskih lamela e_{kmax} za najnepovoljnije uvjete (oslabljeno magnetsko polje glavnih polova i povećana struja armature), tj. kad je

najveće izobličenje raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu glavnih polova, ne smije premašivati vrijednost od cca 34 V (zbog mogućnosti izgaranja mostića). Strojevima s čestim prelaznim pojavama i većim strujnim preopterećenjem, gdje se posljedično narušava komutacija, mora se vrijednost maksimalnog napona između susjednih lamela smanjiti ovisno o snazi nedovršene komutacije u prelaznom stanju, kao npr. za vučni kompenzirani motor prema slici 6.

Maksimalna vrijednost promjene napona po kolektorskom obodu određuje se prema izrazu (5) i nema jednaki utjecaj na nastanak kružne vatre pri motorskom i generatorskom radu stroja, kako je već protumačeno.

Budući da je napon održavanja električnog luka od 25 do 27 V, može se reći da uz maksimalni napon između kolektorskih lamela manji od 25 do 27 V uopće neće biti električnog luka ni kružne vatre (uz usaglašenu snagu nedovršene komutacije). Za vrijednosti maksimalnog napona između kolektorskih lamela od 27 do 34 V električni luk između dviju susjednih lamela nastao izgaranjem mostića neće se proširiti, a pri vrijednostima maksimalnog napona između kolektorskih lamela većima od 34 V ima vjerojatnosti da će doći do kružne vatre ako svi parametri, potrebni za njezin nastanak, budu slučajno djelovali istodobno. Zato za strojeve s maksimalnim naponom između lamela manjim od 25 do 27 V govorimo da imaju potencijalno stabilan kolektor, a za one s maksimalnim naponom većim od te vrijednosti da imaju sklonost kružnoj vatri.

I na kraju valja napomenuti da se za neke strojeve određene namjene koriste povećane vrijednosti maksimalnog napona između kolektorskih lamela. To su sasvim mali strojevi, pri kojima zbog relativno velikoga prividnog otpora između lamela teže nastaje kružna vatra, ili su vučni motori, gdje se zahtijeva određena snaga uz što manju masu i volumen, koji onda u eksploataciji imaju stanovitu sklonost kružnoj vatri.

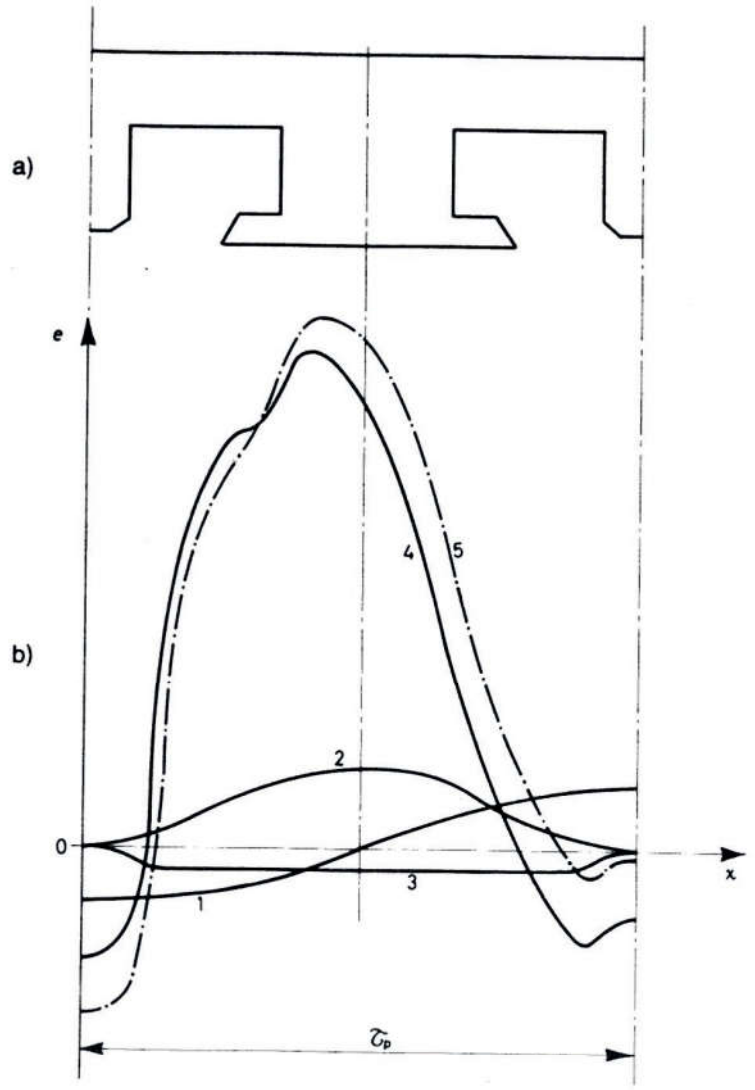
5.4.2.3. Potencijalno stanje na kolektoru

Potencijalno stanje na kolektoru određeno je raspodjelom potencijala po njegovu obodu, a predočuje se krivuljom raspodjele napona između kolektorskih lamela, krivuljom raspodjele napona između stezaljki suprotnog polariteta i krivuljom raspodjele promjene napona po kolektorskom obodu, uzevši u obzir sve inducirane napone koji nastaju u armaturnim svicima po kolektorskom obodu.

Osnovni parametar za određivanje potencijalnog stanja na kolektoru je raspodjela napona između kolektorskih lamela a njegovim poznavanjem mogu se dalje analitički odrediti raspodjela napona između stezaljki suprotnog polariteta (integriranjem napona između lamela kolektora po kolektorskom obodu) i raspodjela promjene napona po obodu kolektora (dijeljenjem napona između kolektorskih lamela s τ_k).

Potencijalno stanje na kolektoru razlikuje se za statičko i prelazno stanje stroja. U općem slučaju, pri prelaznom stanju stroja u svicima se namota armature inducira napon transformacije (zbog vremenske promjene mangetskog toka *glavnih polova*), napon samoindukcije (zbog promjene magnetskog toka reakcije armature i rasipanja namota armature), napon transformacije (zbog vremenske promjene magnetskog toka u zračnom rasporu *pomoćnih polova*) i napon rotacije u magnetskom polju glavnih polova. Na slici 7. a prikazan je položaj glavnog i pomoćnog pola. Na slici 7.b nalazimo raspodjelu napona između kolektorskih lamela u primjeru serijskoga nekompenziranog motora pri promjeni struje od 0 do I_n uz konstantnu brzinu vrtnje i puno magnetsko polje glavnih polova (bez šantiranja). Pri tome se krivulja 1 odnosi na napon transformacije nastao promjenom

magnetskog toka glavnih polova, krivulja 2 na napon samoindukcije, krivulja 3 na napon transformacije uspostavljen zbog promjene magnetskog toka u zračnom rasporu pomoćnih polova, krivulja 4 na napon rotacije u magnetskom toku glavnih polova i kruvulja 5 na ukupni napon između kolektorskih lamela. Iz slike 7.b vidi se da su raspodjela i mjesto



Sl. 7. Raspodjela napona između lamela kolektora pri prelaznom stanju serijskog motora

maksimalne vrijednosti napona između kolektorskih lamela u osnovi određeni naponom rotacije, tj. raspodjelom indukcije u zračnom rasporu glavnih polova, i da je uz puno magnetsko polje glavnih polova relativno malen utjecaj ostalih induciranih napona. U prelaznim stanjima, uz oslabljeno magnetsko polje glavnih polova, mjesto maksimalne vrijednosti (u odnosu prema simetrali glavnog pola) napona između kolektorskih lamela ostaje praktički nepromijenjeno (s obzirom na puno magnetsko polje glavnih polova), ali se povećava razlika između napona rotacije i ukupnog napona između kolektorskih lamela. Nakon upoznavanja s općom slikom, u daljnjim razmatranjima određivanja potencijalnog stanja na kolektoru ograničit ćemo se na statičko stanje stroja.

U statičkom stanju stroja napon je između kolektorskih lamela jednak naponu rotacije, a pri jednovojnim namotima armature on iznosi:

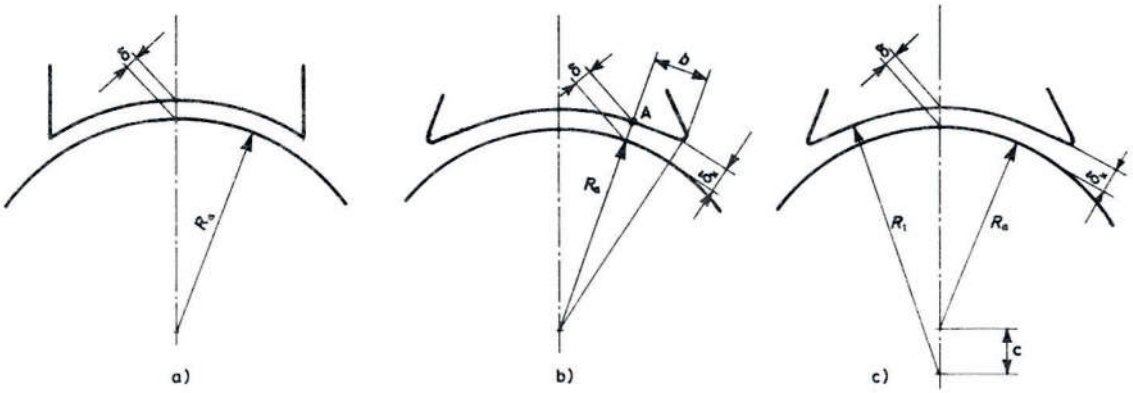
$$e_{kx} = 2B_{\delta x} l_i v_a w_s \frac{p}{a} 10^{-3} \text{ [V]}, \tag{8}$$

pri čemu je $B_{\delta x}$ indukcija u zračnom rasporu glavnog pola na mjestu x [T], a l_i je idealna dužina armaturnog paketa [mm].

Vrijednosti napona između kolektorskih lamela viševojnih namota armature treba posebno istražiti od slučaja do slučaja jer napon između susjednih lamela nije jednak naponu zavoja (npr. za dvovojne petljaste namote vidi odjeljak 9.4).

Iz izraza (8) uočava se da je za određivanje raspodjele napona između lamela po kolektorskom obodu potrebno poznavati raspodjelu indukcije u zračnom rasporu po obodu armature, što znači i poznavanje ukupnoga magnetskog napona i magnetskog otpora u zračnom rasporu i zubima armature. Iz provedenog razmatranja može se zaključiti da će potencijalno stanje na kolektoru ovisiti o izvedbi stroja (nekompenzirani, kompenzirani), te veličini i izvedbi zračnog raspora glavnog pola (jednoliki, nejednoliki). Prije određivanja raspodjele napona između lamela po kolektorskom obodu treba se upoznati s izvedbama zračnih raspora glavnih polova (ili oblicima polnih papuča), s električkim prekrivanjem glavnih polova, određivanjem veličine zračnog raspora na bilo kojem mjestu pod glavnim polom i ekvivalentnim zračnim rasporom glavnih polova.

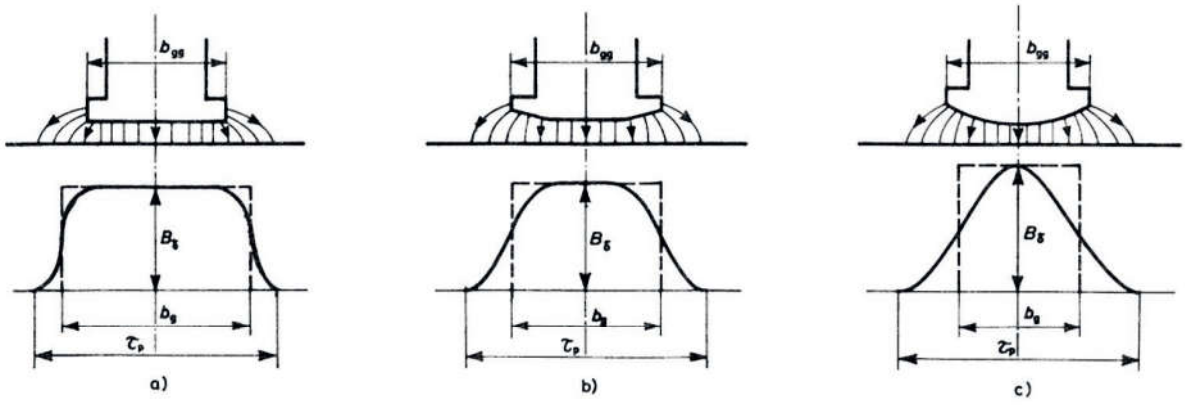
Istosmjerni se strojevi grade s jednolikim ili nejednolikim zračnim rasporom glavnih polova. Osnovni razlog upotrebe nejednolikoga zračnog raspora je smanjenje utjecaja protjecanja armaturnog namota na izobličenje raspodjele indukcije u zračnom rasporu glavnih polova. Na slici 8.a izvedba je jednolikoga zračnog raspora, a na slikama 8. b i c



Sl. 8. Izvedbe zračnog raspora glavnog pola

najčešće su upotrebljavane izvedbe nejednolikoga zračnog raspora, pri čemu se onaj na slici 8.b naziva djelomično proširenim, a onaj na slici 8.c ekscentričnim. Tako se za nekompenzirane strojeve uvijek upotrebljava djelomično prošireni ili ekscentrični zračni raspor, za manje iskorištene kompenzirane strojeve jednoliki zračni raspor, a za više iskorištene kompenzirane strojeve djelomično proširen zračni raspor. Osnovna karakteristika djelomično proširenoga zračnog raspora glavnog pola je u tome što se srednji dio polne papuče glavnog pola izvodi koncentrično s armaturom, a zatim se krajevi polne papuče na dužini b proširuju u smjeru tangente iz točke A na vrijednost zračnog raspora δ_k (vidi sl. 8.b). Za ekscentrični zračni raspor glavnih polova izvodi se oblik polne papuče glavnog pola s polumjerom R_1, koji je veći od zbroja polumjera armature R_a i zračnog raspora δ pod

sredinom glavnog pola. Pri tome se centar zaobljenja s polumjerom R_1 nalazi na simetrali glavnog pola i pomaknut je za dužinu c prema središtu armature. Nejednoliki zračni raspor glavnog pola izvodi se redovito tako da je zračni raspor δ_k na kraju polne papuče od dva do četiri puta veći nego zračni raspor δ pod sredinom glavnog pola.



Sl. 9. Raspodjela indukcije u zračnom rasporu glavnih polova za razne izvedbe zračnog raspora

Na slici 9 nalazimo raspodjelu indukcije u zračnom rasporu glavnog pola za razne njegove izvedbe, pri čemu se slika 9.a odnosi na jednoliki zračni raspor, slika 9.b na djelomično prošireni zračni raspor i slika 9.c na ekscentrični zračni raspor. Iz slike 9. očito je da je širina polne papuče glavnog pola (mjerena po luku) b_g u električkom smislu različita od njezine geometrijske širine b_{gg}. Tako će za razne izvedbe zračnog raspora uz jednaku geometrijsku širinu polne papuče biti različito i prekrivanje glavnog pola u električkom smislu, koje iznosi:

$$\alpha = \frac{b_g}{\tau_p} = \frac{1}{B_\delta \tau_p} \int_0^{\tau_p} B_{\delta x} dx \ [1], \tag{9}$$

gdje je B_δ indukcija pod sredinom glavnog pola.

Za tehničke proračune, uz zadovoljavajuću točnost, dopušteno je pretpostaviti da širina polne papuče u električkom smislu iznosi:

za *jednoliki zračni raspor* $b_g = b_{gg} + 2\delta$;

za *djelomično proširen zračni raspor* $b_g = b_{gg}$ (uz $\frac{\delta_k}{\delta} \doteq 2$ i $b = \frac{b_{gg}}{6}$). (10)

Pri izvedbi *djelomično proširenoga zračnog* raspora, njegova vrijednost na mjestu za x udaljenome od točke A prema slici 8.b, uz određena pojednostavljenja, iznosi:

$$\delta_x = \delta[1 + (\frac{\delta_k}{\delta} - 1)(\frac{x}{b})^2]. \tag{11}$$

Za *ekscentričnu izvedbu* zračnog raspora, njegova vrijednost na mjestu za x udaljenome od simetrale glavnog pola, uz određena pojednostavljenja, bit će:

$$\delta_x = \delta[1 + (\frac{\delta_k}{\delta} - 1)(\frac{2x}{b_{gg}})^2]. \tag{12}$$

Pri upotrebi nejednolikih zračnih raspora glavnog pola, za određivanje njihova magnetskog napona potrebno je poznavati takozvani *ekvivalentni zračni raspor*. Pod

ekvivalentnim zračnim rasporom smatra se onaj jednoliki zračni raspor kojim se uz njegov nepromijenjeni magnetski napon ostvaruje jednak magnetski tok kao pri nejednolikome zračnom rasporu. Uz pretpostavku glatke (bez ozubljenja) armature i papuče glavnog pola, te jednakost magnetskog toka izvan polne papuče glavnog pola pri jednolikom i nejednolikom zračnom rasporu, ekvivalentni zračni raspor iznosi:

$$\delta_{ek} = k_{cek}\delta = \frac{b_{gg}}{2\int_0^{0,5 b_{gg}} \frac{dx}{\delta_x}} \tag{13}$$

Uvrstimo li izraz (11), odnosno (12) u relaciju (13) i nakon provedene integracije, dobivamo vrijednost ekvivalentnoga zračnog raspora za djelomično proširen zračni raspor:

$$\delta_{ek} = \delta \frac{1}{1 - \frac{2b}{b_{gg}\sqrt{\frac{\delta_k}{\delta} - 1}}\left(\sqrt{\frac{\delta_k}{\delta} - 1} - \operatorname{arc\,tg}\sqrt{\frac{\delta_k}{\delta} - 1}\right)}, \tag{14}$$

a za ekscentrični zračni raspor:

$$\delta_{ek} = \delta \frac{\sqrt{\frac{\delta_k}{\delta} - 1}}{\operatorname{arc\,tg}\sqrt{\frac{\delta_k}{\delta} - 1}}, \tag{15}$$

U izračunavanju magnetskog napona zračnog raspora potrebno je još uzeti u obzir utjecaj ozubljenja armature i polne papuče povećanjem ekvivalentnoga zračnog raspora glavnog pola za Carterov koeficijent.

Raspodjela indukcije u zračnom rasporu bitno se razlikuje za primjer nekompenziranog i kompenziranog stroja. Razmotrimo prvo nekompenzirani, a zatim kompenzirani stroj.

U primjeru *nekompenziranog stroja*, indukcija u zračnom rasporu na bilo kojem mjestu za x udaljenome od simetrale glavnog pola određena je izrazom:

$$B_{\delta x} = \mu_0 H_x = \mu_0 \frac{V_\delta + V_z - h_{u2}H_{zx} \pm xA}{(k_c\delta)_x}. \tag{16}$$

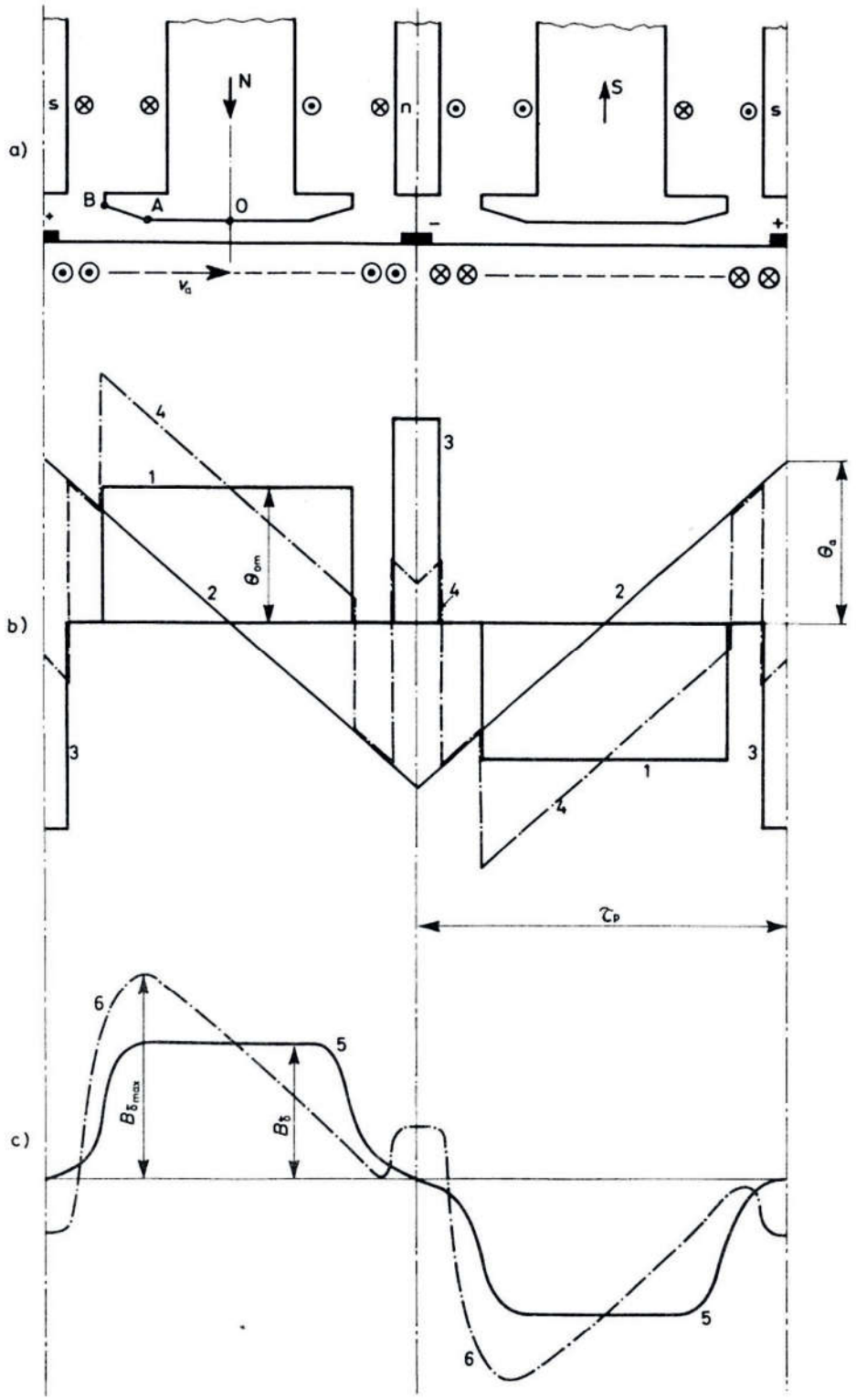
U jednadžbi (16) H_x je jakost magnetskog polja u zračnom rasporu na udaljenosti x od simetrale glavnog pola, a μ_0 je permeabilitet zraka (vakuuma). $V_\delta + V_z$ je magnetski napon zračnog raspora i zubi armature, H_{zx} jakost magnetskog polja u zubu na udaljenosti x od simetrale glavnog pola, xA protjecanje armaturnog namota na udaljenosti x od simetrale glavnog pola, $(k_c\delta)_x$ je zračni raspor s utjecajem ozubljenja armature na udaljenosti x od simetrale glavnog pola, a h_{u2} visina zuba (dubina utora s klinom) armature.

Budući da maksimalno izobličenje indukcije u zračnom rasporu glavnih polova nastaje pri oslabljenome magnetskom polju glavnih polova (nezasićeno stanje), mogu se u brojniku izraza (16) zanemariti pribrojnici V_z i $h_{u2}H_{zx}$, a magnetski napon zračnog raspora V_δ izjednačiti s protjecanjem uzbude Θ_{om}, pa izraz (16) prelazi u oblik:

$$B_{\delta x} = \mu_0 \frac{\Theta_{om} \pm xA}{(k_c\delta)_x}, \tag{17}$$

pri čemu je $(k_c\delta)_x = k_{cx}\delta_x$.

Na slici 10.a prikazan je smještaj namota sa smjerovima struja i polaritetom za motorski rad nekompenziranog stroja, a na slici 10.b raspodjela je protjecanja, pri čemu se krivulja 1 odnosi na protjecanje namota uzbude (uz zanemarenje rubnog efekta), krivulja 2 na



Sl. 10. Raspodjela protjecanja i indukcije u zračnom rasporu nekompenziranog stroja u motorskom radu

protjecanje namota armature, krivulja 3 na protjecanje namota pomoćnih polova i krivulja 4 na rezultantno protjecanje. Slika 10.c sadrži raspodjelu indukcije u praznom hodu stroja (krivulja 5) i pod teretom (krivulja 6).

Maksimalna vrijednost indukcije u zračnom rasporu nekompenziranog stroja nastaje na nekoj udaljenosti od simetrale glavnog pola. Pri djelomično proširenome zračnom rasporu, kao na slici 10, maksimalna se indukcija uspostavlja na dijelu proširenoga zračnog raspora (između točaka A i B na sl. 10.a), a pri ekscentričnome zračnom rasporu može nastati na bilo kojem mjestu između simetrale glavnog pola i ruba polne papuče glavnog pola. U oba primjera izvedbe zračnog raspora mjesto nastanka maksimalne indukcije određeno je omjerom $\frac{\delta_k}{\delta}$, te omjerom protjecanja namota uzbude i namota armature na rubu papuče glavnog pola.

Udaljenost mjesta maksimalne indukcije od simetrale glavnog pola određujemo tako da izraz (17) deriviramo po x, uzmemo $\frac{dB_{\delta x}}{dx} = 0$ i dobiveni izraz riješimo po x. Uvrstimo li izraz (11) za δ_x u jednadžbu (17) navedenim postupkom za djelomično prošireni zračni raspor, rezultat je udaljenost x_m od simetrale glavnog pola:

$$x_m = \frac{b_{gg}}{2}\left[\sqrt{(k_\Theta - \frac{2b}{b_{gg}} + 1)^2 + \frac{4b^2}{b_{gg}^2(\frac{\delta_k}{\delta} - 1)}} - k_\Theta\right] \tag{18}$$

U relaciji (18) k_Θ je omjer protjecanja namota uzbude i namota armature na rubu papuče glavnog pola, a iznosi:

$$k_\Theta = \frac{\Theta_{om}}{\frac{0{,}1\,\alpha_g \tau_p A}{2}} = \frac{20\,\Theta_{om}}{\alpha_g \tau_p A}, \tag{19}$$

gdje je:
α_g prekrivanje glavnog pola u geometrijskom smislu, a Θ_{om} protjecanje namota uzbude po polu.
Uvrštenjem izraza (18) u (11) dobivamo vrijednost zračnog raspora na mjestu maksimalne indukcije:

$$\delta_m = \delta\left\{1 + (\frac{\delta_k}{\delta} - 1)(\frac{b_{gg}}{2b})^2\left[\sqrt{(k_\Theta - \frac{2b}{b_{gg}} + 1)^2 + \frac{4b^2}{b_{gg}^2(\frac{\delta_k}{\delta} - 1)}} - k_\Theta\right]^2\right\}. \tag{20}$$

Ako uvrstimo izraz (12) za δ_x u jednadžbu (17), za ekscentrični zračni raspor izlazi udaljenost x_m od simetrale glavnog pola:

$$x_m = \frac{b_g}{2} k_\Theta\left[\sqrt{1 + \frac{1}{k_\Theta^2(\frac{\delta_k}{\delta} - 1)}} - 1\right] \text{[mm]}, \tag{21}$$

a unese li se izraz (21) u relaciju (12), rezultat će biti vrijednost zračnog raspora na mjestu maksimalne indukcije:

$$\delta_m = \delta\left\{1 + \left[k_\Theta\left(\sqrt{1 + \frac{1}{k_\Theta^2(\frac{\delta_k}{\delta} - 1)}} - 1\right)\right]^2 (\frac{\delta_k}{\delta} - 1)\right\}. \tag{22}$$

Uvrštenjem vrijednosti δ_m prema izrazu (20) ili (22) u relaciju (17) ovisno o izvedbi zračnog raspora, dobivamo vrijednost maksimalne indukcije:

$$B_{\delta max} = \mu_o \frac{\Theta_{om} + x_m A}{k_{cm} \delta_m}. \tag{23}$$

Za indukciju u praznom hodu uz zračni raspor δ pod sredinom glavnog pola, oslonivši se na izraz (17), možemo pisati:

$$B_\delta = \mu_o \frac{\Theta_{om}}{k_c \delta}.$$

Omjer maksimalne indukcije opterećenog stroja i indukcije u praznom hodu stroja pod sredinom polne papuče nazivamo *koeficijent izobličenja indukcije*, a on iznosi:

$$k_{iz} = \frac{B_{\delta max}}{B_\delta} = \frac{k_c}{k_{cm}} \frac{\delta}{\delta_m} \left(1 + \frac{x_m A}{\Theta_{om}}\right). \tag{24}$$

Uz zanemarenje razlike Carterovih koeficijenata k_c i k_{cm}, te množenjem brojnika i nazivnika drugog pribrojnika s $\frac{2}{b_g}$, dobivamo koeficijent izobličenja indukcije u zračnom rasporu:

$$k_{iz} = \frac{\delta}{\delta_m} \left(1 + \frac{2x_m}{b_{gg}} \frac{1}{k_\Theta}\right). \tag{25}$$

Maksimalni napon između kolektorskih lamela u praznom hodu stroja, polazeći od izraza (7), bit će:

$$e_{kmax} = \frac{e_k}{a} = \frac{2pU}{ka}, \tag{26}$$

a pod opterećenjem:

$$e_{kmax} = \frac{e_k}{a} k_{iz} = \frac{2pU}{ka} \frac{\delta}{\delta_m} \left(1 + \frac{2x_m}{b_{gg}} \frac{1}{k_\Theta}\right). \tag{27}$$

Krivulju raspodjele napona između lamela kolektora za nekompenzirani stroj određujemo uz pomoć izraza (8) uz prethodno izračunavanje vrijednosti zračnog raspora iz relacija (11) ili (12) (ovisno o izvedbi zračnog raspora) i indukcije iz izraza (17).

U primjeru *kompenziranog stroja*, uslijed protjecanja namota kompenzacije znatno je manje izobličenje indukcije u zračnom rasporu, a time i maksimalni napon između kolektorskih lamela. Zbog smještaja namota armature i kompenzacije u utore, nemoguće je provesti potpunu kompenzaciju. U daljnjim razmatranjima pretpostavit ćemo kontinuiranu raspodjelu namota armature, a namot kompenzacije koncentriran u odgovarajući broj utora.

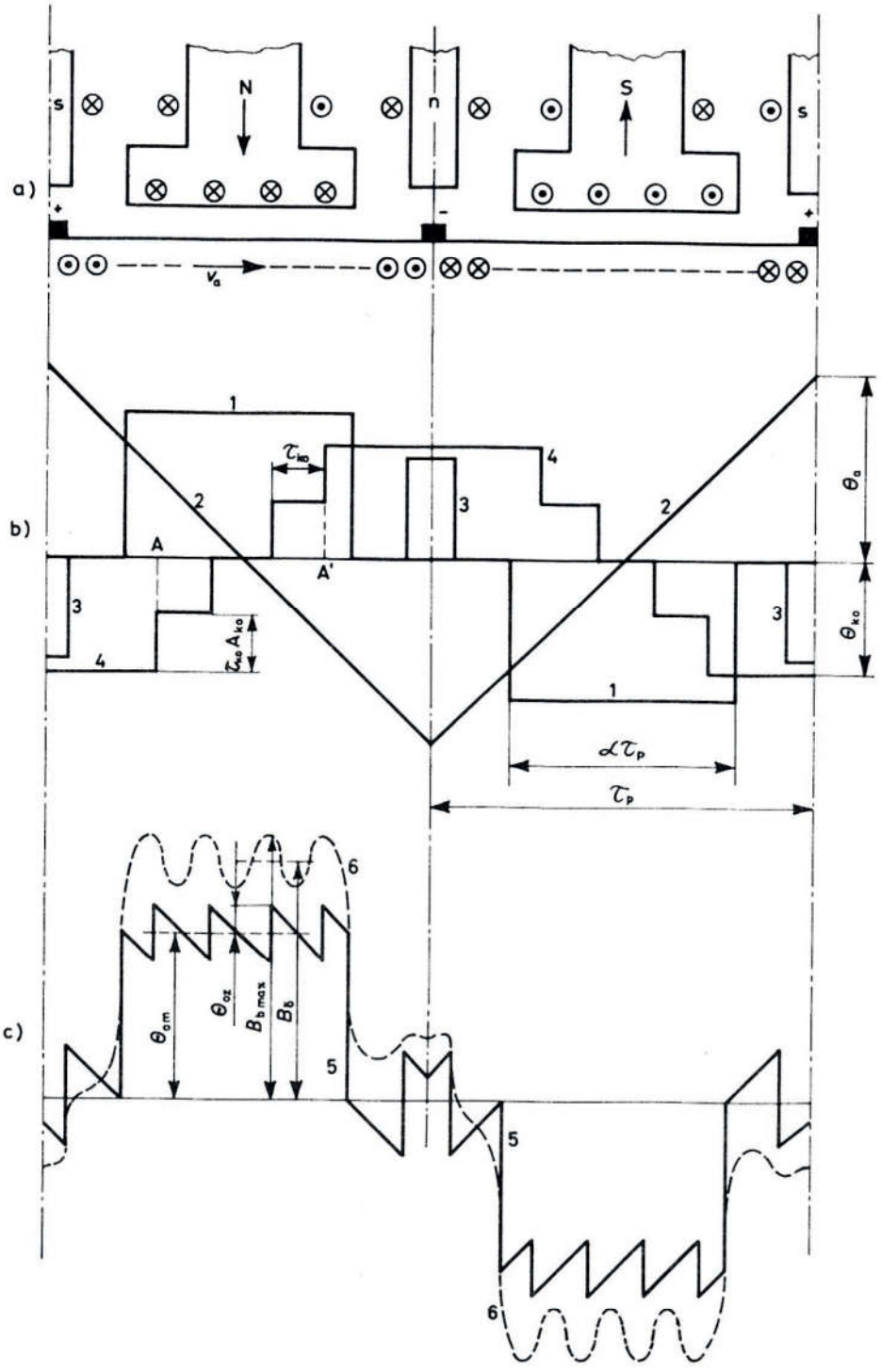
Na slici 11.a prikazan je smještaj namota sa smjerovima struja i polaritetom za motorski rad kompenziranog stroja, a na slici 11.b raspodjela protjecanja pojedinih namota, pri čemu se krivulja 1 odnosi na protjecanje namota uzbude (uz zanemarenje rubnog efekta), krivulja 2 na protjecanje namota armature, krivulja 3 na protjecanje namota pomoćnih polova i krivulja 4 na protjecanje namota kompenzacije uzevši u obzir koncentraciju namota u utore. Na slici 11.c predočena je raspodjela rezultantnog protjecanja (krivulja 5) i indukcije (krivulja 6) u zračnom rasporu.

Indukcija u zračnom rasporu na mjestu udaljenome za x od simetrale glavnog pola, za nezasićeni magnetski krug glavnih polova, određena je izrazom:

$$B_{\delta x} = \mu_0 \frac{\Sigma \Theta}{(k_c \delta)_x}, \tag{28}$$

gdje je $\Sigma \Theta$ rezultantno protjecanje prema slici 11.c.

Maksimalna vrijednost indukcije u zračnom rasporu kompenziranog stroja nastaje na mjestu skokovite promjene rezultantnog protjecanja (na mjestu utora kompenzacije).



Sl. 11. Raspodjela protjecanja i indukcije u zračnom rasporu kompenziranog stroja u motorskom radu

Mjesto maksimalne indukcije, prema simetrali glavnog pola, može biti na strani pozitivne ili negativne četkice, ovisno o tome je li stroj natkompenziran ($\Theta_{ko} > \alpha\Theta_a$) ili je potkompenziran ($\Theta_{ko} < \alpha\Theta_a$). Maksimalna indukcija u zračnom rasporu, uz jednoliki zračni raspor glavnih polova, iznosi:

$$B_{\delta max} = \mu_o \frac{\Theta_{om} + \alpha\Theta_a - \Theta_{ko} + \Theta_{oz} k_{pv}}{k_c \delta}, \tag{29}$$

pri čemu je Θ_{oz} protjecanje pulsacije zbog koncentracije kompenzacijskog namota u utore, a iznosi $\Theta_{oz} = \frac{\tau_{ko} A_{ko}}{2}$, gdje je τ_{ko} korak utora kompenzacije, a A_{ko} strujni oblog kompenzacijskog namota. Dalje je k_{pv} koeficijent prigušenja protjecanja pulsacija (zbog vrtložnih struja) a iznosi $k_{pv} \doteq 0{,}5$.
Za indukciju u praznom hodu, uz upotrebu izraza (28), možemo pisati:

$$B_\delta = \mu_o \frac{\Theta_{om}}{k_c \delta}.$$

Koeficijent izobličenja indukcije u zračnom rasporu (omjer maksimalne indukcije pod opterećenjem prema onoj u praznom hodu pod sredinom polne papuče) bit će:

$$k_{iz} = \frac{B_{\delta max}}{B_\delta} = \frac{\Theta_{om} + \alpha\Theta_a - \Theta_{ko} + \Theta_{oz} k_{pv}}{\Theta_{om}}. \tag{30}$$

Maksimalni napon između lamela kolektora pod opterećenjem, polazeći od izraza (7), iznosi:

$$e_{kmax} = \frac{e_k}{\alpha} k_{iz} = \frac{2pU}{k\alpha}\left(\frac{\Theta_{om} + \alpha\Theta_a - \Theta_{ko} + \Theta_{oz} k_{pv}}{\Theta_{om}}\right). \tag{31}$$

Već je spomenuto da mjesto nastanka maksimalnog napona između lamela kolektora valja udaljiti od anodno polarizirane četkice u smjeru vrtnje. Radi toga se iskorištenim kompenziranim strojevima povećava zračni raspor na rubu polne papuče (djelomično proširen zračni raspor). Strojevi namijenjeni samo motorskom radu redovito se blago (do cca 10%) natkompenziraju, a oni koji rade samo u generatorskom radu blago se potkompenziraju.

Iz provedenog razmatranja potencijalnog stanja na kolektoru može se zaključiti da je najpovoljniji način smanjenja vrijednosti maksimalnog napona između kolektorskih lamela upotreba kompenzacijskog namota, a za nekompenzirane strojeve nejednolikoga zračnog raspora glavnih polova.

5.5. Održavanje sklopa za komutaciju

Ispravno održavanje komutacijskog sklopa jedan je od osnovnih uvjeta za besprijekoran rad kolektorskog stroja. Jasno je da se manjim strojevima bez posebnih teškoća u komutaciji obraća manja pažnja, a većim strojevima s osobito izraženim teškoćama u komutaciji veća pažnja. U narednom izlaganju daju se opće smjernice za održavanje komutacijskog sklopa koje vrijede za sve kolektorske strojeve. Budući da je općim smjernicama nemoguće obuhvatiti sve specifičnosti pojedinih strojeva u održavanju komutacijskog sklopa s obzirom na potrebne radove, vremensku učestalost i sredstva pri radu, prije svega se valja pridržavati uputa proizvođača stroja.

5.5.1. Kolektor

Osnovni uvjet za ispravno vođenje struje između četkica i kolektora i dobru komutaciju jest okrugli kolektor glatke i čiste klizne plohe s jednoličnom patinom. Povećana ekscentričnost, nagorena mjesta, izbačene ili uvučene lamele i izolacija između lamela koja strši izvan kolektorske klizne plohe daju nemirni rad četkica (osobito pri većim obodnim brzinama kolektora), koji uzrokuje daljnje pogoršanje uvjeta rada kliznog kontakta.

Tokom rada stroja, zbog trošenja četkica i prisutnih nečistoća u rashladnom zraku, nastupa zaprljanje kolektora, pri čemu je posebno opasno skupljanje raznih nečistoća u utorima između kolektorskih lamela. Suhe nečistoće s kolektora i kolektorske kape odstranjuju se običnom četkom i brisanjem suhom tkaninom (koja nakon čišćenja ne ostavlja vlakna), a masne se nečistoće uklanjaju brisanjem tkaninom natopljenom u čistom benzinu ili špiritu. Čišćenje utora između kolektorskih lamela provodi se četkom jačih i kraćih niti ili tankom pločicom pertinaksa. Za čišćenje utora između lamela na smiju se upotrebljavati sredstva i pribor kojima će se oštetiti patina na kolektorskoj kliznoj plohi.

Rad stroja uzrokuje trošenje kolektora i povećavanje njegove ekscentričnosti prema onoj početnoj kakva je bila u njegovu tokarenom stanju. Općenito se smatra da ekscentričnost kolektora u toku eksploatacije može biti bilo koja veličina pri kojoj stroj ne iskri više od dopuštenih granica. Ekscentričnost kolektora pri kojoj će nastati iskrenje iznosi za brzohodne strojeve cca 0,07 mm, a za sporohodne cca 0,2 mm. Ekscentričnost kolektora mjeri se indikatorom prislonjenim na njegovu kliznu plohu uz polagano jednolično okretanje kolektora. Kad ekscentričnost kolektora premašuje dopuštene vrijednosti, potrebno ga je tokariti.

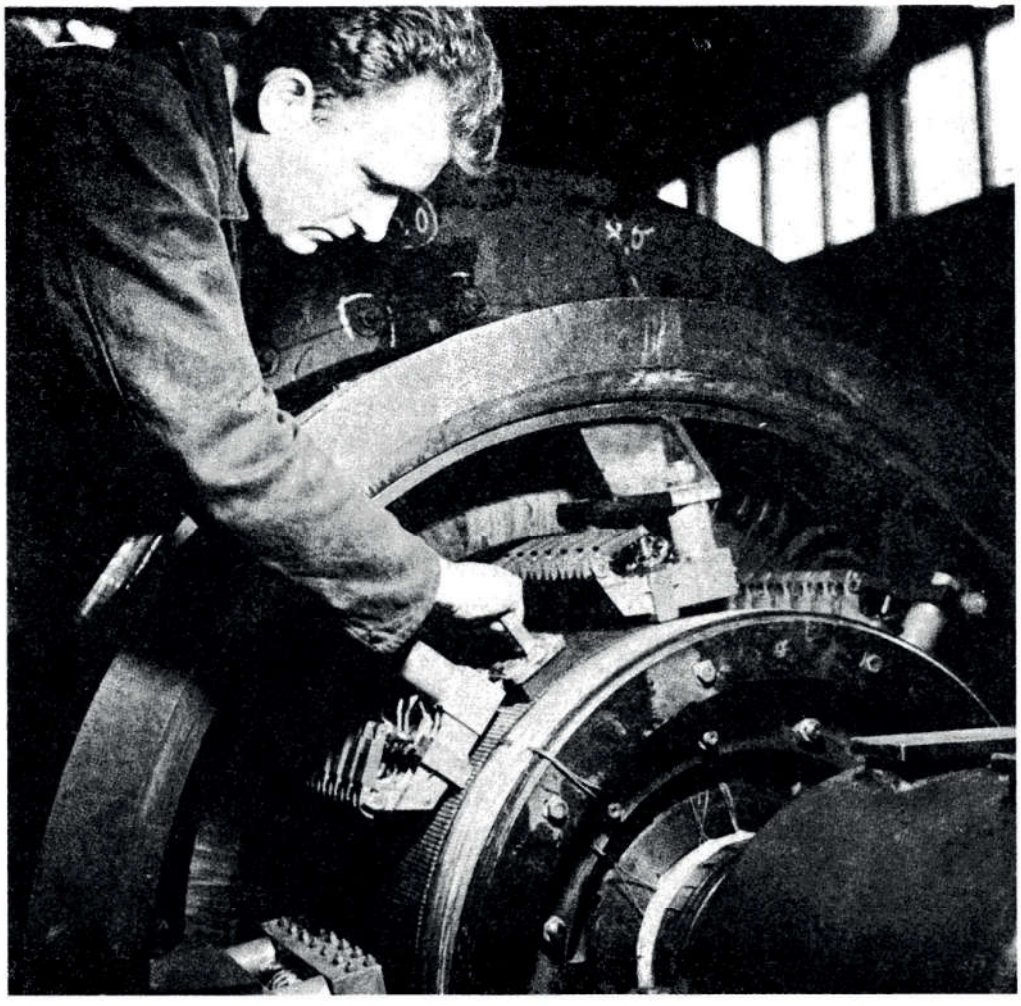
Kad kolektor, zbog svoje veličine ili mogućnosti tehnološkog procesa, nije dinamički formiran, ima vjerojatnosti da će za nekoliko mjeseci eksploatacije nastupiti vremenski brzo povećavanje ekscentričnosti, a možda i izbacivanje pojedinih lamela za nekoliko tisućinki milimetara. Zbog toga treba novom kolektoru u prvih šest mjeseci rada jednom mjesečno provjeriti ekscentričnost i pri zaustavljanju stroja osluhnuti lupaju li četkice (indikacija izbacivanja pojedinačnih lamela). Ako se pojavi vremenski brzo povećavanje ekscentričnosti kolektora ili izbacivanje pojedinačnih lamela, potrebno je i u hladnom i u pogonski toplom stanju kolektora izvršiti stezanje vijaka kolektora s momentom (isključivo moment-ključem) prema preporuci proizvođača, a zatim otokariti kolektor.

Trošenjem kolektora smanjuje se dubina utora između lamela, a kad se izolacija između lamela izjednači po visini s lamelama kolektora, pri svim kvalitetama materijala četkica izuzevši ugljenih, pojavljuje se odskakivanje četkica s kolektora i iskrenje. Četkice svojom tvrdoćom i abrazivnim svojstvom ne mogu izderati izolaciju između lamela, pa je u tim okolnostima potrebno tokariti kolektor.

Manji se strojevi rastavljaju za tokarenje, a tokari se na tokarskom stroju. Srednji i veći strojevi tokare se u vlastitim ležajima uz podignute četkice i vanjski pogon. Suport za tokarenje pri tome se učvrsti na kućište stroja pomoću posebnog

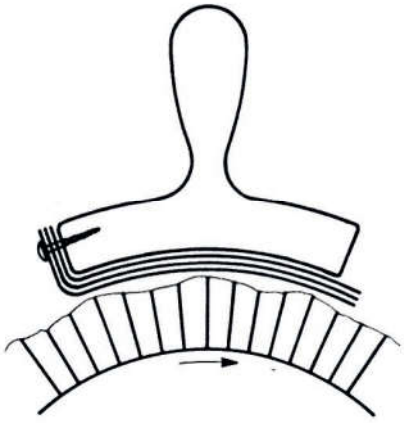
nosača, ili na temeljnu ploču. Prije tokarenja valja zaštititi namot armature i zastavice kolektora od ulaska strugotine. Prvo (grubo) tokarenje obavlja se nožem s tvrdim metalom uz obodnu brzinu kolektora od 3 do 40 ms^{-1} (najpovoljnije s nazivnom brzinom) i posmak od 0,1 mm, te dubinu rezanja prema potrebi. Prilikom obrade kolektora moraju se izbjegavati vibracije. Nakon prvog tokarenja potrebno je izglodati izolaciju između kolektorskih lamela do dubine od 0,6 do 1,2 mm kako je to opisano u odjeljku 5.1. zatim skinuti oštre bridove lamela za 0,2 do 0,5 mm pod kutom od 45° prema slici 5.1 – 6, te zaobliti rubove kolektora prema slici 5.1 – 15. Drugo fino tokarenje obavlja se dijamantnim nožem uz posmak od 0,04 mm, dubinu rezanja od 0,02 do 0,04 mm i brzinu rezanja od 10 do 15 ms^{-1}. Valja napomenuti da se kolektori malih strojeva (kojima se ne glođe izolacija između lamela) ne tokare dijamantnim nožem, već samo nožem s tvrdim metalom (npr. vidia-nožem).

Umjesto tokarenjem, pri obradi kolektora u vlastitim ležajima, može se obrada provesti brušenjem. Brusi se učvršćenim mirnim brusnim kamenom ili rotirajućom brusnom pločom, oboje uz vrtnju kolektora i aksijalni pomak brusa pomoću naprave (slične suportu kod tokarskog stroja). Brzine vrtnje brusne ploče



Sl. 1. Ručno brušenje kolektora brusnim kamenom

ovise o brzini vrtnje kolektora. Brusne ploče i brusni kameni izrađuju se od silicij-karbida kojem su zrna međusobno povezana sintetičkim smolama. Za prvo (grubo) brušenje kolektora pri većim neravninama njegove klizne plohe upotrebljavaju se [L 47] brusovi srednjih zrnâ (veličina zrna od 177 do 210 μm), a za drugo (fino) brušenje brusovi finih zrnâ (veličina zrna od 53 do 74 μm). Brzina brušenja ne bi trebalo da promašuje 30 ms^{-1}. Osnovni je nedostatak brušenja kolektora nastanak velike količine prašine.



Sl. 2. Ručno brušenje kolektora brusnim papirom

U primjeru kad neravnine kolektora nisu veće od 0,03 mm ili kad s klizne plohe kolektora želimo izbrusiti nagorjela mjesta, za brušenje služi brusni kamen veće površine i njega rukom pritišćemo na kolektorsku kliznu plohu, kao što je to prikazano na slici 1. Brusni se kamen stavlja na kolektor pri postignutoj punoj brzini brušenja, a tokom brušenja pomiče se aksijalno po kolektoru. Za vrijeme brušenja ne smiju nastupiti vibracije ili podrhtavanje brusnog kamena.

Male neravnine ili nagorjela mjesta na kolektorskoj kliznoj plohi mogu se odstraniti i finim brusnim papirom koji se pritišće na kolektor komadom drva točno profiliranim prema promjeru kolektora, kao što je to na slici 2. Između drva i brusnog papira ne smije biti elastična podloga.

I na kraju valja napomenuti da pri obradi kolektora treba uzeti takve vrijednosti parametara obrade uz koje se na površini obrade ne premašuje temperatura rekristalizacije bakra, da se ne izazove smanjenje tvrdoće bakra.

5.5.2. Držači četkica

Za dobru komutaciju bez opasnosti nastanka kružne vatre ili preskoka s držača četkica na ostale dijelove stroja, potrebno je održavati čistoću držača četkica, izolatora i uređaja za nošenje četkica. Suhe nečistoće odstranjujuju se običnom četkom i brisanjem suhom tkaninom, a masne se nečistoće brišu tkaninom navlaženom u čistom benzinu ili špiritu.

Uređaj za nošenje četkica ne smije u eksploataciji biti labav, a u području radnih brzina vrtnje dijelovi uređaja ne smiju doći u rezonanciju s ostalim vibracijama stroja koje mogu biti uzrokovane radnim mehanizmom u motorskom

radu ili pogonskim strojem u generatorskom radu. Srednjim i većim strojevima uređaj je za nošenje četkica zakretan, pa u toku eksploatacije treba provjeriti njegovu stabilnost i položaj četkica prema neutralnoj zoni kako je to propisao proizvođač stroja. Motorima za reverzibilne pogone četkice moraju biti u neutralnoj zoni, a strojevima sa samo jednim smjerom vrtnje mogu biti i izvan neutralne zone, ali u točno propisanom položaju.

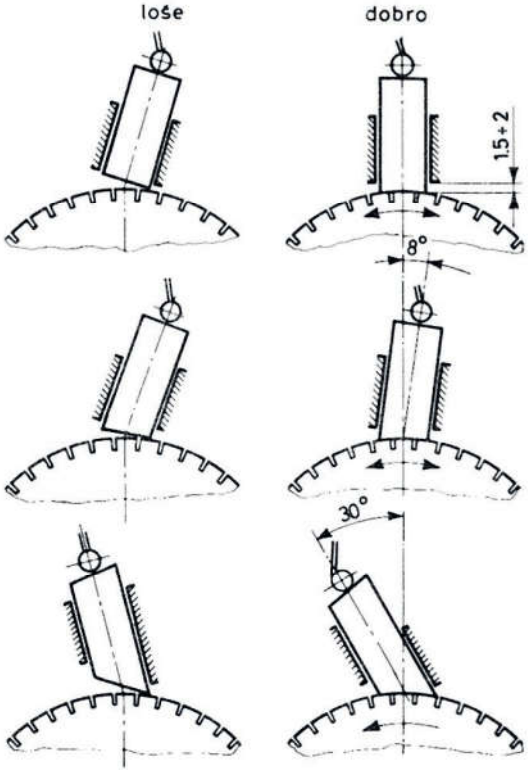
Pri učvršćenju držača četkice na svornjak pomoću hvataljke (vidi sl. 5.3 – 10) zna se u toku eksploatacije pojaviti zakretanje hvataljke držača četkice i postavljanje četkice u nepravilni položaj prema kliznoj plohi kolektora, zbog čega će se pogoršati komutacija. Jednako tako, može doći do međusobnog dodirivanja držača četkica, čime se vibracije jednoga prenose na drugi držač četkica pa se pogoršava komutacija. U oba slučaja potrebna je ispravna montaža držača četkica, kao što je to opisano u odjeljku 5.3.2.

Rad stroja uzrokuje istrošenje stijenki otvora na ormariću držača četkica koji služi za vođenje četkice. Zbog toga četkice u držačima postaju labave, nastupa njihov nemirni rad i posljedica toga je povećana potrošnja četkica i pogoršana komutacija. Zato u toku eksploatacije treba kontrolirati dimenzije otvora ormarića i kad istrošenje stijenki premašuje dopuštene granice, moraju se zamijeniti držači četkica. Dopuštene vrijednosti povećanja otvora za vođenje četkice prema nazivnoj mjeri iznose od 0,25 do 0,4 mm, ovisno o veličini otvora, brzini vrtnje stroja i o tome je li pogon reverzibilan ili ne, a propisuje ih proizvođač stroja. Pri kružnoj vatri ili preskoku s držača četkica na ostale dijelove stroja zbog električnog luka i mjestimično visoke temperature može se pojaviti termičko deformiranje stijenki otvora ormarića držača četkica i zaglavljivanje četkice u držaču. Zato nakon kružne vatre ili preskoka valja provjeriti ima li svaka četkica slobodan hod u držaču. Ako ga nema, mora se zamijeniti držač četkica.

Za dobro vođenje struje mora četkica ležati na kolektoru pod određenim pritiskom, a pritisak svih četkica na kolektoru mora biti praktički jednak. Dopuštene tolerancije pritiska četkica iznose cca $\pm 5\,\%$ za držače četkica s podešavanjem pritiska, a cca $\pm 10\,\%$ za one bez podešavanja. Pritisak četkica potrebno je provjeriti jednom u godini na način opisan u odjeljku 5.3.1. i prikazan na slici 5.3 – 10. Kad je pritisak četkica izvan dopuštenih vrijednosti, mora se držačima s podešavanjem podesiti pritisak. Ako nema te mogućnosti, mora se zamijeniti pero ili cijeli držač četkica. Prije svakog mjerenja pritiska četkica provjeravamo ima li četkica slobodan hod u otvoru ormarića i nisu li zaglavljeni zglobovi na sistemu poluga držača četkica.

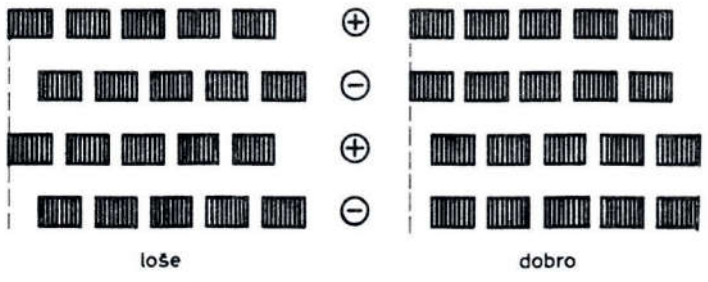
U održavanju kolektorskih strojeva držači se četkica više puta izvade i nanovo ugrađuju ili zamjenjuju. Ispravna ugradnja držača četkica jedan je od uvjeta dobre komutacije, pa njihovu položaju i rasporedu na kolektoru valja obratiti posebnu pažnju. Na slici 3. prikazan je dobar i loš položaj radijalnih i kosih držača četkica s obzirom na smjer vođenja četkica u držaču prema kolektorskoj kliznoj plohi i smjeru vrtnje kolektora, a na slici 4. nalazimo dobar i loš raspored držača četkica po obodu i dužini kolektora. Osim položaja i rasporeda držača četkica prikazanoga na slikama 3. i 4. potrebno je još pripaziti na razmak

između ormarića držača četkica i kolektorske klizne plohe, koji mora biti od 1 do 2 mm; na razmak između ormarića susjednih držača četkica, koji mora iznositi cca 1 mm; na paralelnost otvora ormarića držača četkica s uzdužnim bridom lamela kolektora, koja mora biti od 3 do 5 mm po metru dužine klizne plohe kolektora; na raspodjelu ormarića držača četkica raznog polariteta po obodu kolektora s odstupanjem koje ne smije prekoračiti $\pm 0{,}7$ mm. Ostali detalji ugradnje držača četkica opisani su u odjeljku 5.3.2.



Sl. 3. Položaj držača četkica prema kolektorskoj kliznoj plohi

Prije ugradnje novog držača četkica potrebno je na njemu provjeriti nalaze li se mjere otvora ormarića u području dopuštenih tolerancija, prema tablici na slici 5.3–8, zatim nalazi li se pritisak četkice u području od nove do istrošene četkice unutar dopuštenih tolerancija za zahtijevani nazivni pritisak, te je li paralelnost i okomitost otvora ormarića prema plohi za učvršćenje držača četkica u dopuštenim granicama do 5 mm po metru dužine.



Sl. 4. Raspored držača četkica po obodu i dužini kolektorske klizne plohe

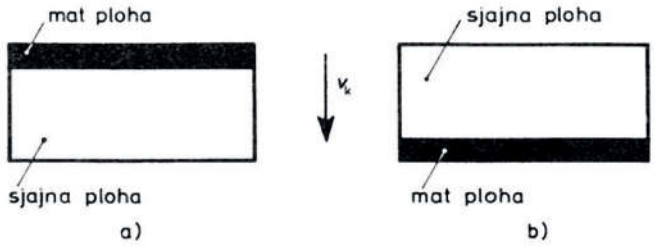
5.5.3. Četkice

Rad stroja uzrokuje skupljanje raznih nečistoća (prašina od trošenja četkica, prašina iz rashladnog zraka i slično) između četkice i stijenki otvora u ormariću držača četkica, čemu je posljedica smanjeni pritisak četkice na kolektorsku kliznu plohu (unatoč sili pera držača četkice), zatim nepoželjno vođenje struje između četkice i stijenki ormarića držača četkice, ili čak zaglavljivanje četkice u ormariću držača. Za dobro vođenje četkice u određenom smjeru prema kolektorskoj kliznoj plohi, uz potrebni se pritisak mora u eksploataciji održavati čistoća četkice i otvora ormarića njezina držača. Čišćenje se provodi brisanjem suhom tkaninom bez upotrebe kemijskih sredstava. Nakon čišćenja četkica se mora staviti u isti ormarić iz kojeg je izvađena, i to u istom položaju u kakvu je bila, što osigurava dobro prilijeganje njezine klizne plohe na kliznu plohu kolektora bez dodatnog brušenja četkica.

Osim čišćenja četkica u eksploataciji se mora obavljati i njihov pregled, a osobitu pažnju treba obratiti njihovoj istrošenosti, oštećenju četkica i njihovih uzica, te stanju njihove klizne plohe.

Četkica se smije potrošiti samo do određene visine, koja je redovito označena utorom ili nekim drugim znakom na njezinoj užoj strani. Kad se četkica istroši do oznake ili blizu nje, potrebno ju je zamijeniti novom.

U eksploataciji stroja zna nastati mehaničko oštećenje četkica (lom i otkrnjena mjesta tijela četkica, lom uzica, izvlačenja uzica iz tijela četkica, odljepljivanje gume na vrhu višedijelne četkice itd.), zbog ulaska stranog tijela s rashladnim zrakom, vibracija radnog mehanizma ili pogonskog stroja, naglog otpuštanja pritiskivača držača četkica na vrh četkice pri pregledu stroja, električkog preopterećenja pojedine četkice itd. Jednako tako može se pojaviti i električko oštećenje, npr.: promjena boje ili pregaranje uzica zbog loše raspodjele struje i preopterećenja pojedinih četkica, nagaranje bočnih strana tijela četkice zbog vođenja struje između tijela četkice i stijenki ormarića njezina držača itd. Pri pregledu se sve mehanički ili električki oštećene četkice moraju zamijeniti novima i treba otkloniti uzroke njihova oštećenja.

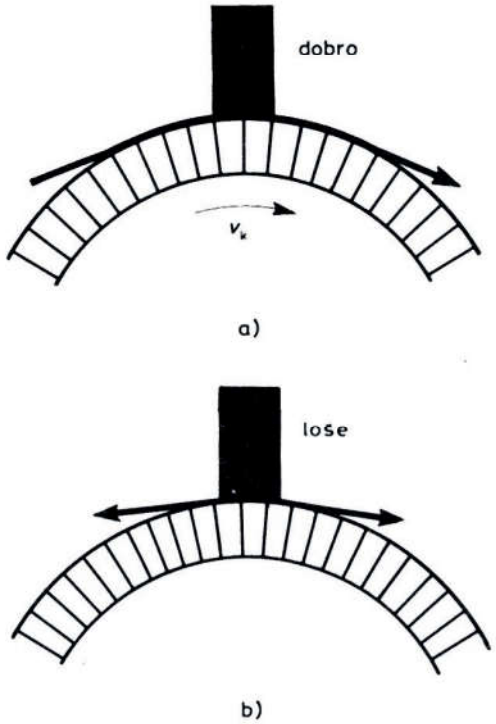


Sl. 5. Izgled klizne plohe četkice

Klizna ploha četkice u radu je stroja prilagođena kliznoj plohi kolektora. Tako je strojevima s jednim smjerom vrtnje svojstvena samo jedna klizna ploha, a onima s dva smjera vrtnje dvije klizne plohe četkica, svaka za svoj smjer vrtnje. Klizna ploha četkice mora biti jednolična i sjajna, oštrih bridova i bez nagorjelih

mjesta. Kad četkica ima nagorjele bridove ili nagorjela mjesta na kliznoj plohi može se zaključiti da je komutacija pogoršana, bilo po vidljivim iskrama na dolaznom ili odlaznom bridu četkice, bilo po nevidljivim iskrama na površini ispod same četkice. Na slici 5. tipični je izgled klizne plohe četkice prema smjeru gibanja kolektora, i to na slici 5.a za iskrenje na dolaznome i na slici 5.b za iskrenje na odlaznom bridu četkice. Četkice s nagorjelom kliznom plohom nanovo se bruse.

Brušenje četkica radi se izvan stroja prije ugradnje četkica ili na samom kolektoru nakon njihove ugradnje. Brušenje izvan stroja obavlja se posebnom napravom koja se sastoji od valjka promjera kolektora oblijepljenoga brusnim papirom i držača četkica, i to stavljanjem četkice u držač četkice i okretanjem valjka s brusnim papirom. Osnovna je prednost takva brušenja u tome što se prašina nastala brušenjem ne unosi u stroj. Ugrađene četkice bruse se na samom kolektoru tako da na kolektor po cijelom obodu zalijepimo brusni papir i njegovim okretanjem (kad je to moguće) brusimo četkice. Ako se kolektor ne može okretati zbog spoja stroja s radnim mehanizmom ili pogonskim strojem, ugrađene se četkice bruse tako da na dio klizne plohe kolektora postavimo brusni papir, a četkice se bruse pomicanjem tog papira po kolektoru koji miruje. Pri tom postupku posebnu pažnju valja obratiti ispravnom ubrušivanju bridova četkice, koje, kad se ona brusi, ovisi o položaju brusnog papira na kolektoru. Za ispravno ubrušivanje bridova mora brusni papir pri povlačenju ispod četkice obuhvaćati

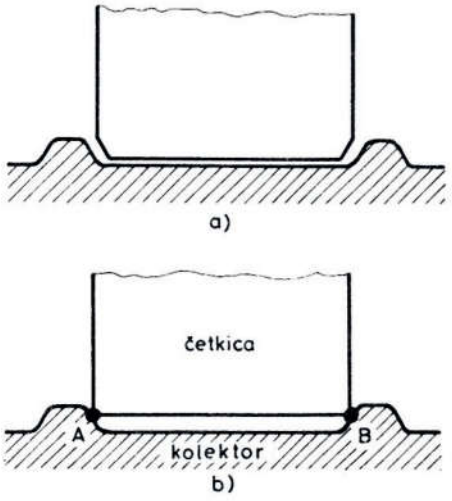


Sl. 6. Ubrušavanje četkica na kolektoru

određeni dio oboda kolektora, kako je to prikazano na slici 6.a, a ne samo neznatan dio kolektora u okolici četkice, kao na slici 6.b. Osnovni nedostatak brušenja četkica u stroju je pojava relativno velike količine prašine. U toku brušenja ne smije se na držačima četkica umjetno povećavati pritisak.

Nakon brušenja četkica i završnog čišćenja, a prije punog opterećenja stroja, potrebno je u toku nekoliko sati (ili tako dugo dok cijela klizna ploha poprimi sjajni izgled) teretiti stroj smanjenom strujom kako bi se klizna ploha četkice potpuno prilagodila kolektorskoj kliznoj plohi.

Kad se zamjenjuju četkice na jako istrošenom kolektoru, gdje one kližu praktički u užljebljenjima, preporučuje se na svakoj od njih prije ugradnje odrezati bridove na užim stranama za cca 1 mm, kako bi se u prvim danima rada osiguralo dobro prilijeganje cijele njihove klizne plohe na kolektor. Na slici 7.a) prikazano je dobro prilijeganje četkice sa skinutim bridovima u žlijebu na kolektoru, a na slici 7.b loše prilijeganje četkice kojoj nisu skinuti bridovi u istom žlijebu na kolektoru. Sa slike 7.b vidi se da četkica u tom primjeru vodi struju praktički samo u točkama A i B, zbog čega nastaje jako iskrenje četkica, a posljedica može biti oštećenje kolektora u prvim satima rada stroja nakon zamjene četkica.



Sl. 7. Prilijeganje četkice na istrošeni kolektor

Sve četkice na kolektoru moraju biti jednake kvalitete. Zato, ako se mijenja kvaliteta materijala četkice, moraju se zamijeniti sve četkice na kolektoru. Prije ugradnje u stroj novoj četkici provjerava se kvaliteta (označena na četkici), dimenzije i eventualna oštećenja. Dimenzije elektrografitnih četkica moraju biti dopuštenih tolerancija prema tablici na slici 5.3–8. Napominjemo da te tolerancije vrijede za jednodijelne četkice. Za dvodijelnu četkicu povećava se tolerancija ukupne tangencijalne dimenzije za 20 mikrona. O tolerancijama metalografitnih četkica posebno se dogovaraju korisnik i proizvođač stroja.

5.5.4. Rashladni zrak

Česti uzrok lošem stanju komutacijskog sklopa (zaprljanje, iskrenje četkica, istrugana kolektorska klizna ploha, povećana potrošnja četkica i kolektora itd.) jesu nečistoće u rashladnom zraku. Zato se pri nečistoj okolini ili strojevima sa zatvorenim ciklusom hlađenja, u krug rashladnog zraka redovito ugrađuju filtri. Za ispravno stanje komutacijskog sklopa prijeko je potrebno da se filtar čisti u određenome vremenskom intervalu, kako je to propisao proizvođač stroja.

5.5.5. Simptomi, uzroci i popravak kvara

Svakome nepoželjnom stanju ili kvaru na komutacijskom sklopu može biti više uzroka, koji se dadu točno utvrditi odgovarajućim ispitivanjem ili praćenjem u eksploataciji. No neka stanja ili kvarovi komutacijskog sklopa često se ponavljaju, pa ih se može sistematizirati, kao što je to učinjeno u tablici na slici 8. u prilogu.

U toj tablici daju se simptomi kvara označeni slovima od A do Z koji se mogu utvrditi pregledom komutacijskog sklopa. Na lijevoj strani tablice svrstani su mogući uzroci kvara označeni brojevima od 1 do 40, a na desnoj potrebni zahvati ili popravci obilježeni istim brojevima kojima i uzroci. U srednjem dijelu tablice označeni su točkama mogući uzroci i popravci za određeni simptom kvara.

5.6. Zadaci i problemi

5.6.1. Zadaci

1. Za istosmjerni motor s 1 kW i 1 000 min^{-1} potrebno je odrediti grupu kvalitete četkica, i to:
   a) za napon od 24 V;
   b) za napon od 110 V.
2. Može li se držač četkica prema slici 5.3–6. uz kut nagiba prema kolektoru $\alpha = 30°$ upotrijebiti za istosmjerni motor s dva smjera vrtnje?
3. Malome dvopolnom istosmjernom motoru s relativno velikim brojem zavoja namota armature prekrivanje je glavnih polova 60 % polnog koraka, koeficijent mu je izobličenja magnetskog polja u zračnom rasporu glavnih polova 1,5 i ukupno ima 17 lamela na kolektoru. Smijemo li taj motor, bez obzira na mehanička naprezanja, priključiti na napon od 220 V?
4. Četveropolni istosmjerni stroj od 1 000 A ima kolektor promjera od 450 mm, dužinu klizne plohe 380 mm i obodnu brzinu 30 ms^{-1}. Na kolektoru se u svakom redu nalazi po 12 četkica dimenzija 16 × 25 mm. Četkice imaju koeficijent trenja 0,18 i ovisnost pada napona (pri gustoći struje od 10,4 $\frac{A}{cm^2}$) o pritisku četkica:

$\Delta U_č$ [V]	3,26	2,5	2	1,75
$p_č$ [kPa]	15	20	25	30

Stroj je otvorene izvedbe s vlastitom ventilacijom, a koeficijent ventilacije mu je 0,5.

Treba odrediti:

a) gustoću struje četkica;

b) mehaničke i električke gubitke na kolektoru uz pritisak četkica od 20 kPa;

c) optimalan pritisak četkica s obzirom na minimalne gubitke kolektora;

d) zagrijanje kolektora pri minimalnim gubicima.

5. Četveropolni istosmjerni stroj od 500 A ima kolektor promjera od 270 mm i obodnu brizinu 30 ms^{-1}. Na kolektoru su četkice dimenzija 16 × 25 mm s pritiskom od 20 kPa i koeficijentom trenja 0,18, a pad je napona ovisan o gustoći struje:

$\Delta U_č$ [V]	2,15	2,42	2,53	2,58
$\Gamma_č$ [$\frac{A}{cm}$]	7,5	10	12,5	15

Širina jednog držača četkica iznosi 29 mm, razmak između držača četkica u aksijalnom smjeru je 1 mm, a dodatak na dužinu klizne plohe kolektora zbog aksijalnog pomaka četkica i potrebnoga naponskog razmaka treba da bude 21 mm. Stroj je otvorene izvedbe s vlastitom ventilacijom, a koeficijent efikasnosti ventilacije mu je 0,5.

Potrebno je odrediti:

a) mehaničke i električke gubitke na kolektoru uz pet četkica u redu;

b) zagrijanje kolektora uz pet četkica u redu;

c) minimalni broj četkica u redu ako zagrijanje kolektora ne smije premašiti 80 °C, a gustoća struje 12,5 $\frac{A}{cm^2}$.

6. Šesteropolnome istosmjernom nekompenziranom motoru od 880 V promjer armature je 720 mm, prekrivanje glavnog pola 0,7, djelomično mu je proširen zračni raspor glavnih polova, koji pod sredinom pola iznosi 5 mm, a na rubu polne papuče 10 mm. Strujni oblog namota armature je 400 $\frac{A}{cm}$, a promjer kolektora s 405 lamela je 580 mm. Motoru se podešava brzina vrtnje slabljenjem glavnoga magnetskog polja, a protjecanje uzbudnog namota iznosi pri maksimalnoj brzini vrtnje 4 000 A po polu.

Valja odrediti:

a) ekvivalentni zračni raspor glavnih polova;

b) mjesto nastajanja maksimalnog napona između kolektorskih lamela i njegovu vrijednost;

c) vrijednost maksimalne promjene napona po obodu kolektora;

d) raspodjelu napona između lamela po kolektorskom obodu;

e) raspodjelu promjene napona po obodu kolektora.

7. Istosmjerni motor ima podatke kao u 6. zadatku samo mu je djelomično proširen zračni raspor, izveden tako da proširenje na rubu polne papuče glavnog pola bude 7,5 mm. Zadatak je:

a) odrediti vrijednost ekvivalentnoga zračnog raspora glavnih polova;

b) naći mjesto nastanka maksimalnog napona između kolektorskih lamela;

c) ustanoviti maksimalni napon između lamela kolektora i vrijednost maksimalne promjene napona po kolektorskom obodu;

d) usporediti dobivene rezultate s rezultatima iz 6. zadatka.

8. Šesteropolni istosmjerni nekompenzirani motor od 880 V ima promjer armature od 720 mm, geometrijsku širinu papuče glavnog pola od 264 mm i ekscentrični zračni raspor glavnih polova, koji pod sredinom glavnog pola iznosi 4,3 mm, a na rubu polne papuče 8,6 mm. Strujni oblog armaturnog namota je 400 $\frac{A}{cm}$, a promjer kolektora s 405 lamela 580 mm. Motoru se podešava brzina vrtnje slabljenjem glavnoga magnetskog polja, a protjecanje uzbudnog namota iznosi pri maksimalnoj brzini vrtnje 4000 A po polu.

Valja:

a) ustanoviti prekrivanje glavnog pola u električkom smislu;

b) odrediti ekvivalentni zračni raspor glavnih polova;

c) naći mjesto pojave maksimalnog napona između lamela kolektora;

d) odrediti maksimalni napon između kolektorskih lamela i vrijednost maksimalne promjene napona po kolektorskom obodu;

e) izračunati raspodjelu napona između lamela i promjene napona po kolektorskom obodu;

f) usporediti dobivene rezultate s rezultatima iz 6. zadatka.

9. Šesteropolni istosmjerni kompenzirani motor od 950 V ima promjer armature od 720 mm, prekrivanje glavnog pola od 0,7, jednoliki zračni raspor glavnih polova, petljasti jednovojni namot armature s jednim zavojem između lamela kolektora, strujni oblog namota armature od 440 $\frac{A}{cm}$, namot kompenzacije s osam zavoja po polu smješten u 16 utora na papuči glavnog pola i kolektor promjera od 580 mm s 405 lamela. Motoru se podešava brzina vrtnje slabljenjem glavnoga magnetskog polja, a protjecanje uzbudnog namota pri maksimalnoj je brzini vrtnje 2500 A po polu.
Potrebno je odrediti:

a) maksimalni napon između lamela kolektora i vrijednost maksimalne promjene napona po kolektorskom obodu na rubu polne papuče glavnog pola u smjeru vrtnje iza anodno polarizirane četkice;

b) isto kao pod a), samo na rubu polne papuče glavnog pola u smjeru vrtnje prije katodno polarizirane četkice.

5.6.2. Rješenja

1. a) [Metalografitne]
   b) [Ugljenografitne]

2. [Ne, jer bi se četkice zaglavile između svojih držača i kolektora.]

3. Maksimalni napon između kolektorskih lamela prema izrazu (5.3–27) iznosi:

$$e_{kmax} = \frac{e_k}{a} k_{iz} = \frac{2pU}{ka} k_{iz} = \frac{2 \cdot 220}{17 \cdot 0{,}6} \cdot 1{,}5 = 64{,}71 \text{ V}.$$

[Da, jer maksimalni napon po lameli kolektora ne premašuje dopuštenu vrijednost od 70 V za male motore.]

4. Površina jedne četkice je 4 cm², a svih četkica na kolektoru $S_č = 192$ cm².

a) Gustoća struje na četkicama bit će:

$$[\Gamma_č = \frac{2I_a}{S_č} = 10{,}42 \ \frac{A}{cm^2}.]$$

b) Mehanički gubici na kolektoru prema izrazu (5.2-1) uz pritisak četkica od 20 kPa su:

$$P_{km} = 0{,}1 \ \mu p_č S_č v_k = 2073{,}6 \text{ W}.$$

Električki gubici na kolektoru prema izrazu (5.2-2) uz pritisak četkica od 20 kPa iznose:

$$P_{elč} = \Delta U_č I_a = 2500 \text{ W}.$$

[Uz pritisak četkica od 20 kPa mehanički će gubici na kolektoru biti 2073,6 W, a električki 2500 W.]

c) Da se odredi optimalni pritisak četkica s obzirom na minimalne gubitke kolektora, treba izračunati mehaničke i električke gubitke za više vrijednosti pritiska četkica. Vrijednosti pojedinih i ukupnih gubitaka kolektora svrstane su u tablicu na slici 1. i grafički prikazane na slici 2. Iz slike 2. vidi se da minimalni ukupni gubici kolektora nastaju pri pritisku četkica od 20 kPa, a prema tablici na slici 1. oni iznose 4573,6 W.

$p_č$	kPa	15	20	25	30
$\Delta U_č$	V	3,25	2,5	2	1,75
P_{km}	W	1555,2	2073,6	2592	3110,4
$P_{elč}$	W	3250	2500	2000	1750
$P_{km} + P_{elč}$	W	4805,2	4573,6	4592	4860,4

Sl. 1

[Optimalan pritisak četkica je 20 kPa, a minimalni ukupni gubici su 4573,6 W.]

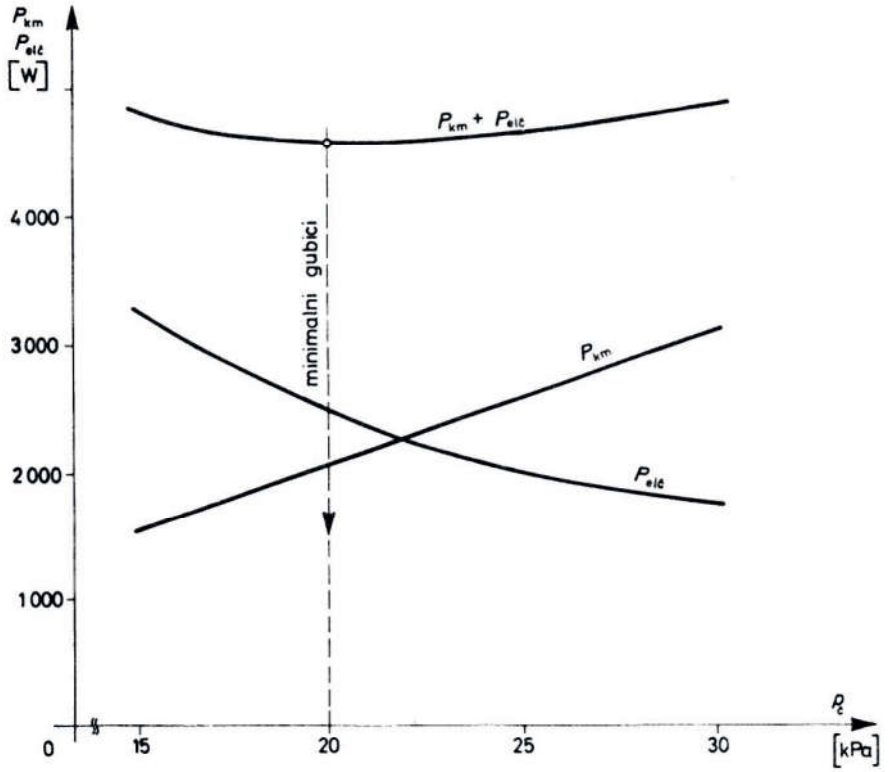
d) Koeficijent odvoda topline s kolektora prema izrazu (5.4-2) iznosi:

$$h_k = 50 \cdot (1 + \alpha_k \sqrt{v_k}) = 50 \cdot (1 + 0{,}5\sqrt{30}) = 186{,}93 \ \frac{W}{m^2 \, °C}.$$

Zagrijanje kolektora prema jednadžbi (5.4-1) uz minimalne gubitke bit će:

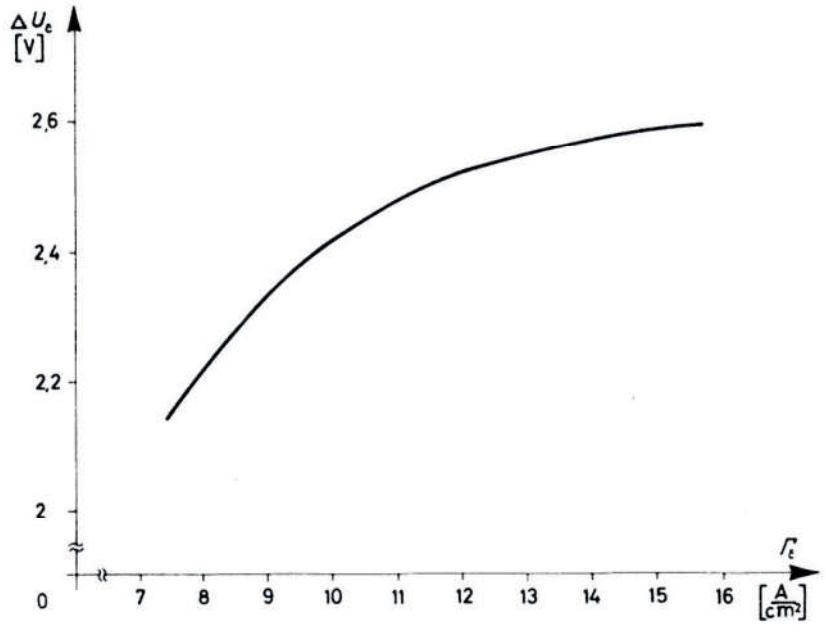
$$\Theta_k = \frac{P_{km} + P_{elč}}{h_k D_k \pi l_k} \cdot 10^6 = \frac{4573{,}6}{186{,}93 \cdot 450\pi \cdot 380} \cdot 10^6.$$

[Zagrijanje kolektora uz minimalne gubitke iznosi 45,5 °C.]



Sl. 2

5. a) S pet četkica u redu, površina svih četkica na kolektoru iznosi $S_č = 80\ \text{cm}^2$, a gustoća struje četkica $\Gamma_č = 12{,}5\ \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$. Na slici 3. prikazana je ovisnost pada napona četkica o gustoći struje, a za gustoću struje od $12{,}5\ \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$ pad je napona četkica 2,53 V.



Sl. 3

Mehanički gubici na kolektoru prema izrazu (5.2–1) bit će:

$$P_{km} = 0{,}1\mu p_č S_č v_k = 864 \text{ W},$$

a električki gubici prema izrazu (5.2–2): $P_{elč} = \Delta U_č T_a = 1\,265$ W.

[Mehanički gubici na kolektoru su 864 W, a električki 1265 W.]

b) Uz širinu držača četkica b_{dr}, razmak između držača četkica b_r, te dodatak na dužinu klizne plohe zbog aksijalnog pomaka četkica i potrebnoga naponskog razmaka b_a, iznosi dužina klizne plohe kolektora:

$$l_k = n_č b_{dr} + (n_č - 1) b_r + b_a = 5 \cdot 29 + (5 - 1)\ 1 + 21 = 170 \text{ mm}.$$

Koeficijent odvoda topline s kolektora prema izrazu (5.4–2) bit će:

$$h_k = 50 \cdot (1 + \alpha_k \sqrt{v_k}) = 186{,}93 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\,°\text{C}}.$$

Zagrijanje kolektora prama jednadžbi (5.4–1) iznosi:

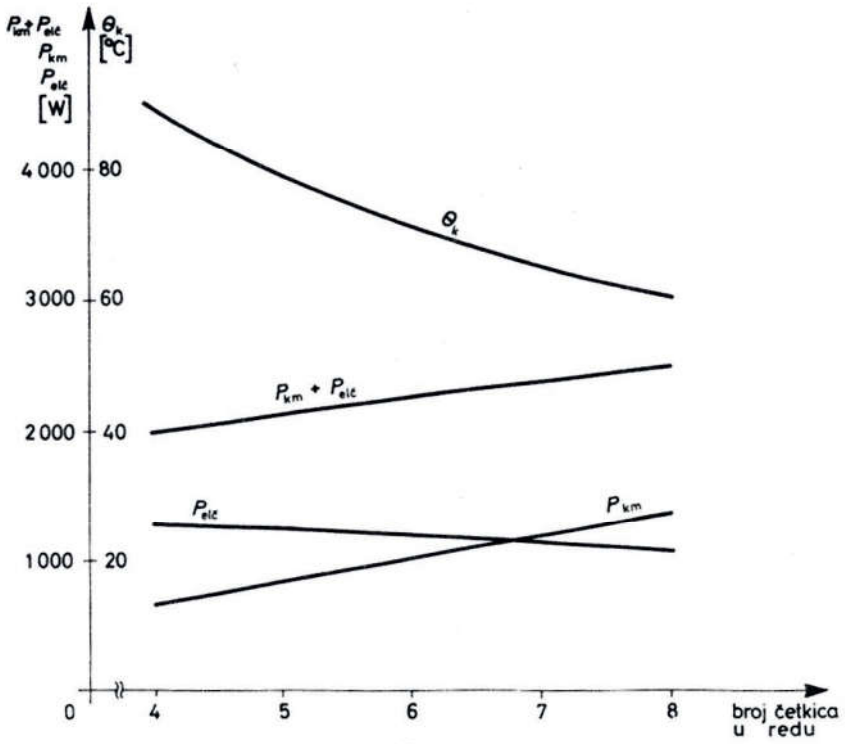
$$\Theta_k = \frac{P_{km} + P_{elč}}{h_k D_k \pi l_k} \cdot 10^6 = 77{,}3 \text{ °C}.$$

[Zagrijanje kolektora uz pet četkica u redu je 77,3 °C.]

c) Minimalni broj četkica u redu s obzirom na dopušteno zagrijanje kolektora i gustoću struje možemo odrediti proračunom gustoće struje četkica, gubitaka i zagrijanja kolektora za više vrijednosti broja četkica u redu. Rezultati su u tablici na slici 4, a grafički su prikazani na slici 5. Sa slike 5. vidi se da minimalni broj četkica u jednom redu može biti pet.
[Minimalni broj četkica u jednom redu je pet, uz dopušteno zagrijanje kolektora od 80 °C i gustoću struje od 12,5 $\frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$.]

Broj četkica u redu	1	4	5	6	7	8
$S_č$	cm^2	64	80	96	112	128
$\Gamma_č$	$\frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	15,62	12,5	10,42	8,93	7,81
$\Delta U_č$	V	2,59	2,53	2,44	2,32	2,19
P_{km}	W	691,2	864	1036,8	1209,6	1382,4
$P_{elč}$	W	1295	1265	1220	1160	1095
$P_{km} + P_{elč}$	W	1986,2	2129	2256,8	2369,6	2477,4
l_k	mm	140	170	200	230	260
Θ_k	°C	89,5	79	71,2	65	60

Sl. 4.



Sl. 5

6. Polni korak stroja je $\tau_p = 377$ mm, a širina polne papuče glavnog pola u električkom i geometrijskom smislu za djelomično proširen zračni raspor prema izrazu (10) je $b_g = b_{gg} = \alpha \tau_p = 263{,}9$ mm. Dužina b tangencijalnog proširenja zračnog raspora prema slici 5.4–8b iznosi:

$$b = (R_a + \delta) \operatorname{tg} \left(\arccos \frac{R_a + \delta}{R_a + \delta_k}\right) = 60{,}62 \text{ mm}.$$

Udaljenost točke A od simetrale glavnog pola (neproširenI dio zračnog raspora) prema slici 7.a je:

$$\frac{b_{gg}}{2} - b = 71{,}33 \text{ mm}.$$

a) Ekvivalentni zračni raspor glavnog pola prema izrazu (5.4–14), za djelomično proširen zračni raspor iznosi:

$$\delta_{ek} = \delta \frac{1}{1 - \dfrac{2b}{b_{gg}\sqrt{\dfrac{\delta_k}{\delta} - 1}} \left(\sqrt{\dfrac{\delta_k}{\delta} - 1} - \operatorname{arc\ tg} \sqrt{\dfrac{\delta_k}{\delta} - 1}\right)}$$

$$\delta_{ek} = 5 \frac{1}{1 - \dfrac{2 \cdot 60{,}62}{263{,}9\sqrt{2-1}} (\sqrt{2-1} - \operatorname{arc\ tg}\sqrt{2-1})} = 5{,}547 \text{ mm}.$$

[Ekvivalentni zračni raspor glavnih polova je 5,547 mm.]

b) Omjer protjecanja namota uzbude prema protjecanju namota armature na rubu polne papuče glavnog pola prema relaciji (5.4 – 19) bit će:

$$k_\Theta = \frac{20\,\Theta_{om}}{\alpha_g \tau_p A} = 0{,}7578.$$

Za udaljenost mjesta maksimalnog napona između lamela kolektora od simetrale glavnog pola prema izrazu (5.4 – 18) dobivamo:

$$x_m = \frac{b_{gg}}{2}\left[\sqrt{(k_\Theta - \frac{2b}{b_{gg}} + 1)^2 + \frac{4b^2}{b_{gg}^2\,(\frac{\delta_k}{\delta} - 1)}} - k_\Theta\right] = 81{,}74 \text{ mm}.$$

Mjesto maksimalnog napona između kolektorskih lamela nalazi se na dijelu proširenoga zračnog raspora, a udaljeno je od točke A na slici 7.a 81,74 – 71,33 = 10,41 mm.
Vrijednost zračnog raspora na mjestu maksimalnog napona između kolektorskih lamela prema izrazu (5.4 – 20) je:

$$\delta_m = \delta\left\{1 + (\frac{\delta_k}{\delta} - 1)\,(\frac{b_{gg}}{2b})^2\left[\sqrt{(k_\Theta - \frac{2b}{b_{gg}} + 1)^2 + \frac{4b^2}{b_{gg}^2(\frac{\delta_k}{\delta} - 1)}} - k_\Theta\right]^2\right\} = 5{,}15 \text{ mm}.$$

Za koeficijent izobličenja indukcije (i napona između lamela kolektora) prema izrazu (5.4 – 25) izlazi:

$$k_{iz} = \frac{\delta}{\delta_m}(1 + \frac{2x_m}{b_{gg}}\frac{1}{k_\Theta}) = 1{,}765.$$

Srednji napon između lamela kolektora prema jednadžbi (5.4 – 7) je:

$$e_k = 2p\,\frac{U}{k} = 13{,}04 \text{ V}.$$

Maksimalni napon između lamela kolektora pod opterećenjem prema relaciji (5.4 – 27) bit će:

$$e_{kmax} = \frac{2pU}{k\alpha}\,\frac{\delta}{\delta_m}(1 + \frac{2x_m}{b_{gg}}\frac{1}{k_\Theta}) = 32{,}86 \text{ V}.$$

[Vrijednost maksimalnog napona između kolektorskih lamela je 32,86 V, a nastaje na mjestu udaljenome za 81,74 mm od simetrale glavnog pola.]

c) Maksimalna promjena napona po kolektorskom obodu nastaje na onome istom mjestu na kojem i maksimalni napon između kolektorskih lamela, tj. na udaljenosti od 81,74 mm od simetrale glavnog pola. Uz korak lamele kolektora $\tau_k = 4{,}5$ mm vrijednost će maksimalne promjene napona po obodu kolektora, prema izrazu (5.4 – 5), biti:

$$\varepsilon_{max} = \frac{e_{kmax}}{\tau_k} = \frac{32{,}86}{4{,}5} = 7{,}3\ \frac{\text{V}}{\text{mm}}.$$

[Vrijednost maksimalne promjene napona po obodu kolektora je $7{,}3\ \frac{\text{V}}{\text{mm}}$.]

d) Raspodjelu napona između lamela po kolektorskom obodu dobivamo određivanjem napona za razne udaljenosti od simetrale glavnog pola. Provedimo određivanje napona između kolektorskih lamela na mjestu 90 mm udaljenome od simetrale glavnog pola, odnosno na udaljenosti 90 − 71,33 = 18,67 mm od točke A (vidi sl. 7.a) prema rubu polne papuče. Vrijednost zračnog raspora glavnog pola na tom mjestu iznosi prema jednadžbi (5.4 − 11):

$$\delta_x = \delta\left[1 + \left(\frac{\delta_k}{\delta} - 1\right)\left(\frac{x}{b}\right)^2\right] = 5\left[1 + (2-1)\left(\frac{18{,}67}{60{,}62}\right)^2\right] = 5{,}474 \text{ mm}.$$

Za koeficijent izobličenja na tom mjestu možemo pisati uz pomoć izraza (5.4 − 25):

$$k_{izx} = \frac{\delta}{\delta_x}\left(1 + \frac{2x}{b_{gg}}\frac{1}{k_\Theta}\right) = 1{,}7355.$$

Napon između kolektorskih lamela na tom mjestu, prema izrazu (5.4 − 27), je:

$$e_{kx} = \frac{e_k}{a} k_{izx} = 32{,}33 \text{ V}.$$

Rezultate određivanja vrijednosti napona između kolektorskih lamela za razne udaljenosti od simetrale glavnog pola nalazimo u tablici na slici 6, a grafički su prikazani na slici 7.b.

Udaljenost od simetrale glavnog pola	mm	0	71,33	81,74	90	110	131,95
Udaljenost od početka proširenje zračnog raspora	mm	–	0	10,41	18,67	38.67	60,62
δ_x	mm	5	5	5,15	5,47	7,03	10
k_{izx}	1	1	1,713	1,765	1,735	1,49	1,16
e_{kx}	V	18,62	31,91	32,86	32,33	27,8	21,6
ε_x	$\frac{V}{mm}$	4,14	7,09	7,3	7,18	6,18	4,8

Sl. 6

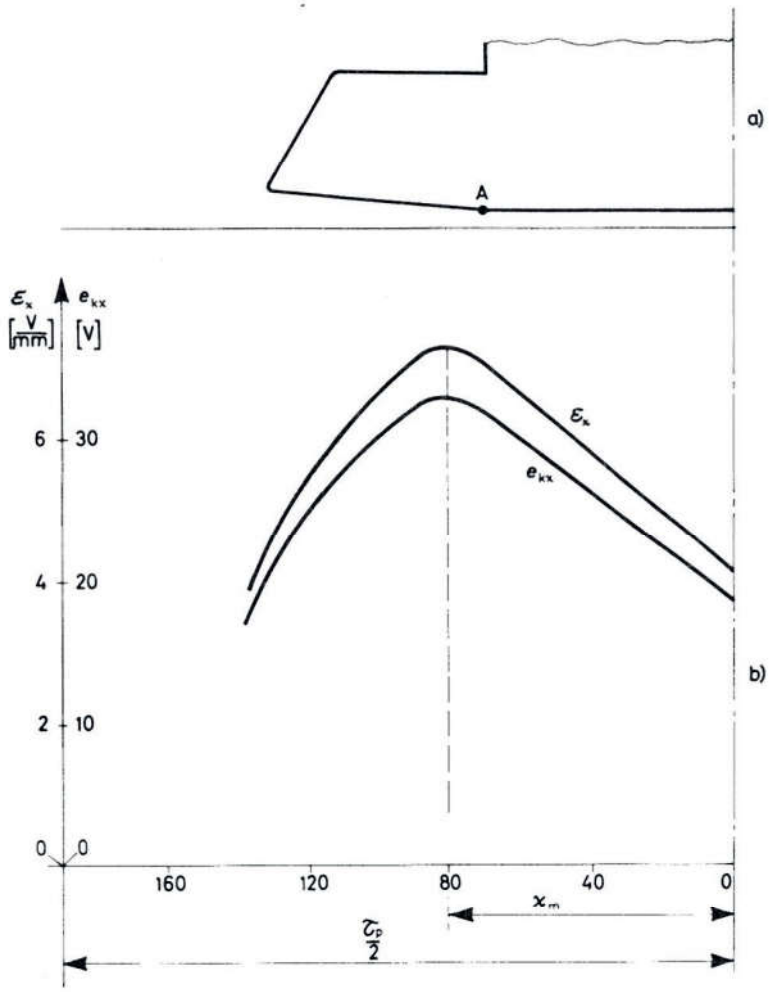
[Raspodjela napona između kolektorskih lamela predočena je na sl. 7.b.]

e) Raspodjelu promjene napona po kolektorskom obodu dobivamo kad vrijednosti napona između kolektorskih lamela podijelimo korakom τ_k lamele kolektora. Na primjer, na udaljenosti od 90 mm od simetrale glavnog pola promjena će napona po obodu kolektora biti:

$$\varepsilon_x = \frac{e_{kx}}{\tau_k} = \frac{32{,}33}{4{,}5} = 7{,}184 \frac{\text{V}}{\text{mm}}.$$

Rezultati određivanja promjene napona po obodu kolektora za razne udaljenosti od simetrale glavnog pola svrstani su u tablici na slici 6.

[Raspodjelu promjene napona po kolektorskom obodu prikazuje sl. 7.b.]



Sl. 7

7. a) [Ekvivalentni zračni raspor je 5,22 mm.]

b) [Maksimalni napon između kolektorskih lamela nastaje na mjestu udaljenome 98,6 mm od simetrale glavnog pola.]

c) [Maksimalni napon između kolektorskih lamela iznosi 36,11 V, a maksimalna je promjena napona po kolektorskom obodu 8,02 $\frac{V}{mm}$.]

d) [Usporedbom dobivenih rezultata vidi se da stroj uz $\frac{\delta_k}{\delta} = 1{,}5$ u 7. zadatku prema stroju uz $\frac{\delta_k}{\delta} = 2$ u 6. zadatku ima veći maksimalni napon između kolektorskih lamela i veću promjenu napona po kolektorskom obodu, i da one u motorskom radu stroja nastaju bliže anodno polariziranoj četkici. Jednako se tako vidi da stroj uz $\frac{\delta_k}{\delta} = 1{,}5$ u 7. zadatku ima manju vrijednost ekvivalentnoga zračnog raspora glavnih polova, pa mu za jednake izlazne parametre (napon, struja, brzina vrtnje) treba manja uzbuda. Iz provedene usporedbe zaključuje se da stroj s većom vrijednosti $\frac{\delta_k}{\delta}$ ima povoljnije potencijalno stanje na kolektoru, ali, zbog potrebnog povećanja uzbudnog protjecanja, za isti će mu promjer armature promjer statora biti veći.]

8. Polni je korak stroja $\tau_p = 377$ mm, a korak kolektorske lamele $\tau_k = 4{,}5$ mm.

a) Prekrivanje glavnog pola određujemo na osnovi raspodjele indukcije u zračnom rasporu za prazni hod stroja. Indukcija u zračnom rasporu mijenja se obrnuto proporcionalno veličini zračnog raspora. U tablici na slici 8. vrijednosti su zračnog raspora glavnog pola prema izrazu (5.4-12), te postotne vrijednosti indukcije za razne udaljenosti x od simetrale glavnog pola. Raspodjela indukcije $B_{\delta x}$ u praznom hodu prikazana je na slici 9.b. Nakon grafičkog integriranja $B_{\delta x} = f(x)$, uz pomoć izraza (5.4-9), dobivamo za prekrivanje glavnog pola:

$$\alpha = \frac{1}{B_\delta \tau_p} \int_0^{\tau_p} B_{\delta x}\, dx = 0{,}6.$$

[Prekrivanje glavnog pola u električkom smislu je 60% polnog koraka.]

b) Ekvivalentni zračni raspor glavnog pola, prema izrazu (5.4-15), za ekscentrični zračni raspor iznosi:

$$\delta_{ek} = \delta \frac{\sqrt{\frac{\delta_k}{\delta} - 1}}{\text{arc tg}\sqrt{\frac{\delta_k}{\delta} - 1}} = 4{,}3 \frac{\sqrt{2-1}}{\text{arc tg}\sqrt{2-1}} = 5{,}475 \text{ mm}.$$

[Ekvivalentni zračni raspor glavnih polova je 5,475 mm.]

c) Za omjer protjecanja namota uzbude i protjecanja namota armature na rubu polne papuče glavnog pola prema relaciji (5.4-19) dobivamo:

$$k_\Theta = \frac{2\Theta_{om}}{\alpha_g \tau_p A} = \frac{2\Theta_{om}}{b_{gg} A} = 0{,}7576.$$

Udaljenost mjesta maksimalnog napona između lamela kolektora od simetrale glavnog pola prema izrazu (5.4-19) je:

$$x_m = \frac{b_{gg}}{2} k_\Theta \left[\sqrt{1 + \frac{1}{k_\Theta^2 \left(\frac{\delta_k}{\delta} - 1\right)}} - 1\right] = 65{,}6 \text{ mm}.$$

Zračni raspor na mjestu maksimalnog napona između kolektorskih lamela prema izrazu (5.4-22) iznosi:

$$\delta_m = \delta \left\{1 + \left[k_\Theta \left(\sqrt{1 + \frac{1}{k_\Theta^2 \left(\frac{\delta_k}{\delta} - 1\right)}} - 1\right)\right]^2 \left(\frac{\delta_k}{\delta} - 1\right)\right\} = 5{,}362 \text{ mm}.$$

[Maksimalni napon između kolektorskih lamela nastaje na mjestu udaljenome 65,6 mm od simetrale glavnog pola.]

d) Koeficijent će izobličenja indukcije i napona između kolektorskih lamela prema izrazu (5.4-25) biti:

$$k_{iz} = \frac{\delta}{\delta_m}\left(1 + \frac{2x_m}{b_{gg}} \frac{1}{k_\Theta}\right) = 1{,}328.$$

Srednji napon između kolektorskih lamela iznosi $e_k = 13{,}04$ V, a vrijednost maksimalnog napona između lamela kolektora pod opterećenjem prema relaciji (5.4-27) je:

$$e_{kmax} = \frac{2pU}{k\alpha} \frac{\delta}{\delta_m}\left(1 + \frac{2x_m}{b_{gg}} \frac{1}{k_\Theta}\right) = 28{,}86 \text{ V}.$$

Maksimalna vrijednost promjene napona po kolektorskom obodu bit će prema izrazu (5.4–5):

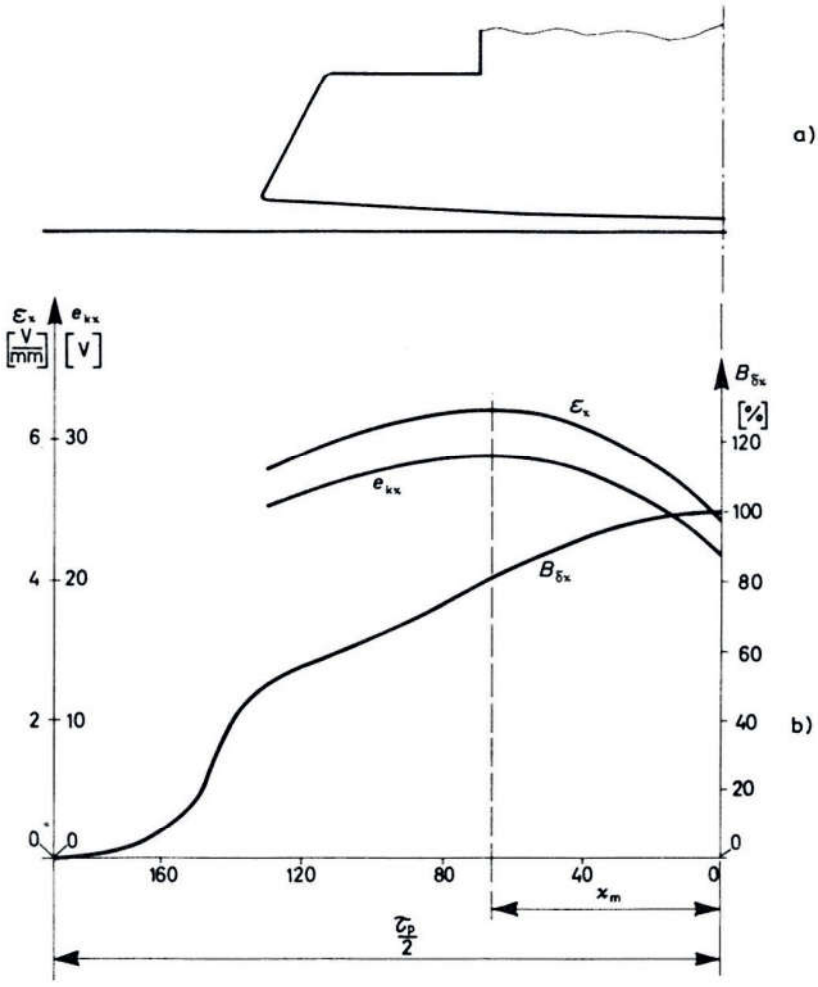
$$\varepsilon_{max} = \frac{e_{kmax}}{\tau_k} = 6{,}41 \ \frac{V}{mm}.$$

[Maksimalni je napon između kolektorskih lamela 28,86 V, a maksimalna vrijednost promjene napona po obodu kolektora je 6,41 $\frac{V}{mm}$.]

e) Raspodjelu napona između kolektorskih lamela i raspodjelu promjene napona po kolektorskom obodu određujemo istim postupkom kao u 6. zadatku. Rezultati za razne udaljenosti od simetrale glavnog pola svrstani su u tablici na slici 8.

Udaljenost od simetrale glavnog pola	mm	0	30	60	65,6	90	120	132
δ_x	mm	4,3	4,52	5,19	5,36	6,3	7,86	8,6
$B_{\delta x}$	%	100	95,09	82,87	80,19	68,26	54,75	50
k_{izx}	1	1	1,237	1,326	1,328	1,297	1,203	1,16
e_{kx}	V	21,73	26,88	28,81	28,86	28,18	26,16	25,21
ε_x	$\frac{V}{mm}$	4,83	5,97	6,4	6,41	6,26	5,81	5,6

Sl. 8



Sl. 9

[Raspodjela napona između kolektorskih lamela i promjena napona po kolektorskom obodu predočene su na sl. 9.b.]

f) [Usporedimo li dobivene rezultate, vidi se da stroj s ekscentričnim zračnim rasporom u 8. zadatku. u usporedbi sa strojem djelomično proširenoga zračnog raspora glavnih polova u 6. zadatku, uz jednako $\frac{\delta_k}{\delta}$ i praktički jednak ekvivalentni zračni raspor (istu uzbudu), ima manji maksimalni napon između kolektorskih lamela i manju vrijednost promjene napona po obodu kolektora i da je oboje u motorskom radu stroja više udaljeno od anodno polarizirane četkice. Zaključuje se iz provedene usporedbe da uz jednaku uzbudu stroj s ekscentričnim zračnim rasporom glavnih polova ima povoljnije potencijalno stanje na kolektoru.]

9. Polni korak je $\tau_p = 377$ mm, korak lamele kolektora $\tau_k = 4{,}5$ mm, broj zavoja namota armature $w_a = kw_s = 405$, broj pari paralelnih grana namota armature $a = p = 3$, koeficijent prigušenja protjecanja pulsacija $k_{pv} = 0{,}5$, a struja armaturnoga strujnog kruga iznosi prema izrazu (4.5–1):

$$I_a = \frac{AaD_a\pi}{w_a} = 737{,}2 \text{ A}.$$

a) Protjecanje će namota armature po polu na rubu polne papuče glavnog pola biti:

$$\alpha\Theta_a = \frac{\alpha\tau_p A}{2} = 5\,805{,}8 \text{ A}.$$

Protjecanje namota kompenzacije po polu je:

$$\Theta_{ko} = I_a w_k = 737{,}2 \cdot 8 = 5\,857{,}6 \text{ A}.$$

Protjecanje pulsacije zbog koncentracije namota kompenzacije u utorima (uz jedan vodič u utoru) iznosi:

$$\Theta_{oz} = \frac{\tau_{ko} A}{2} \cdot \frac{I_a}{2} = 368{,}6.$$

Kad stroj nije 100%-tno kompenziran, razlikuju se vrijednosti maksimalnog napona na strani polne papuče prema anodno polariziranoj četkici i na strani polne papuče prema katodno polariziranoj četkici. U razmatranom primjeru stroj je blago natkompenziran jer je $\Theta_{ko} > \alpha\Theta_a$.

Maksimalni napon između kolektorskih lamela, na rubu polne papuče u smjeru vrtnje iza anodno polarizirane četkice, iznosi pod opterećenjem u motorskom radu prema relaciji (5.4–31):

$$e_{kmax} = \frac{2pU}{k\alpha}\left(\frac{\Theta_{om} + \alpha\Theta_a - \Theta_{ko} + \Theta_{oz}k_{pv}}{\Theta_{om}}\right) = 21{,}18 \text{ V}.$$

Vrijednost maksimalne promjene napona po kolektorskom obodu na istom mjestu bit će prema izrazu (5.4–5):

$$\varepsilon_{max} = \frac{e_{kmax}}{\tau_{ko}} = 4{,}71 \frac{\text{V}}{\text{mm}}.$$

[Na rubu polne papuče glavnog pola u smjeru vrtnje iza anodno polarizirane četkice maksimalni će napon između lamela kolektora biti 21,18 V, a maksimalna promjena napona po kolektorskom obodu 4,71 $\frac{\text{V}}{\text{mm}}$.]

b) Maksimalni napon između kolektorskih lamela, na rubu polne papuče u smjeru vrtnje prije katodno polarizirane četkice, bit će pod opterećenjem u motorskom radu, polazeći od relacije (5.4–31):

$$e_{\mathrm{kmax}} = \frac{2pU}{k\alpha}\left(\frac{\Theta_{\mathrm{om}} - \alpha\Theta_{\mathrm{a}} + \Theta_{\mathrm{ko}} + \Theta_{\mathrm{oz}}k_{\mathrm{pv}}}{\Theta_{\mathrm{om}}}\right) = 22\ \mathrm{V},$$

a vrijednost je maksimalne promjene napona po kolektorskom obodu na istom mjestu prema izrazu (5.4–5):

$$\varepsilon_{\max} = \frac{e_{\mathrm{kmax}}}{\tau_{\mathrm{ko}}} = 4{,}89\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{mm}}.$$

[Na rubu polne papuče glavnog pola u smjeru vrtnje prije katodno polarizirane četkice za maksimalni napon između lamela kolektora dobivamo 22 V, a za maksimalnu promjenu napona po kolektorskom obodu 4,89 $\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{mm}}$.]

6. VRSTE ISTOSMJERNIH STROJEVA

Već je u drugom poglavlju, gdje se razmatrala osnovna fizikalna slika istosmjernog stroja, pokazano kako je u principu svaki istosmjerni stroj upotrebljiv i kao motor i kao generator. Razna električka i mehanička svojstva, koja u pojedinim pogonskim okolnostima zahtijevamo od motora ili generatora, postižemo u prvom redu raznim sistemima uzbuđivanja stroja ili raznim spojevima uzbude, izvora uzbude i stezaljki armature stroja. Iz toga izlazi da je za poznavanje raznih vrsta istosmjernih generatora i motora, potrebno, prije svega, poznavati uzbudu istosmjernog stroja, izvore uzbude i spajanje uzbude na te izvore.

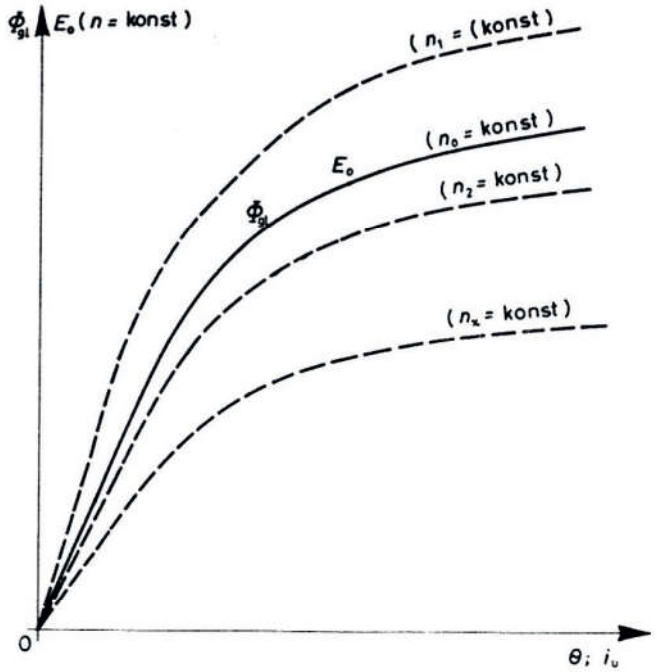
6.1. Uzbuda. Vrste uzbuđivanja

Uzbudni dijelovi istosmjernih strojeva u današnjim su izvedbama redovno elektromagneti, tj. polovi na kojima se nalaze uzbudni namoti. Druga mogućnost, tj. uzbuda permanentnim magnetima u posljednjih deset godina dobila je na značenju, pa se tako uzbuđuju neke vrste istosmjernih motora specijalne namjene, o čemu će biti više riječi u osmom poglavlju.

Prikažimo kako se izvodi klasična uzbuda elektromagnetima. Na glavne polove stroja namotan je jedan ili više uzbudnih namota. Ako ima više namota, stroj može biti uzbuđivan iz više izvora. Kad raznim uzbudnim namotima na jednom paru polova teku struje, ukupno protjecanje koje stvara glavni magnetski tok jednako je zbroju svih protjecanja pojedinačnih namota. Pri tome se protjecanja raznih namota s istim smislom obilaženja struja oko pola potpomažu, tj. zbrajaju, a ona s međusobno suprotnim smislom obilaženja struja oko pola odbijaju, tj. međusobno se djelomično ili potpuno poništavaju, što ovisi o iznosu pojedinačnih protjecanja. U tome leži prva mogućnost mijenjanja svojstava istosmjernog stroja, učinimo li protjecanja raznih namota ovisnim o raznim fizikalnim veličinama, uz pomoć priključka na razne izvore uzbude.

Osnovna karakteristika stroja, iz koje izviru sva razmatranja, jest krivulja njegova magnetiziranja. Ona je za sve vrste strojeva jednako definirana kao funkcionalna ovisnost glavnoga magnetskog toka o ukupnome uzbudnom protjecanju, tj. $\Phi_{gl} = f(\Theta)$. Ta krivulja, prikazana slikom 1, karakterizira magnetski krug stroja i nezavisna je od toga miruje li stroj ili se on vrti bilo kojom brzinom. Vrti li se stroj (generatorski) konstantnom brzinom vrtnje n, krivulja $\Phi_{gl}(\Theta)$ se izjednačuje s krivuljom $E_0(\Theta)$, samo prikazanoj u drugom mjerilu, pri čemu je E_0 inducirani napon na stezaljkama stroja. Budući da je taj inducirani napon postignut u praznom hodu, to je $E_0(\Theta)$ na slici 1. karakteristika praznog hoda definiciju koje znamo već i iz teorije električkih strojeva općenito. Sve je to označeno na slici 1. Karakteristika praznog hoda ostaje nepromijenjena za razne brzine vrtnje (n = konst.) mijenjamo li na odgovarajući način mjerilo za $E_0(\Theta)$. Predvidimo li za $E_0(\Theta)$ neko čvrsto mjerilo, koje se ne mijenja, daje nam svaka

čvrsta brzina vrtnje n svoju krivulju praznog hoda. Skup tih krivulja čini porodicu krivulja praznog hoda, a nekoliko njih crtkano je označeno na slici 1, gdje smo uzeli čvrsto mjerilo za E_0. Zbog toga se u slici poklapa krivulja magnetiziranja samo s jednom karakteristikom praznog hoda. Ta je karakteristika označena punom crtom, a zajednička je za $E_0(\Theta)$ pri $n_0 = \text{konst.}$ i za $\Phi_{gl}(\Theta)$. Omjer vrijednosti $E_0(\Theta)$ za bilo koje Θ bilo kojih dviju krivulja jednak je omjeru brzina vrtnje za koje te dvije karakteristike vrijede.



Sl. 1. Karakteristika magnetiziranja i karakteristike praznog hoda istosmjernog stroja

Nalazi li se na polovima samo jedan uzbudni namot, tad on sam daje i ukupno protjecanje $\Theta = i_u w_u$. Za takve okolnosti može se karakteristika magnetskog kruga prikazati i kao funkcija uzbudne struje $\Phi_{gl}(i_u)$. To je na slici 1. predočeno tako da apscisna os može označavati ili protjecanje Θ ili uzbudnu struju i_u, pa se uz čvrstu brzinu vrtnje n i karakteristika praznog hoda dade prikazati kao $E_0(i_u)$. Birajmo tada razne izvore uzbudne struje, tako da nam ona, a time i ukupno protjecanje, ovisi na neki određen način o nekim fizikalnim veličinama stroja, npr. o naponu stezaljki, struji armature ili slično. Istosmjerni strojevi, uzbuđeni tako na razne načine, pokazuju pod opterećenjem različita svojstva. Običavamo tu govoriti o različitim *vanjskim karakteristikama* stroja. Pod vanjskom karakteristikom istosmjernog generatora razumijevamo međusobnu ovisnost napona stezaljki U i struje tereta I uz konstantnu brzinu vrtnje, a vanjskom karakteristikom istosmjernog motora nazivamo međusobnu ovisnost momenta motora M i brzine vrtnje n uz konstantan napon stezaljki motora. Svojstva istosmjernih strojeva, odnosno njihove vanjske karakteristike, pri raznim načinima uzbuđivanja ili uz različito spajanje uzbuda (što je isto), toliko se međusobno razlikuju da strojeve dijelimo na vrste upravo prema spoju uzbude ili, kraće, ali nepotpunije rečeno, prema spoju stroja. Obradimo, prije svega, osnovne vrste uzbuđivanja istosmjernog stroja.

a) *Nezavisna uzbuda.* Uzbudni je namot priključen na vanjski izvor napona, koji je potpuno neovisan o zbivanjima u stroju. Uzbudni je namot dimenzioniran prema tome vanjskom naponu. Iznos uzbudne struje može se podešavati ako je u strujnom krugu promjenljivi otpornik, neovisno o stroju. Pri takvu spoju riječ je o *nezavisno spojenom* ili *nezavisno uzbuđenom* generatoru ili motoru.

b) *Poredna uzbuda.* Uzbudni je namot priključen na vlastite stezaljke i vlastitu mrežu. Napon vlastite mreže mjerodavan je za dimenzioniranje uzbudnog namota. Podešavanje uzbudne struje moguće je samo vanjskim promjenljivim otpornikom u uzbudnom krugu stroja. Tako nastaje *poredno spojeni* ili *poredno uzbuđeni* stroj.

c) *Serijska uzbuda.* Uzbudni namot priključen je u seriju s armaturnim namotom (kao i namot pomoćnih polova). Za dimenzioniranje namota mjerodavna je struja armature. Uzbudna struja ne može se bez dodatnih uređaja podešavati neovisno o struji armature, nego samo zajednički pomoću predotpora izvan stroja, ali u armaturnom krugu stroja. Takav stroj zovemo *serijski ubuđenim* ili *serijski spojenim* istosmjernim motorom ili generatorom.

d) *Složena uzbuda.* Stroj ima dva uzbudna namota koji zajednički djeluju. To je kombinacija nezavisne i serijske uzbude ili poredne i serijske uzbude. Udio pojedine uzbude u ukupnom protjecanju uvjetuje zahtijevana vanjska karakteristika. Tako nastaju *kompaundirano spojeni*, ili *kompaundirano uzbuđeni* istosmjerni motori ili generatori i njihove se vanjske karakteristike jako mijenjaju ovisno o postotnom udjelu serijske uzbude u ukupnom protjecanju, i o tome potpomaže li serijska komponenta uzbude nezavisnoj, odnosno porednoj uzbudi ili im se suprotstavlja.

Ima, dakako, i drugih mogućnosti kombiniranja složeno uzbuđenih strojeva, od dva, tri ili više uzbudnih namota, no četiri vrste o kojima je bilo riječi su osnovne.

Radi jednostavnosti često se skraćuje naziv vrste stroja. Na primjer, umjesto nezavisno uzbuđeni ili nezavisno spojeni generator kaže se, kratko, nezavisni generator. Tako se, posebno u govoru, čuje: serijski motor, kompaundirani generator itd. Dakle, svojstvo spoja namota stroja prenosi se na sam stroj. To je, dakako, dopušteno samo onda kad to ne može dovesti do zabune.

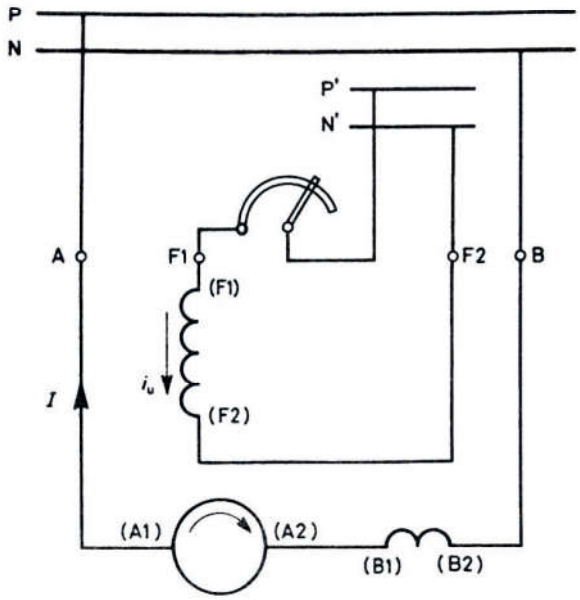
6.2. Osnovne vrste istosmjernih strojeva

Za bolje uočavanje svojstava pojedinih vrsta istosmjernih strojeva dobro je međusobno uspoređivati razne vrste generatora i razne vrste motora. Zato ćemo poći tim putem.

6.2.1. Nezavisno uzbuđeni (nezavisni) generator

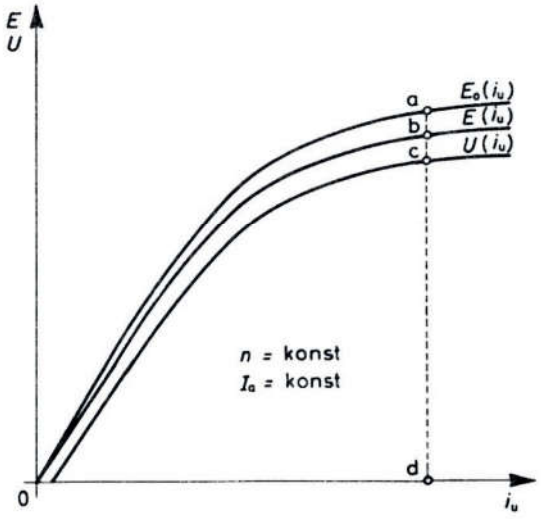
Osnovnu shemu spoja prikazuje slika 1. Iz posebnog izvora P′N′ napajan je preko promjenljivog otpornika uzbudni namot kojeg su stezaljke označene s (F1) i

(F2). Generator proizvodi struju, koja iz armature sa stezaljkama (A1) i (A2) teče pomoćnim polovima sa stezaljkama (B1) i (B2) i mrežom PN. Karakteristiku



Sl. 1. Nezavisno uzbuđeni generator (s pomoćnim polovima, bez kompenzacije)

praznog hoda takva generatora prikazuje na slici 2. krivulja $E_0(i_u)$. Pri nekoj određenoj vrijednosti uzbude iznosit će $E_0 = \overline{ad}$. Kad poteče struja u armaturi I_a (neka to bude, recimo, nazivna struja I_{an}), reakcija armature ruši inducirani

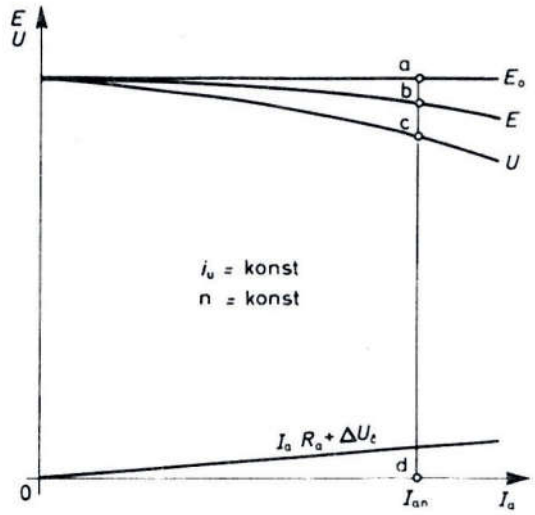


Sl. 2. Karakteristika napona ovisno o uzbudnoj struji za nezavisno uzbuđeni generator

napon na vrijednost krivulje $E(i_u)$, pa je za promatranu točku $E = \overline{bd}$, jer je gubitak zbog reakcije armature jednak $\overline{ab}$. Pad napona u stroju zbog struje u armaturi bit će:

$$\Delta U = I_a R_u + \Delta U_č,$$

pa na stezaljkama ostaje napon predočen krivuljom $U(i_u)$. U promatranoj točki uzbude je to U = cd jer je iznos pada napona ΔU = bc. Na slici 3. nacrtana je vanjska karakteristika nezavisno uzbuđenog generatora uz istu uzbudnu struju



Sl. 3. Vanjska karakteristika $U = f(I_a)$ nezavisno uzbuđenoga generatora

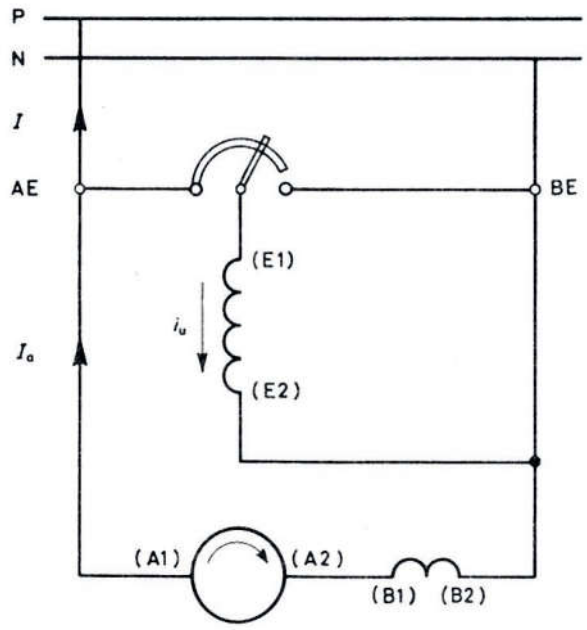
kao kod prikaza na slici 2. Uz konstantnu uzbudnu struju i konstantnu brzinu vrtnje karakteristika $U(I_a)$ blago pada. Kod vrijednosti I_{an} označene su istim oznakama E_o, E i U kao i na prijašnjoj slici. Vanjska karakteristika nezavisno uzbuđenog generatora vrlo je *tvrda*, što znači da se napon generatora malo mijenja s promjenom opterećenja. (Na sl. 2. i 3. promjene i padovi napona crtani su pretjerano veliki da bi se dobila zornija predodžba.) Nezavisno uzbuđeni generator ima najtvrđu vanjsku karakteristiku od svih istosmjernih strojeva koji su uzbuđeni samo jednim uzbudnim namotom. Logična je posljedica toga da on ima i najveću struju kratkog spoja. Povećava li se struja armature preko nazivne (dalje od točke c na sl. 3, na kojoj je razlika napona $E_o - U$ crtana pretjerano velikom, pa je stvarni napon U veći), počinje napon, zbog pojačanog djelovanja reakcije armature, naglije opadati do vrijednosti U = O. To je točka kratkog spoja kad $U(I_a)$ siječe apscisnu os, tj. kad se sav inducirani napon E troši na pad napona $I_{ak}R_u + \Delta U_č$. U produžetku slike 3. sjekle bi se u točki kratkog spoja krivulje označene s E i $I_a R_u + \Delta U_č$. Svako preopterećenje strujom uzrokuje pregrijavanje namota stroja, pa skraćuje njegov životni vijek. Za izmjenične strojeve bila su ipak dopuštena čak i znatna kratkotrajna preopterećenja. Kod istosmjernih strojeva preopterećenja su mnogo riskantnija, zbog opasnosti od kružne vatre na kolektoru, koja nastupa zbog otežane komutacije. Tu činjenicu treba imati uvijek na umu prilikom projektiranja ili iskorištavanja istosmjernih strojeva u području višemu od nazivnih struja.

6.2.2. Poredno uzbuđeni (poredni) generator

Slika 4. prikazuje spoj porednoga istosmjernog generatora. Uzbudni namot sa stezaljkama (E1) i (E2) priključen je na stezaljke (A1) i (A2) armaturnog napona, pa je uzbudno protjecanje proporcionalno naponu što ga proizvodi generator.

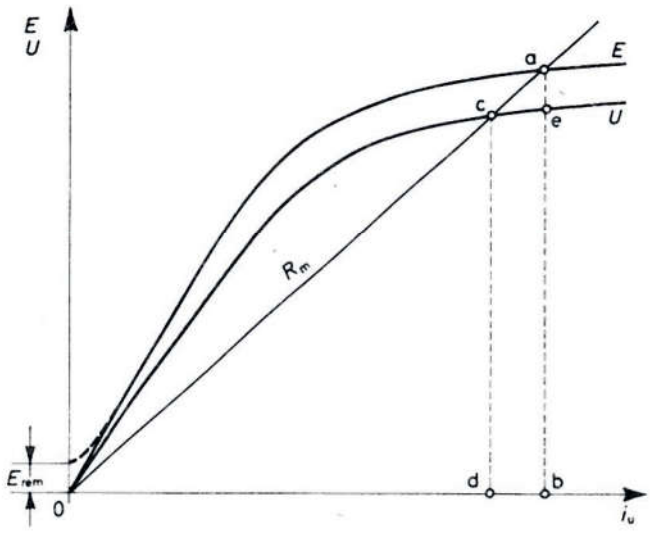
Prema tome struja I_a, koju proizvodi generator pri opterećenju nekim teretom, dijeli se na struju tereta I i struju uzbude i_u, tako da vrijedi:

$$I = I_a - i_u. \tag{1}$$



Sl. 4. Poredno uzbuđeni generator (s pomoćnim polovima, bez kompenzacije)

Da se lakše shvate odnosi, razmotrimo stanje uzbuđenoga porednog generatora u praznom hodu. Na slici 5. nacrtana je karakteristika praznog hoda $E(i_u)$. U uzbudnom krugu generatora spojeni su u seriju radni otpor uzbudnog



Sl. 5. Karakteristika napona ovisno o uzbudnoj struji i pravac samouzbude porednoga generatora

namota i otpor za podešavanje prema slici 4. Neka njihov iznos bude R_m. Narine li se na taj uzbudni krug bilo kakav napon U, poteći će njime struja i_u. Po Ohmovu zakonu bit će:

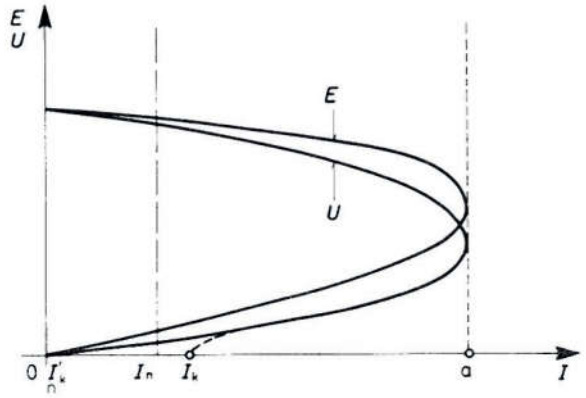
$$R_m = \frac{U}{i_u},$$

tj. omjer napona i struje je konstantan, a to je pravac označen s R_m na slici 5. Taj pravac zovemo pravcem samouzbude. Sjecište tog pravca s karakteristikom $E(i_u)$ daje nam radnu točku generatora u praznom hodu, pa dužina $\overline{Ob}$ predočuje uzbudnu struju, a $\overline{ab}$ inducirani napon E (pri tome smo zanemarili činjenicu da armaturom teče uzbudna struja, koja je relativno mala, pa će i opadanje krivulje E biti neznatno). Opteretimo li generator nekom strujom, recimo nazivnom strujom I_{an}, dobivamo na slici 5. krivulju $U(i_u)$, a radnu točku predočuje tad novo sjecište $\overline{c}$ te krivulje s pravcem samouzbude. Napon generatora pri tome bit će dužina $\overline{cd}$. Vidimo da se napon U smanjio prema induciranom naponu E za iznos veći od $\overline{pad}$ova napona, i to zato jer se smanjila i uzbudna struja od iznosa $\overline{Ob}$ na iznos $\overline{Od}$. To se dogodilo upravo zbog smanjenja napona generatora, a na njega je uzbudni namot priključen. Za naponsko stanje generatora mjerodavan je, dakle, samo pravac samouzbude.

Pažljivom čitaocu vjerojatno nije izmaklo iz vida da smo odmah pretpostavili razvijenu krivulju $E(i_u)$, tj. uzbuđen stroj, iako nije jasno kako se došlo do tog stanja. Počnemo li, naime, vrtjeti neuzbuđen stroj, prema krivulji $E(i_u)$ nema nikakva napona na stezaljkama (A1) i (A2) armature i ne može poteći nikakva struja uzbudnim krugom. To se stanje realno ostvaruje i svakome novom stroju, koji još nije bio uzbuđivan. Tad treba stezaljkama (E1) i (E2) (sl. 4) generatora koji se vrti privesti neki vanjski izvor napona (akumulator, džepna baterija). Mala struja, koja poteče nakon priključivanja spomenutih izvora, stvori neki mali tok, a on neki mali napon na stezaljkama (A1) i (A2). Tad će taj mali napon potjerati kroz uzbudni namot dodatnu struju, ona će pojačati tok koji će povisiti napon na stezaljkama (A1) i (A2) itd. – tj. proces samouzbuđivanja teče dalje sve dok se postigne sjecište pravca samouzbude s karakteristikom stroja. Vanjski izvor služi samo za davanje impulsa, pa ga treba brzo skinuti sa stezaljki (E1) i (E2), na kojima napon zbog samouzbuđivanja naglo raste. Za drugo i daljnja puštanja u rad nije više potreban vanjski izvor napona kao davač impulsa. Nakon prekida rada magnetski tok neće pasti potpuno na nulu, nego na neku određenu (malu) vrijednost. Taj magnetski tok zovemo remanentnim magnetskim tokom jer on zaostaje u magnetskom krugu zbog remanencije željeza. On je dovoljan da, bez ikakve struje u uzbudnom namotu, inducira u generatorskoj armaturi *remanentni napon* E_{rem} (vidi sl. 5), koji započinje proces samouzbuđivanja. Dovoljno je samo zavrtjeti generator. Krivulja $E(i_u)$ ne polazi u općem slučaju iz ishodišta, nego je njezin početak zbog djelovanja remanencije negdje u blizini ishodišta (vidi na sl. 5. crtkano izvučenu liniju).

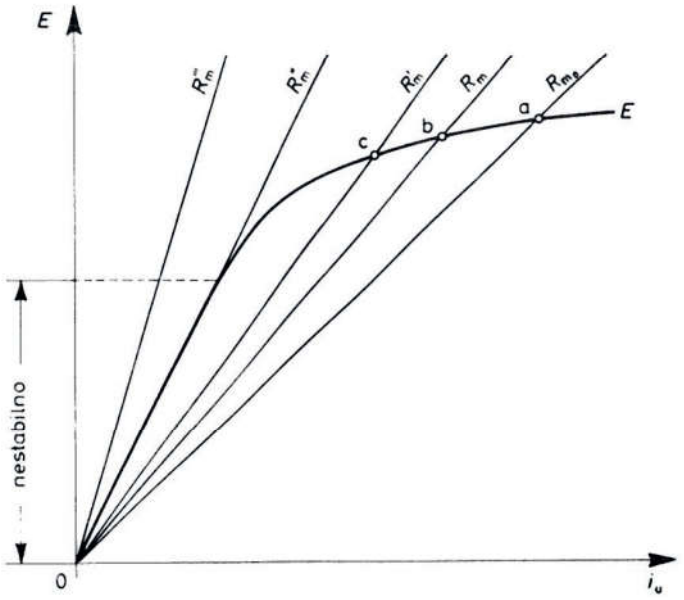
Vanjska karakteristika porednoga generatora u području pogonskih opterećenja (od $I = 0$ do $I \doteq 1{,}5\ I_n$) vrlo je slična vanjskoj karakteristici nezavisno uzbuđenoga generatora (vidi sl. 3), pa je nećemo posebno crtati. Napon se uzbude pri tim teretima neznatno mijenja, pa odatle ta sličnost. Ipak je vanjska karakteristika porednoga generatora nešto *mekša* od one nezavisnoga, jer s porastom struje opada uzbudni napon (armaturni napon). Pri znatnijim porastima struje, a osobito kad se već približavamo kratkom spoju, situacija je posve drukčija. Razmotrimo tu pojavu na osnovi slike 5. S porastom struje krivulja $U(i_u)$ sve više opada prema krivulji $E(i_u)$. Pri nekom određenom iznosu struje

linearni dio krivulje $U(i_u)$ poklopit će se s pravcem samouzbude. To fizikalno znači da se generator naglo razbuđuje. Cijelu pojavu prikazuje slika 6, koja predočava potpunu vanjsku karakteristiku porednoga generatora. Pri struji koja odgovara točki a ruši se napon pa krivulje $E(I)$ i $U(I)$ teku po donjim *granama* karakteristika. U kratkom spoju bila bi idealna struja kratkog spoja (na sl. 6. označena s I'_k) jednaka nuli, što je i logično jer je tad napon stezaljki armature jednak nuli, pa je i uzbudna struja jednaka nuli. Ali, budući da u stanju bez uzbudne struje vlada na stezaljkama armature remanentni napon E_{rem}, on će potjerati struju kratkog spoja I_k. Na slici 6. označena je ta struja, a crtkana linija predočuje stvarni oblik krivulje $U(I)$. Struja kratkog spoja ovisi samo o visini remanentnog napona. Poredni generator ima, prema tome, relativno malu struju kratkog spoja.



Sl. 6. Vanjska karakteristika porednoga generatora

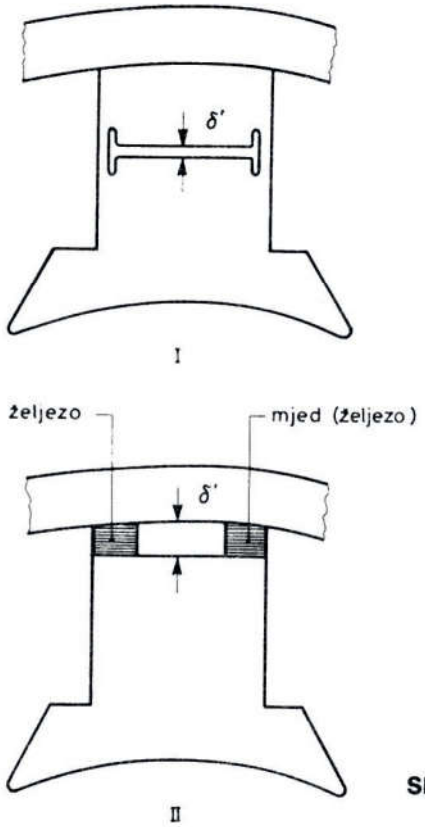
Opisana pojava posljedica je problema stabilnosti naponske karakteristike porednoga generatora. Budući da je pojam stabilnosti važan za svojstva porednog generatora, ovdje ćemo ga načelno obraditi. Na slici 7. prikazana je karakteristika praznog hoda porednog generatora. Ukupni otpor uzbudnog kruga dade se podešavati promjenljivim otporom (vidi sl. 4). Ako je vrijednost promjenljivog otpora jednaka nuli (isključen, tj. kratko spojen!), neka pravac R_{mo} bude pravac samouzbude sa sjecištem u točki a na slici 7. Uključimo li dio promjenljivoga



Sl. 7. Karakteristika praznog hoda porednoga generatora s ucrtanim pravcima samouzbude

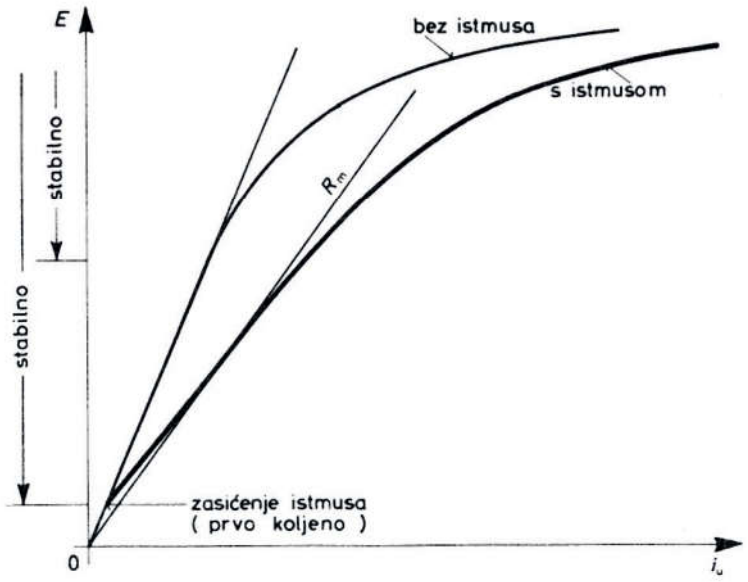
otpora, pravac samouzbude povećava nagib te s položaja R_{mo} prelazi u položaj R_m sa sjecištem u točki b. Sjecišta s karakteristikom E, dakako, karakteriziraju radnu točku. Daljnjim uključivanjem otpora dobivamo pravce samouzbude R'_m sa sjecištem u točki c. Povećamo li otpor do iznosa R''_m, vidimo da pripadni pravac R''_m nema određenog sjecišta s karakteristikom praznog hoda. Pogon je labilan, nema određenog napona, tj. napon može biti proizvoljan na liniji dvaju pravaca koji se poklapaju, pa se kod najmanjeg opterećenja ruši na nulu. Kod daljnjeg povećanja otpora, do npr. veličine R'''_m, stroj se potpuno razbuđuje. Proizlazi zaključak: ukupni otpor u uzbudnom krugu ne smije dati strmiji nagib pravcu samouzbude od nagiba karakteristike praznog hoda na nezasićenom dijelu, jer se inače poredni generator ne može uopće uzbuditi.

Daljnja je posljedica upravo opisanog fenomena u tome što poredni generator uopće neće raditi na nezasićenom (linearnom) dijelu karakteristike praznog hoda, tj. nestabilan je u velikom dijelu svoga naponskog opsega (vidi sl. 7). U mnogim praktičkim primjerima pogona gdje želimo upotrijebiti poredni generator (npr. kao uzbudnik sinhronoga generatora ili većega nezavisnog istosmjernoga generatora), taj nam nedostatak znatno smeta. On se može ispraviti na račun snage stroja, tj. može se povećati područje stabilnosti napona. Napravi li se negdje u magnetskom krugu stroja *magnetski tjesnac*, tj. mjesto gdje nastaje zasićenje željeza već uz male iznose magnetskog toka, pojavit će se osim već poznatog *koljena* zasićenja još i *drugo koljeno zasićenja*, ali znatno bliže ishodištu. Taj se tjesnac obično izvodi na polu, a nazivamo ga *istmus* prema poznatome morskom tjesnacu Isthmusu u Grčkoj. Na slici 8. dvije su uobičajene izvedbe istmusa. U



Sl. 8. Izvedba istmusa

prvoj se izvede prorez u polnoj jezgri takve širine da je presjek željeza na tom mjestu jako smanjen, pa zasićenje nastupa već pri vrlo malome magnetskom toku. U drugoj izvedbi podlažu se uski čelični limovi između pola i jarma, kako to prikazuje slika 8, koji se zasite već pri malome magnetskom toku. Karakteristika praznog hoda se ne mijenja od ishodišta do prvog koljena izazvanoga istmusom. Na prvom koljenu karakteristika se naglo savija (zbog istmusa) i dalje teče linearno kao da je zračni raspor stroja povećan za iznos δ'. Na slici 9. prikazana je



Sl. 9. Karakteristike praznog hoda dvaju jednakih porednih generatora, od kojih jedan ima istmus

karakteristika praznog hoda dvaju jednakih strojeva, od kojih jedan ima normalne polove, a drugome su polovi s istmusom. Jasno se uočava koliko se područje stabilnog rada povećava uz upotrebu istmusa, jer pravac samouzbude siječe krivulju praznog hoda već pri niskim vrijednostima napona. Evidentno je, dakako, da se i težina stroja mora povećati za jednaku snagu jer se za stroj s istmusom uz jednaku struju uzbude dobiva manji napon (manja snaga) stroja.

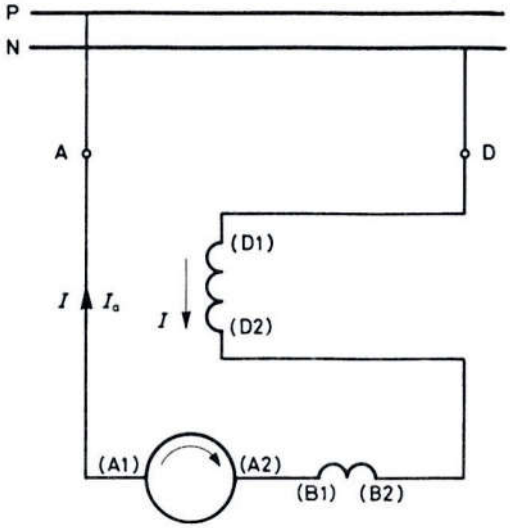
6.2.3. Serijski uzbuđeni (serijski) generator

Osnovni spoj serijski uzbuđenoga generatora prikazuje slika 10. Uzbudni namot na glavnim polovima sa stezaljkama (D1) i (D2) spojen je u seriju s namotom armature i namotom pomoćnih polova. Ukupni otpor serijskoga generatora (izuzevši prelazni otpor četkica) jednak je zbroju unutrašnjeg otpora R_u prema ranijoj definiciji i otpora uzbudnog namota R_m.

Armaturna struja serijskoga generatora ujedno je i uzbudna struja, a jednako tako i struja tereta, tj. $I_a = i_u = I$.

Uvjeti uzbuđivanja serijskoga generatora slični su onima u porednoga generatora. Razlika je u tome što je porednom generatoru uzbudna struja ovisila o

naponu U generatora na koji je bio priključen uzbudni namot, a serijskom generatoru ona ovisi o induciranom naponu E kao posljedici rezultantnoga magnetskog toka. Inducirani napon E tjera u radnom, odnosno glavnome



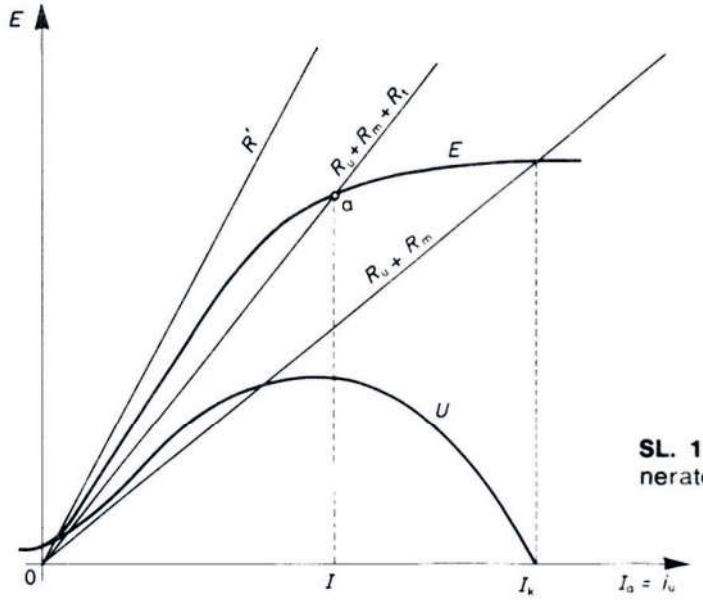
Sl. 10. Serijski generator (s pomoćnim polovima bez kompenzacije)

strujnom krugu stroja struju I, koja ovisi o ukupnom otporu strujnog kruga $R_s = R_u + R_m + R_t$, gdje je R_t otpor tereta. Budući da je glavni strujni krug stroja ujedno i uzbudni, jer je $I_a = i_u = I_t$, to je pravac samouzbude određen ukupnim otporom u strujnom krugu, tj. s R_s, a radna točka sjecištem karakteristike $E(I)$ i pravca samouzbude, jer vrijedi:

$$E = I(R_u + R_m + R_t) = IR_s.$$

Inducira li struja serijskoga generatora inducirani napon E u namotu armature (vidi sl. 11), te kad se od E odbiju padovi napona u samom stroju, dobiva se napon na stezaljkama generatora $U(i_u) = U(I_a) = U(I)$.

Istražimo zatim vanjsku karakteristiku. Pri nazivnoj brzini vrtnje u praznom hodu ($R_s = \infty$) ne teče nikakva struja, nema uzbude, pa na stezaljkama vlada samo remanentni napon. U kratkom spoju ($R_s = R_u + R_m$) teče struja I_k pri



SL. 11. Vanjska karakteristika serijskoga generatora

naponu stezaljki $U = 0$, jer se cijeli inducirani napon E potroši na padove napona u stroju (vidi sl. 11). S nešto većim teretom (R_t = malo!) mijenja se pravac samouzbude (sjecište a na slici), strojem teče struja I uz napon koji je jednak $U = E - I(R_m + R_u)$. Rezultat je vanjska karakteristika $U(I)$, kako je nacrtana na slici 11. Lako je uvidjeti da serijski generator nije pogodan za obavljanje osnovne generatorske funkcije, tj. za proizvodnju napona približno konstantna iznosa pri raznim opterećenjima.

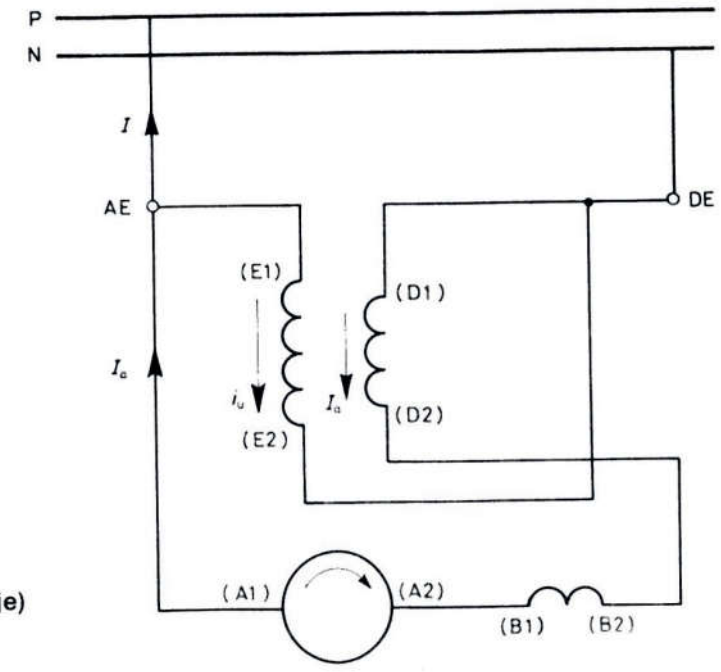
Prvi nedostatak serijskoga generatora je mijenjanje napona pri promjeni struje I između vrijednosti nula i neke maksimalne. Drugi mu je nedostatak u tome što se uopće ne može opteretiti malim teretom. Da bi uopće došlo do uzbude, mora *strmina* otpora $R_m + R_u + R_t$ biti manja od nagiba funkcije $E(I)$. Kod malo većeg iznosa R_t (vidi pravac R' na slici) serijski se generator uopće neće uzbuditi!

Iz tih se razloga serijski generatori, osim u posve specijalnim namjenama, uopće ne upotrebljavaju.

Prilikom puštanja u rad serijski generatori pokazuju iste nedostatke kao poredni. Potreban im je remanentni napon da se uopće uzbude, a ako ga nema, valja se opet pomoći impulsom iz vanjskog (pomoćnog) izvora.

6.2.4. Složeno uzbuđeni (kompaundirani) generator

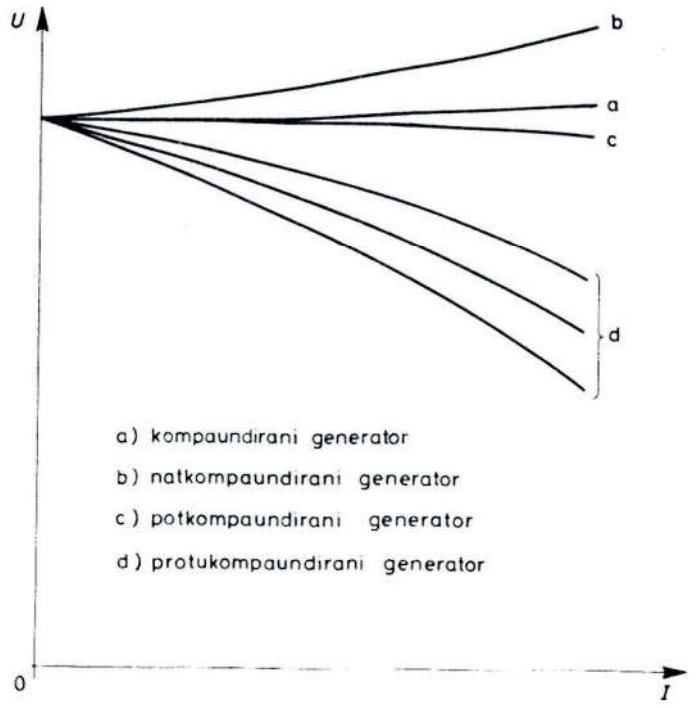
Pod pojmom složene uzbude istosmjernoga generatora u širem smislu zamišljamo uzbudu kombiniranu od dva (ili više) izvora spojena na dva (ili više) odvojena namota. No, u užem smislu, pod pojmom složeno uzbuđenog ili kompaundiranoga generatora zamišljamo generator s porednom (ili nezavisnom) i serijskom uzbudom na glavnim polovima. Pri tome su moguće dvije osnovne varijante. Prvoj serijska uzbuda potpomaže poredni, kao što je to kod generatora spojenoga prema slici 12. U drugoj varijanti serijska uzbuda ruši poredni, a spoj bi bio sličan onome na slici 12, samo s obratno priključenim stezaljkama (D1) i (D2).



Sl. 12. Kompaundirani generator (s pomoćnim polovima, bez kompenzacije)

I u prvoj varijanti ima nekoliko mogućnosti izvedbe.

a) Serijska uzbuda upravo je tolika da pokriva gubitke napona nastale zbog reakcije armature i zbog padova napona. Tad je napon približno konstantan od praznog hoda do nekog iznosa tereta (struje). Takav generator zovemo *potpuno kompaundirani* ili (samo) *kompaundirani* generator, pa on ne treba regulatora napona. Vanjska karakteristika mu je prikazana krivuljom a na slici 13.



Sl. 13. Vanjske karakteristike kompaundiranoga generatora

b) Serijska uzbuda jača je od one u prethodnom primjeru pa dobivamo *natkompaundirani* generator. Njegov napon raste s teretom, što je obično nepoželjno. Vanjsku karakteristiku prikazuje krivulja b na slici 13.

c) *Potkompaundirani* generator nastaje kad serijska uzbuda samo djelomično kompenzira padove napona i gubitke napona nastale zbog reakcije armature. Tad napon blago pada s teretom, što se vidi iz krivulje c na slici 13.

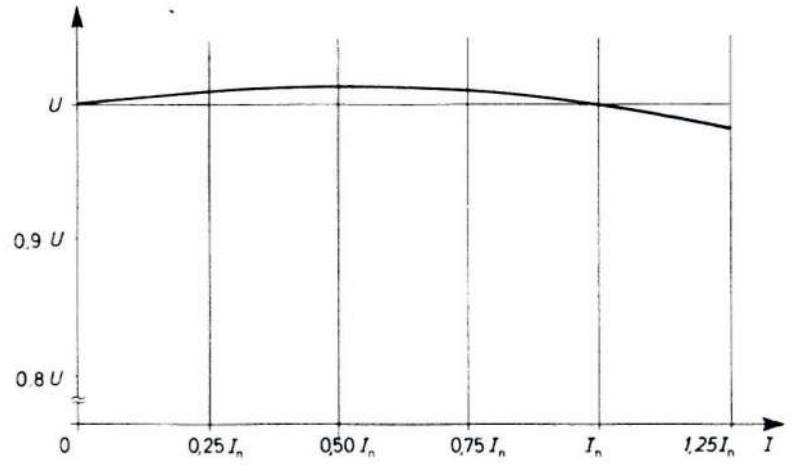
U drugoj varijanti, tj. u primjeru kompaundiranoga generatora kojem je serijska uzbuda suprotna porednoj, napon se naglije ruši, vanjska karakteristika je *mekana* i biva to mekša što je postotni udio serijske uzbude veći. Vanjska karakteristika takva *protukompaundiranoga* generatora predočena je karakteristikama d na slici 13. Protukompaundirani generator služi obično za rješenje pogona u nekom sklopu s motorom, kad pogon zahtijeva takvu karakteristiku izvora kakva je njegova vanjska karakteristika. Za napajanje mreže s više potrošača taj spoj generatora ne dolazi u obzir.

Za praktičku upotrebu ima posebnu vrijednost kompaundirani generator s praktički konstantnim naponom (krivulja a na sl. 13). Idealno bi bilo kad bi

njegova vanjska karakteristika u području primjene ($0-1{,}3I_n$) bila pravac, tj. kad mu se u tom području uopće ne bi mijenjao napon. Za to bi morala biti ispunjena tri uvjeta:

- radna točka bi se morala nalaziti na lienarnom dijelu krivulje praznog hoda (ili magnetiziranja);
- utjecaj reakcije armature na pad napona morao bi biti linearno proporcionalan struji tereta;
- moralo bi biti mogućnosti podešavanja omjera broja zavoja uzbudnih namota, tako da kompenzacija padova napona zbog svih uzroka bude potpuna.

Da se ispune spomenuti uvjeti, a osobito prvi i drugi, morao bi se graditi znatno veći i skuplji stroj od onoga koji bi normalno zadovoljio bez tih uvjeta. Zato se dopuštaju manja odstupanja napona unutar radnog područja stroja, a kompaundacija se tako podesi da se nazivni napon postigne u dvije točke – u točki praznog hoda ($I = 0$) i, obično, u točki nazivnog tereta ($I = I_n$). Onda vanjska karakteristika, u povećanom mjerilu za napon, izgleda kako je prikazuje slika 14.



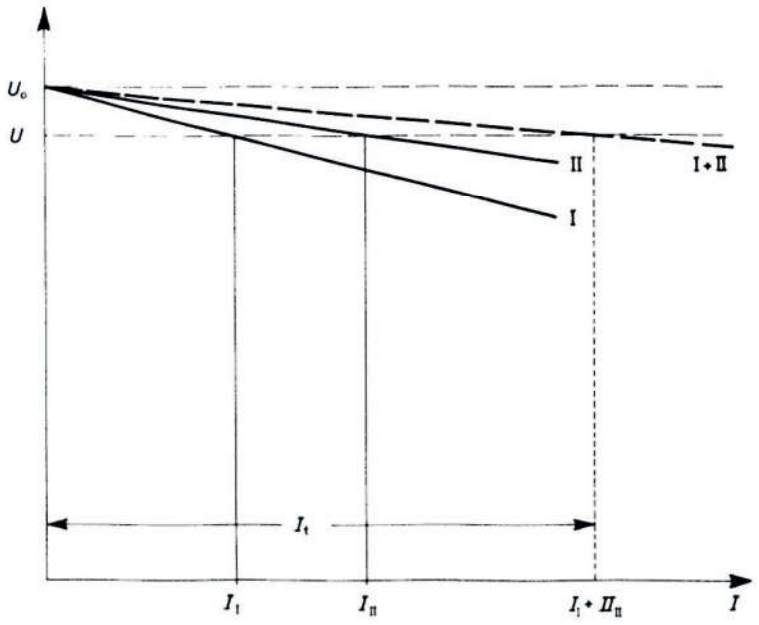
Sl. 14. Uobičajena vanjska karakteristika kompaundiranoga generatora za napajanje autonomne mreže

Takvi se kompaundni generatori danas dosta upotrebljavaju za napajanje manjih istosmjernih mreža (brodovi i slično).

6.2.5. Paralelni rad istosmjernih generatora

Napajaju li dva (ili više) poredno ili nezavisno uzbuđena generatora zajedničku mrežu ili potrošač, nastaje pitanje kako će se podijeliti teret među njima. Pri tome polazimo uvijek od pretpostavke da su im naponi u praznom hodu jednaki. Napon na sabirnicama mreže koju napaja paralelna kombinacija ne-

zavisno ili poredno uzbuđenih generatora, pada s opterećenjem, ali je tako sniženi napon jednak na svakome mjestu sabirnica, a prema tome i na stezaljkama generatora. To znači da apsolutna promjena (pad) napona mora biti jednaka na svim generatorima. Zato će generatori s tvrdom vanjskom karakteristikom uzimati postotno veće opterećenje jer trebaju postotno veću struju da bi u njima nastala promjena napona koja je nastupila u mreži ili na sabirnicama. Generatori s mekšom vanjskom karakteristikom preuzet će postotno manje opterećenje jer već postotno manja struja izaziva u njima promjene napona karakteristične za zajedničku mrežu (sabirnice). Za primjer je na slici 15. nacrtan dijagram paralelnog rada dvaju po snazi jednakih poredних generatora. Vanjska karakteristika prvoga označena je s I (meka karakteristika), a drugoga s II (tvrda karakteristika). Zajednička vanjska karakteristika (vanjska karakteristika mreže) odgovara zbroju tih dviju pojedinačnih (vidi spomenutu sliku), a ucrtana je crtkano i označena s I + II. Predstavlja li ukupno opterećenje struja $I_t = I_I + I_{II}$, koja je jednaka ukupnoj struji što je generatori zajednički daju u mrežu, onda na prvoga otpada struja I_I, a na drugoga struja I_{II}. Tvrđi je onaj generator koji je uzeo više tereta.



Sl. 15. Vanjska (zajednička) karakteristika dvaju istosmjernih (nezavisno ili poredno) uzbuđenih generatora u paralelnom radu

Prema dosad iznijetome, dobro iskorištenje poredних i nezavisnih generatora u paralelnom radu ostvaruje se samo kad su im vanjske karakteristike približno slične, tj. ako uz opterećenje nazivnom strujom imaju približno jednake promjene (padove) napona. Ako to nije tako, tj. ako su velike razlike u tvrdoćama vanjskih karakteristika generatora, ne može se u potpunosti iskoristiti ukupna snaga koju generatori mogu razviti za napajanje zajedničke mreže. Već uz dio te ukupne snage koja bi mogla biti na raspolaganju, opterećuje se generator s najtvrđom

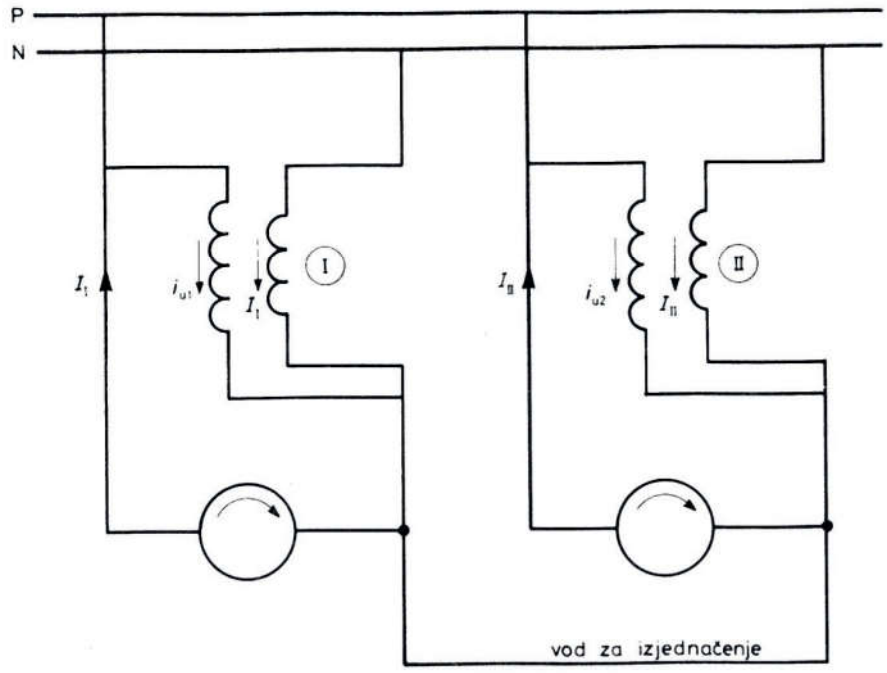
vanjskom karakteristikom sa 100% tereta, a generatori s mekšom karakteristikom tek su djelomično opterećeni. Poveća li se teret, preoptereti se taj najtvrđi generator, a ostali imaju još rezerve u snazi. Budući da se takvo opterećenje ne smije dopustiti trajno ili dulje vremena, takav je pogon zapravo ograničen na dio ukupne snage. Osobito je neugodno kad u paralelnom radu generator male snage ima tvrdu karakteristiku, a generatori veće snage mekanu. Mali generator pri tome može biti preopterećen i uz snagu mreže koja je čak i manja od one većega generatora. Takav je pogon moguć tek uz osoblje koje stalno nadzire rad i promjenom uzbude raspodjeljuje opterećenje na pojedine generatore, ili ako ima automatska regulacija za tu raspodjelu tereta.

Potrebno je još nešto reći o tome kako zapravo treba shvaćati pojam vanjske karakteristike u paralelnom radu. Na osnovi izlaganja, recimo, o nezavisno uzbuđenim generatorima, zamišljamo njihovu vanjsku karakteristiku uz pretpostavku da se brzina vrtnje generatora ne mijenja s opterećenjem, tj. da je konstantna (vidi sl. 3, karakteristika E_0). To vrijedi kad pogonski stroj generatora ima regulator koji održava konstantnu brzinu vrtnje. Za manje generatore to redovito nije tako, pa brzina vrtnje pogonskog stroja i generatora pada s opterećenjem. Po osnovnoj jednadžbi $E = k'_e \Phi_g n$ pada i inducirani napon, a onda, dakako, i napon na stezaljkama još i zbog tog opadanja brzine vrtnje. Pod opterećenjem je, upravo zbog toga, napon na stezaljkama generatora manji nego što to pokazuje vanjska karakteristika kojom se ne uzima u obzir promjena brzine vrtnje. To dodatno smanjenje napona linearno je proporcionalno opadanju brzine vrtnje. Kad govorimo o paralelnom radu, onda pod pojmom vanjske karakteristike uvijek zamišljamo vanjsku karakteristiku s promatranim utjecajem promjene brzine vrtnje ili uz utjecaj *statike* pogonskog stroja, gdje statikom nazivamo tvrdoću ovisnosti brzine vrtnje pogonskog stroja o teretu $n = f(M)$, tj. o momentu generatora.

Dosad je bilo riječi o paralelnom radu porednih i nezavisnih generatora. U paralelnom radu kompaundiranih generatora, koji je danas mnogo češći (brodska centrala), nailazi se na veće teškoće nego u ostalih generatora. Prikažimo problem na jednostavnom primjeru. Neka zajedničku mrežu napajaju dva potpuno jednaka kompaundirana generatora s potpuno jednakim pogonskim strojevima, tako da svaki daje pola ukupne struje. Neka, iz bilo kojeg razloga, a može ih biti vrlo mnogo, prvi od njih u jednom trenutku u mrežu dade neznatno jaču struju od drugoga. To će povećanje struje neznatno ojačati i njegovu serijsku uzbudu, pa će mu i napon neznatno porasti te on preuzima daljnji dio tereta, tj. daje još veću struju, pri čemu se još jače uzbudi, još mu jače poraste napon itd. Istodobno napon drugoga generatora pada jer mu opada njegova serijska uzbuda zbog smanjenja struje, koja mu opada na račun toga što teret preuzima prvi generator. Taj proces (prelazna pojava) ide sve dotle dok se prvi generator toliko preuzbudi, a drugi toliko razbudi, da prvi preuzme cijeli teret i još potjera drugoga kao motor. Takav je paralelni rad već u osnovi nestabilan. On bi se mogao ostvariti bez tih nedostataka uz pomoć automatskih regulatora, ali se upravo kompaundirani generatori odabiru s namjerom da se izbjegne upotreba regulatora u osnovnoj funkciji održavanja konstantnog napona.

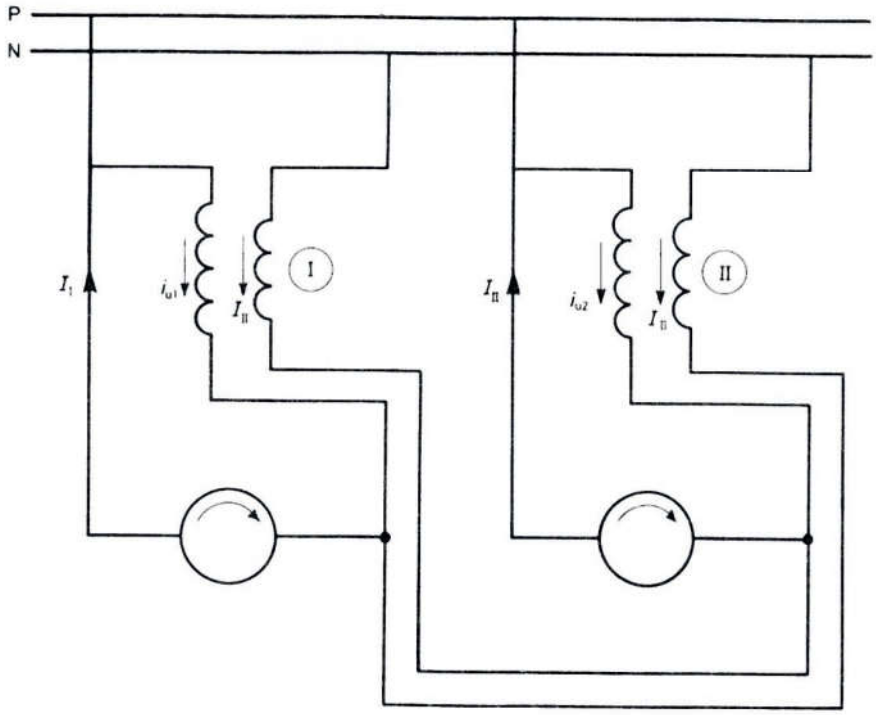
Drugi način kojim izbjegavamo upravo promatranu nestabilnost paralelnog rada kompaundiranih generatora, jest posebna izvedba stroja i poseban način međusobnog spajanja. Koristimo se dvjema mogućnostima.

Prva je u tome da se izvede spoj s *vodom za izjednačenje* struja kroz serijski namot oba generatora. Takav je spoj na slici 16. Kvaliteta paralelnog rada pri tome ovisi o otporu voda za izjednačenje; kad je otpor tog voda jednak nuli (teorijski slučaj), serijske su uzbude jednake, pa je paralelni rad optimalan. Uz konačnu vrijednost navedenog otpora mogu se uzbude razlikovati, a razlika će biti to veća što je otpor veći. Što se uzbude mogu više razlikovati, utoliko je veća mogućnost nejednolikog opterećenja generatora. Budući da je otpor serijskoga uzbudnog namota sam po sebi malen, jer serijski namot redovno ima malo zavoja velikog presjeka, to i vod za izjednačenje mora biti velikog presjeka i uz to kratak, kako bi imao dovoljno maleni otpor. Posljedica je toga da generatori moraju biti smješteni blizu jedan drugome, redovno u zajedničkoj prostoriji. Nije, dakle, moguće napajati takvu mrežu iz raznih udaljenih pojnih točaka.



Sl. 16. Paralelni rad kompaundiranih generatora s vodom za izjednačenje

Druga mogućnost je rad u takozvanome *križnom spoju*, koji je predočen na slici 17. Osnovna je zamisao tog spoja da struja jednoga generatora daje serijsku uzbudu drugome. Poteče li prvim generatorom veća struja nego drugim, porast će uzbuda (a onda i napon) drugom generatoru, pa tad on nastoji potjerati veću struju. Taj spoj odlično drži ravnotežu u paralelnom radu kompaundiranih generatora. Jedini mu je nedostatak u tome što i on zahtijeva da generatori budu u istoj prostoriji, dakle dovoljno blizu zbog spojnih vodova i gubitaka koje oni zahtijevaju.

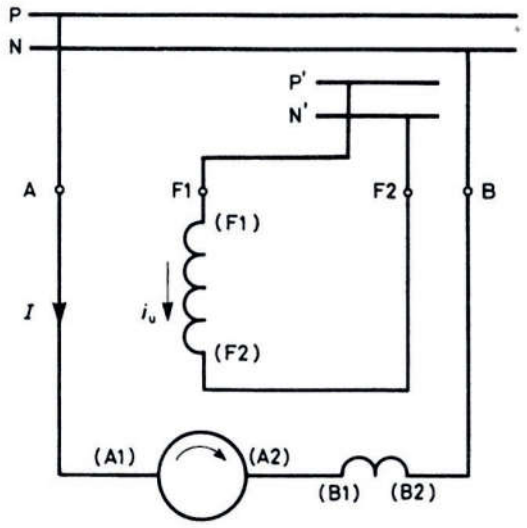


Sl. 17. Paralelni rad kompaundiranih generatora u križnom spoju

6.2.6. Nezavisno uzbuđeni (nezavisni) motor

Spojna shema nezavisno uzbuđenog motora prikazana je na slici 18. Uzbudnim namotom s oznakama (F1) i (F2) teče uzbudna struja iz posebnog izvora P′N′ i stvara glavni tok motora Φ_{gl}. Stezaljke su armature priključene na glavnu mrežu PN, što napaja motor strujom I koja s glavnim tokom daje moment vrtnje.

Vanjsku karakteristiku nezavisno uzbuđenog motora, tj. međusobnu ovisnost brzine vrtnje n i momenta vrtnje M koje razvija motor, možemo istražiti



Sl. 18. Nezavisno uzbuđeni motor (s pomoćnim polovima, bez kompenzacije)

razmatranjem osnovne relacije o induciranju napona u motoru. To osnovno razmatranje vrijedi za sve istosmjerne motore bez obzira na spoj. Za inducirani napon u istosmjernom stroju već smo pokazali da vrijedi $E = k'_e \Phi_{gl} n$, gdje je $k'_e = \frac{p}{a} \frac{z}{60}$, tj. k'_e = konstanta stroja. Prema tome, osnovni zakon vrtnje u stacionarnom stanju, uz bilo koje opterećenje, glasi:

$$n = \frac{1}{k'_e} \frac{E}{\Phi_{gl}}.$$

Pri tome je Φ_{gl} glavni magnetski tok uspostavljen uzbudom, a on uz konstantnu uzbudnu struju ovisi, kad je motor opterećen, još samo o reakciji armature. Inducirani napon E je u idealnome praznom hodu jednak naponu mreže. Pod opterećenjem određen je uvjetom ravnoteže u strujnom krugu armature, i to II Kirchhoffovim zakonom. Budući da je napon mreže (po pretpostavci!) konstantan (U = konst.), to u stacionarnom radu stroja, tj. pri ustaljenoj struji armature, mora inducirani napon motora biti:

$$E = U - I_a R_u - \Delta U_č.$$

Tako definirani Φ_{gl} i E određuju brzinu vrtnje motora. Može se ukratko reći da se, pri određenome magnetskom toku definiranim ukupnom uzbudom, istosmjerni stroj mora vrtjeti takvom brzinom da u strujnom krugu armature i mreže bude zadovoljen II Kirchhoffov zakon. To je najopćenitiji zakon, a vrijedi i za prelazna stanja, tj. kad se struja mijenja, ali s tim da za takav najopćenitiji slučaj u gornjoj jednadžbi dolazi još član $L \frac{dI_a}{dt}$, gdje je L induktivitet namota u armaturnom krugu stroja. Prilikom utvrđivanja vanjske karakteristike ne zanimaju nas prelazna stanja, pa je uz konstantnu struju I_a II Kirchhoffov zakon točno izražen prethodnom formulom. Možemo, dakle, pisati:

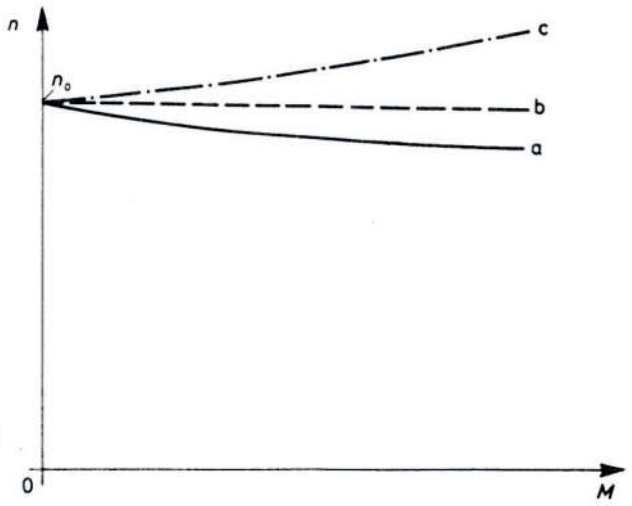
$$n = \frac{1}{k'_e} \frac{U - I_a R_u - \Delta U_č}{\Phi_{gl}}, \tag{2}$$

što vrijedi za sve istosmjerne motore.

Razmotrimo situaciju za nezavisno uzbuđeni motor spojen po shemi prema slici 18. Ako je motor 100% kompenziran, tok Φ_{gl} ostaje nepromijenjen, bez obzira na struju armature, pa onda i bez obzira na moment stroja ($M = k_m \Phi_{gl} I_a$), jer je struja potpuno proporcionalna momentu. Naprotiv, kad poraste struja rastu i padovi napona, pa se s povećanjem struje (odnosno momenta) postepeno smanjuje brojnik izraza (2), tj. za električku ravnotežu potrebni inducirani napon E. Budući da padovi napona čine relativno mali postotak napona U, to brzina vrtnje blago opada s porastom momenta. Kvalitativno vanjska karakteristika odgovara krivulji a na slici 19.

Ako pretpostavimo da je riječ o djelomično kompenziranom motoru ili motoru bez kompenzacijskog namota (to je većinom tako), onda se i tok mijenja s opterećenjem; on opada. Odmah se vidi da će vanjska karakteristika biti tvrđa od prijašnjeg slučaja kompenziranog motora, tj. da će ležati iznad krivulje a u slici

19. Njezin tok će ovisiti o tome pada li brže glavni magnetski tok Φ_{gl} ili potrebni inducirani napon E ovisno o struji. Ako glavni magnetski tok opada brže (jaka reakcija armature, nepovoljno pomaknute četkice itd.), kvalitativni oblik vanjske karakteristike prikazuje krivulja c na slici 19. To je nepovoljno, jer brzina vrtnje

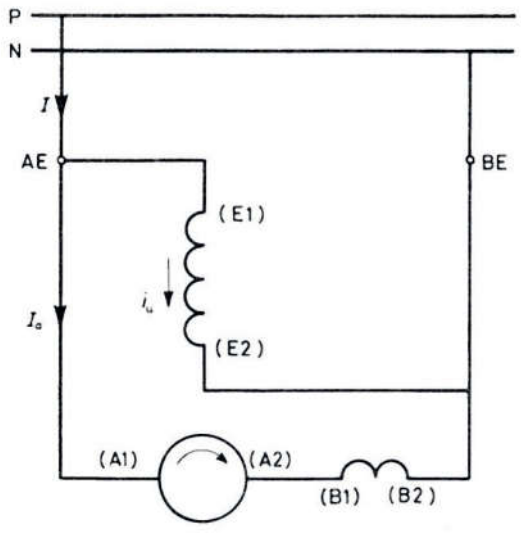


Sl. 19. Vanjska karakteristika nezavisnog i porednog motora

raste s opterećenjem, pa je to nestabilni motor. Opada li glavni magnetski tok Φ_{gl} s porastom tereta podjednako kao inducirani napon E, dobivamo konstantnu brzinu vrtnje bez obzira na teret. Taj granični slučaj stabilnosti predočuje krivulja b na slici 19. Kad magnetski tok opada sporije od induciranog napona E, leži vanjska karakteristika nezavisnog motora između krivulja a i b na slici 19; takvoj karakteristici u većini slučajeva težimo prilikom izgradnje stroja jer ona znači stabilan rad motora.

6.2.7. Poredno uzbuđeni (poredni) motor

Shema spoja porednog motora prikazana je na slici 20. Da dođemo do vanjske karakteristike, usporedimo nezavisno i poredno uzbuđeni motor. Razlika između tih motora izražena je u načinu spoja uzbudnog namota. Porednu uzbudu s



Sl. 20. Poredno uzbuđeni motor (s pomoćnim polovima, bez kompenzacije)

oznakama (E1) i (E2) napaja ista mreža koja napaja i armaturni strujni krug, a za nezavisnu posebni je izvor za uzbudu. Ako je zajednička mreža porednog motora dovoljno kruta (a to uvijek za mrežu pretpostavljamo), onda nema fizikalne razlike u ponašanju nezavisnog i porednog motora. Za vanjsku karakteristiku porednog vrijedi, dakle, sve što je rečeno i za vanjsku karakteristiku nezavisnog motora, pa slika 19. u cijelosti odgovara i za poredni motor. Samo je jedna (i to formalna) razlika u gledanju na struje motora. Dok za nezavisni motor vrijedi da je struja iz mreže jednaka struji motora $I_m = I_a$, za poredni je motor struja iz mreže veća od struje u armaturi za iznos uzbudne struje tj., $I_m = I_a + i_u$.

6.2.8. Serijski uzbuđeni (serijski) motor

Slika 21. prikazuje shematski spoj istosmjernoga serijskog motora. Uzbudni i armaturni namoti spojeni su u seriju, što znači da teret određuje uzbudu, jer je struja armature ujedno i struja uzbude. Budući da za moment vrtnje svakog motora vrijedi:

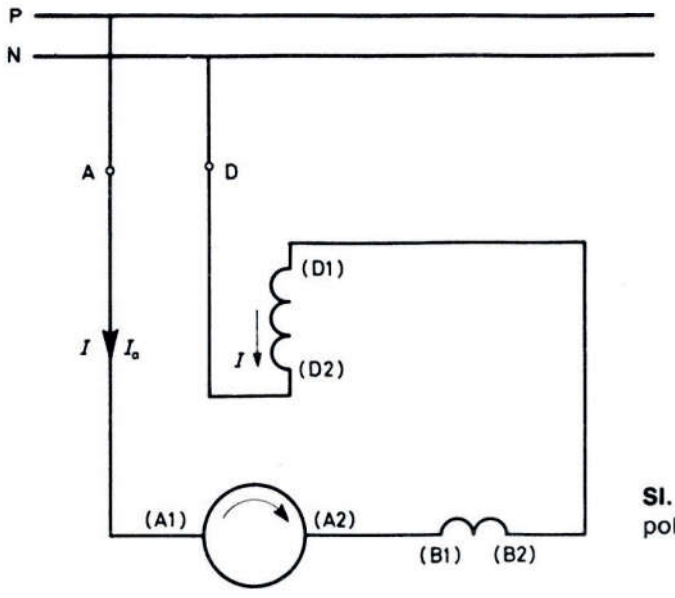
$$M = k_m \Phi_{gl} I,$$

a u serijskom je spoju *nezasićenog* motora glavni magnetski tok Φ_{gl} proporcionalan struji I, moment se serijskoga istosmjernog stroja može prikazati kao:

$$M = k' I^2. \tag{3}$$

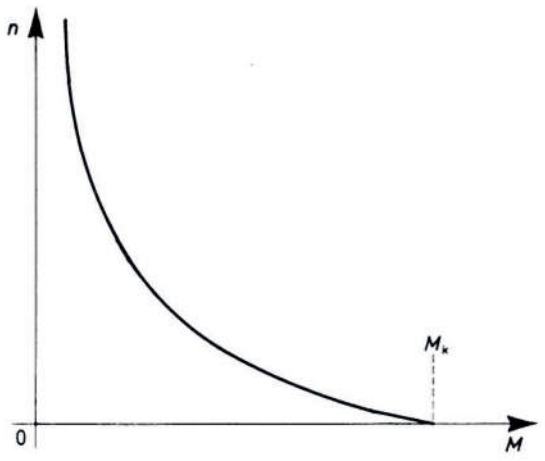
Iz izraza za brzinu vrtnje $n = \frac{1}{k'_e} \frac{E}{\Phi_{gl}}$ dobivamo za nezasićeni serijski motor da je $n = \frac{1}{k''} \frac{E}{I}$ ili, uz uvrštenje prethodnog izraza za moment (preko struje):

$$n = k_s \frac{E}{\sqrt{M}}. \tag{4}$$



Sl. 21. Serijski uzbuđeni motor (s pomoćnim polovima, bez kompenzacije)

Konstanta k_s sadržava sve konstante stroja koje su se u izvodu pojavile. Izraz (4) vrijedi, dakako, samo za one struje opterećenja koje, protječući uzbudnim namotom, još ne uzrokuju zasićenje stroja. U zasićenju taj izraz više ne vrijedi. Vanjsku karakteristiku serijskog stroja prikazuje slika 22, pa je ovisnost n o M izražena jednadžbom (4) do nekog iznosa momenta M, tj. sve dok je moment M proporcionalan kvadratu struje I^2. Pri većim opterećenjima stroja nastupa zasićenje, pa brzina vrtnje sporije, a uz potpuno zasićenje, linearno opada do stanja mirovanja (kratki spoj), kako se to na slici i vidi.



Sl. 22. Vanjska karakteristika serijskog motora

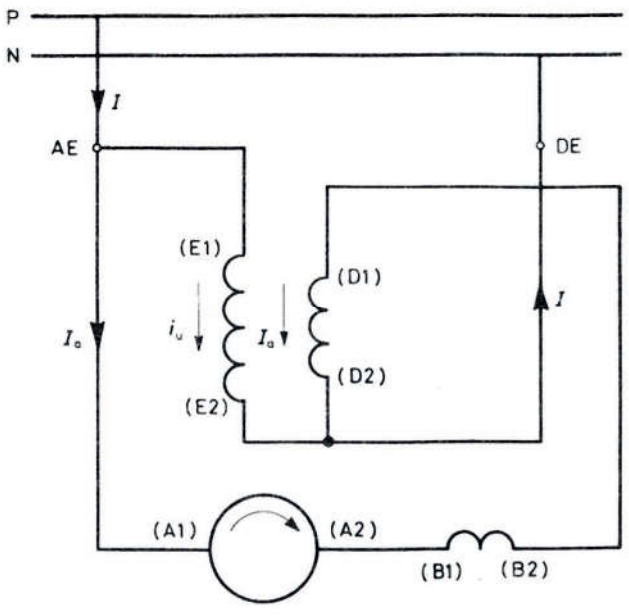
Za rad serijskoga istosmjernog motora posebno su zanimljiva stanja malih opterećenja ili čak stanje praznog hoda. Pri malim strujama malen je i glavni magnetski tok, pa brzina vrtnje naglo raste, što se može zaključiti i pomoću relacije (4). Rastereti li se motor na osovini dokraja, struja mu pada prema nuli, a brzina vrtnje mu raste (teorijski) prema beskonačnosti. Trenje u ležajima i trenje četkica po kolektoru pa i trenje zraka čine ipak neki moment opterećenja, a osim toga, zbog remanencije, magnetski tok neće poprimiti vrijednost nula jer i u stanju bez uzbude ostaje neki remanentni tok. Tako bi potpuno rasterećeni stroj postigao ipak neku (vrlo veliku) konačnu vrijednost brzine vrtnje – kad ne bi prije toga mehanički nastradao zbog golemih centrifugalnih sila koje rastu s kvadratom brzine vrtnje. Serijskome istosmjernom motoru ne smijemo, dakle, dopustiti da se rastereti preko neke određene granice, jer inače *pobjegne*, tj. brzina mu vrtnje postane veća od one za koju je konstruiran i građen. Taj *pobjeg* serijskoga istosmjernog stroja njegovo je prirodno svojstvo.

Pojam pobjega istosmjernog stroja nije vezan samo za serijski uzbuđen motor. I ostale vrste strojeva mogu pobjeći i doći u opasnost od uništenja rasprsnućem (prije svega kolektora i glavâ namota), ako samo nastupe prilike kad motor, zbog niske vrijednosti magnetskog toka, nastoji povećati brzinu vrtnje da razvije inducirani napon E koji uvjetuje narinuti napon. Ta situacija može nastupiti u svim strojevima povezano s kvarom na uzbudnom dijelu (spoj među zavojima ili prekid uzbudnog namota nezavisnog ili porednog stroja). Jaka reakcija armature ili neispravan položaj četkica također vode prema sličnoj situaciji.

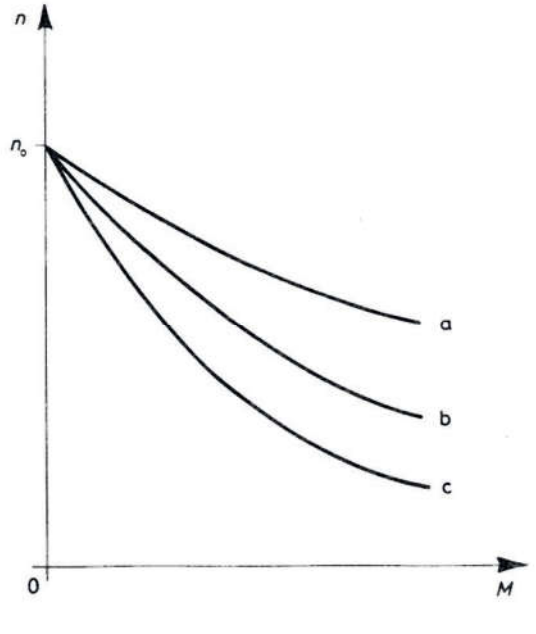
6.2.9. Složeno uzbuđeni (kompaundirani) motor

Uzbuda kompaundiranog motora sastoji se redovito od barem dva uzbudna namota, jednoga porednog (nezavisnog) i jednoga serijskog, slično kao u primjeru složeno uzbuđenoga generatora. Pri tome djelovanje serijskog namota gotovo uvijek potpomaže djelovanje porednog namota, pa je upotreba protukompaundiranog motora prava rijetkost. Osnovni spoj kompaundiranog motora prikazan je na slici 23. Protjecanje porednoga uzbudnog namota (E1) i (E2) istog je smisla kao i protjecanje serijskoga uzbudnog namota (D1) i (D2).

Vanjska karakteristika kompaundiranog motora pokazuje manju ili veću tvrdoću, tj. bliža je karakteristici porednog ili serijskog motora, već prema tome koliko koji od uzbudnih namota sudjeluje u stvaranju magnetskog polja. Ako je za nazivno opterećenje protjecanje poredne uzbude veće od onoga serijske uzbude, kompaundirani motor ima tvrđu karakteristiku, tj. bliži je po svojstvima porednom motoru. I obratno, nadvladava li serijska uzbuda porednu, kompaundirani motor ima mekšu karakteristiku, tj. sličniji je po svojstvima serijskome motoru. Kombinirajući razne omjere utjecaja pojedinih uzbuda, mogu se postići razne vanjske karakteristike (vidi sl. 24), pa se dade konstruirati motor koji se lako prilagođava zahtjevima pogona. Za razliku od serijskog motora, i teorijska brzina vrtnje kompaundiranog motora u praznom hodu je čvrsta i konačna. Na slici 24. označena je ta brzina s n_0. Nju određuje uzbuda porednog namota jer u praznom hodu nema serijske uzbude kompaundnog namota.



Sl. 23. Kompaundirani motor (s pomoćnim polovima, bez kompenzacije)



Sl. 24. Vanjske karakteristike kompaundiranog motora

6.3. Oznake stezaljki, smjer vrtnje i spajanje namota

Za ispravan rad istosmjernog stroja određene vrste i smjera vrtnje potrebno je da on bude ispravno priključen na mrežu, te da su ispravno međusobno spojeni namoti i svici u svakom namotu. Istosmjernom stroju valja razlikovati vanjske stezaljke, stezaljke namota i izvode svitaka. *Vanjske stezaljke* stoje na raspolaganju korisniku, a služe za spoj stroja s mrežom. *Stezaljke namota* su početak i kraj određenog namota, a potrebne su za međusobno spajanje namota unutar stroja. *Izvodi svitaka* su početak i kraj jednog svitka određenog namota, a služe za spajanje više svitaka u jedan namot.

6.3.1. Vanjske stezaljke i stezaljke namota

Pravila o jednoznačnom crtanju shema spoja namota i označavanju vanjskih stezaljki i stezaljki namota nastala su u praksi zbog potrebe jednoznačnog označavanja strojeva, i to kako prilikom spajanja strojeva u praksi tako i prilikom njihova prikazivanja na nacrtima i u literaturi. Danas se crtanje shema spoja i označavanje stezaljki obavlja prema preporukama IEC-a. Pri crtanju shema spoja namoti se armature, pomoćnih polova i kompenzacije crtaju u horizontali, a uzbudni namoti u vertikali i iznad oznake armature.

Vanjske stezaljke i stezaljke namota istosmjernih strojeva označavaju se velikim štampanim slovima, prema ovim pravilima:

a) Stezaljke nekog namota razlikuju se po broju dodanome iza slova namota (npr. namot pomoćnih polova B1, B2).

b) Namoti iste namjene koji imaju ista slova namota razlikuju se po broju dodanome ispred slova namota (npr. dio namota pomoćnih polova s jedne strane armature označava se s 1B1, 1B2, a s druge strane armature 2B1, 2B2).

c) Dva uzbudna namota imaju magnetsko djelovanje u istom smjeru kad u oba namota struja prolazi od stezaljke s nižim (višim) brojem dodanim iza slova namota k stezaljci s višim (nižim) brojem dodanim iza slova namota.

d) Magnetska polja namota pomoćnih polova i namota kompenzacije imaju ispravni polaritet jedno prema drugome i prema magnetskom polju namota armature, kad u tim namotima struja prolazi od stezaljke s nižim (višim) brojem dodanim iza slova namota k stezaljci s višim (nižim) brojem dodanim iza slova namota.

e) Ako se namot pomoćnih polova isprepleće s namotom kompenzacije (na svakome polnom koraku namot pomoćnih polova i kompenzacije spojeni su u seriju, a ne tek na priključnoj ploči), valja za oznake stezaljki namota upotrijebiti slovo C.

f) Oznake stezaljki namota su:

(A1)–(A2) – namot armature;

(B1)–(B2) – namot pomoćnih polova;

(1B1)–(1B2)
(2B1)–(2B2) } – podijeljeni namot pomoćnih polova;

(C1)–(C2) – namot kompenzacije ili namot pomoćnih polova isprepleten s namotom kompenzacije;

(1C1)–(1C2), (2C1)–(2C2) – podijeljeni namot kompenzacije ili podijeljeni namot kompenzacije isprepleten s namotom pomoćnih polova;

(D1)–(D2) – namot serijske uzbude;

(E1)–(E2) – namot poredne uzbude;

(F1)–(F2) – namot nezavisne uzbude.

Ako na stroju ima više namota nezavisne uzbude, označavaju se ovako:

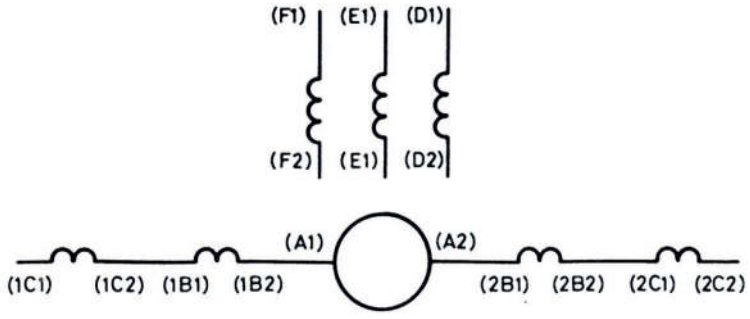
(F1)–(F2), (F5)–(F6) – namoti nezavisne uzbude za paralelni ili serijski spoj;

(1F1)–(1F2), (2F1)–(2F2) – dva odvojena namota nezavisne uzbude.

g) Vanjske stezaljke označavaju se slovima stezaljki namota. Ako se dva ili više namota spajaju na istu vanjsku stezaljku, njezina se oznaka uzima od oznake stezaljki namota koji su spojeni za nju, ali bez zagrade.

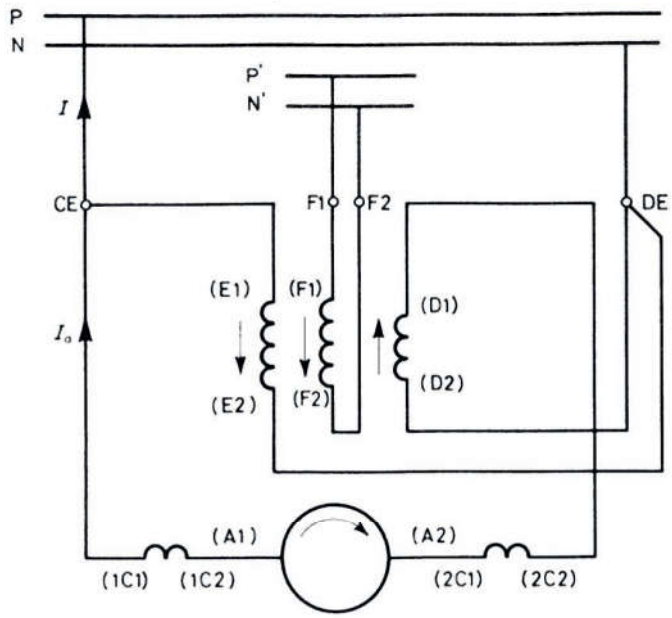
h) Za strojeve s desnim smjerom vrtnje stezaljka namota (A1) mora biti pozitivnog polariteta, a za strojeve s lijevim smjerom vrtnje stezaljka namota (A1) mora biti negativnog polariteta.

Na slici 1. prikazani su položaj i oznake stezaljki pojedinih namota za sve namote istosmjernog stroja (osim za stroj s više namota nezavisne uzbude) koji se mogu pojaviti pri crtanju shema spoja namota. Za konkretnu vrstu istosmjernog stroja crtaju se i međusobno spajaju samo određeni namoti i njihove stezaljke, te vanjske stezaljke. Sve su dosad nacrtane i označene sheme spoja, počevši od slike 6.2–1, označene na osnovi razloženih pravila označavanja, a odnose se na



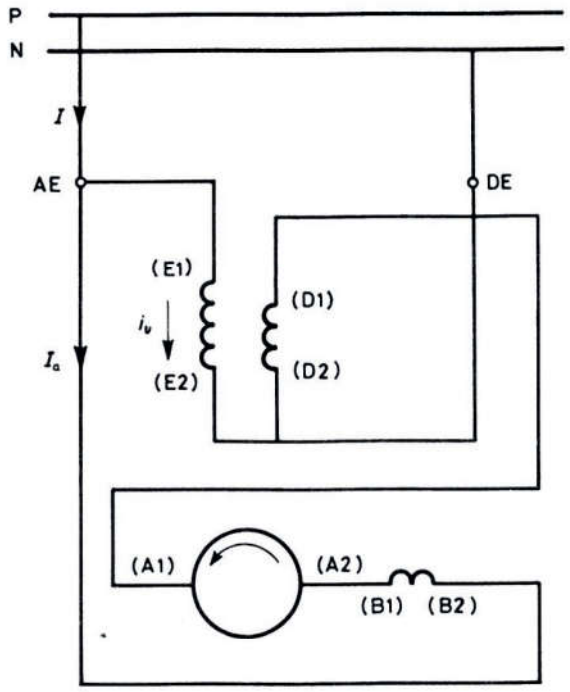
Sl. 1. Položaj i oznake stezaljki pojedinih namota istosmjernog stroja

nekompenzirane strojeve s desnim smjerom vrtnje i nepodijeljenim namotom pomoćnih polova. Na slici 2. nalazimo shemu spoja istosmjernoga generatora s mješovitom (nezavisnom, porednom i protuserijskom) uzbudom i podijeljenim namotom kompenzacije te s isprepletenim namotom pomoćnih polova za desni smjer vrtnje. Tako uzbuđen generator, bez obzira na namot kompenzacije i podijeljenost namota pomoćnih polova, naziva se Krämerov generator. Na slici 3. shema je spoja nekompenziranoga kompaundiranog motora s nepodijeljenim



Sl. 2. Shema spoja Krämerova generatora

pomoćnim polovima za lijevi smjer vrtnje. Usporedbom sheme spoja na slici 6.2–23, za desni smjer vrtnje, i sheme spoja na slici 3, za lijevi smjer vrtnje iste vrste motora, vidi se da za promjenu smjera momenta, a time i smjera vrtnje, treba promijeniti smjer struje u armaturi i pomoćnim polovima uz isti smjer struja u uzbudnim namotima.



Sl. 3. Shema spoja nekompenziranoga komapundiranog motora s nepodijeljenim namotom pomoćnih polova

6.3.2. Smjer vrtnje

Smjer vrtnje stroja određen je za sve električke strojeve kao smjer vrtnje koji se opaža gledanjem stroja s određene strane.

Ako stroj ima samo jedan kraj osovine (ili dva kraja osovine raznih promjera), smjer vrtnje je onaj koji se vidi gledanjem sa strane kraja osovine (ili sa strane kraja deblje osovine). Ako stroj ima dva kraja osovine istog promjera ili nema kraja osovine, položaj promatrača je:

a) na strani suprotnoj od kolektora ili kliznih koluta, ako su kolektor i/ili klizni koluti samo na jednoj strani stroja;
b) na strani kliznih koluta, ako stroj ima kolektor na jednoj, a klizne kolute na drugoj strani;
c) prema posebnom dogovoru u primjeru kad a) i b) nisu dovoljno jasni.

Desnim smjerom vrtnje (vrtnja udesno) nazivamo vrtnju u smjeru kretanja kazaljke na satu, a lijevim smjerom vrtnje (vrtnja ulijevo) ona u smjeru suprotnome kretanju kazaljke na satu.

6.3.3. Izvodi svitaka i stezaljke namota

U odjeljku 6.3.1. prikazan je princip crtanja shema spoja namota za zadanu vrstu istosmjernog stroja i smjer vrtnje, tj. međusobno spajanje stezaljki raznih namota i spajanje stezaljki namota na vanjske stezaljke stroja. Za potpuno spajanje istosmjernog stroja postavljaju se još tri pitanja. Prvo, kako treba međusobno spojiti svitke određenog namota statora da se dobiju stezaljke tog namota; drugo, u kakvu odnosu (položaju) mora biti taj namot statora prema drugim namotima statora; treće, kojeg su polariteta pojedine četkice i sabirni prstenovi (stezaljke namota armature) pomoću kojih se namot armature spaja s namotima statora.

Prije prikaza spajanja svitaka i određivanja stezaljki namota protumačimo u kojemu međusobnom odnosu (položaju) moraju biti svici namota uzbude i namota pomoćnih polova te kako se određuje polaritet četkica za nekrižanu i križanu izvedbu namota armature.

Za odabrani magnetski polaritet glavnih polova i radno stanje stroja (generator ili motor) određen je smjer struje u namotu armature, a s njime i smisao protjecanja armaturnog namota. Budući da protjecanje namota pomoćnih polova mora djelovati suprotno protjecanju namota armature, određen je time i potrebni

Smjer vrtnje		⟶
Redosljed magnetskih polariteta	generator	N – s – S – n – N
	motor	N – n – S – s – N

Sl. 4. Redoslijed magnetskih polariteta glavnih i pomoćnih polova za generatorski i motorski rad stroja

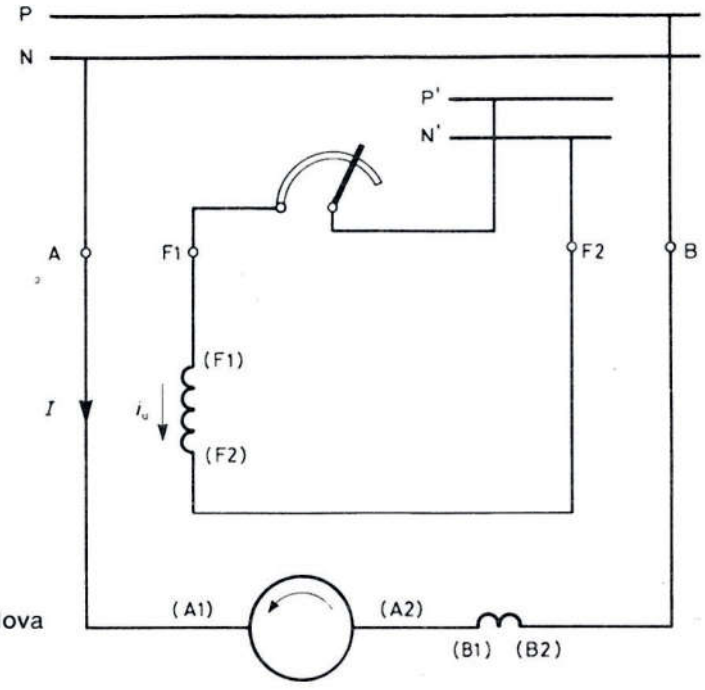
magnetski polaritet pomoćnih polova. U tablici na slici 4. prikazan je redoslijed magnetskih polariteta glavnih i pomoćnih polova u smjeru vrtnje za primjer generatorskog i motorskog rada stroja. Pri tome se oznake N i S odnose na (magnetski) sjeverni i južni polaritet glavnog pola, a n i s na sjeverni i južni polaritet pomoćnog pola.

Za dogovoreni magnetski polaritet glavnih polova i smjer vrtnje armature određen je, prema poznatim pravilima, smjer induciranog napona u vodičima armaturnog namota, a s njim i polaritet četkica ispod glavnih polova, i on se razlikuje za nekrižani i križani namot armature. U tablici na slici 5. pokazan je polaritet četkica ispod glavnih polova za određeni smjer vrtnje i izvedbu armaturnog namota.

izvedba namota armature	⊕ četkica ispod glavnog pola	⊖ četkica ispod glavnog pola	smjer vrtnje
nekrižan	S	N	
križan	N	S	
nekrižan	N	S	
križan	S	N	

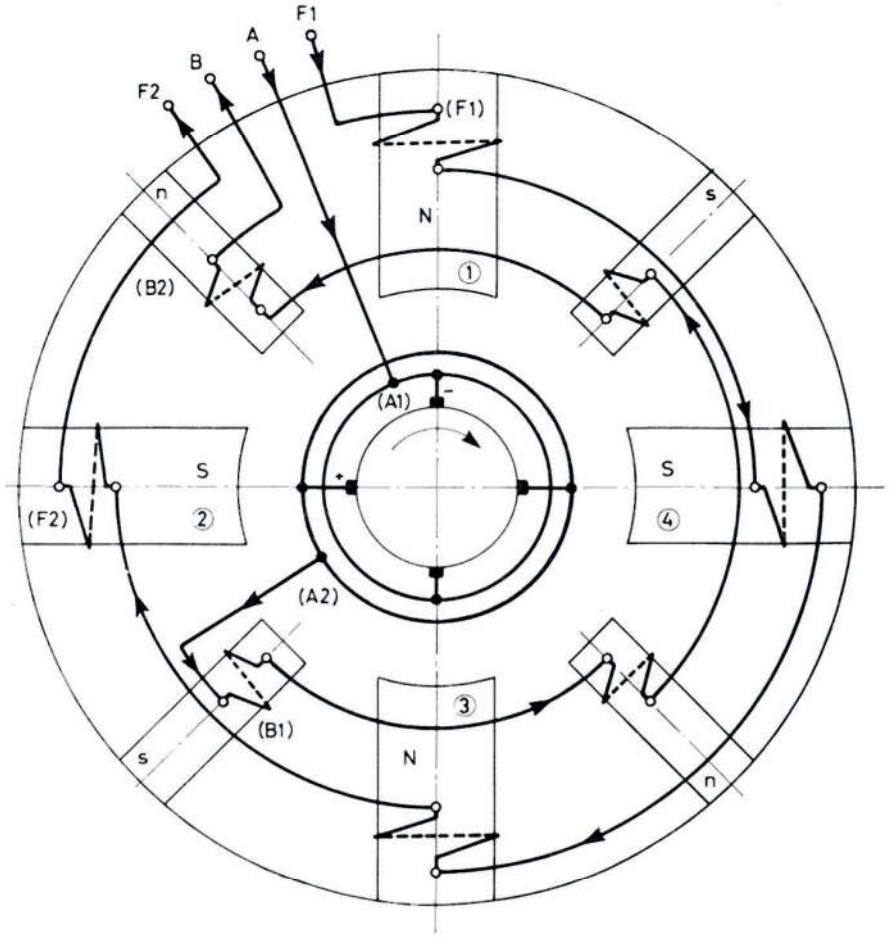
Sl. 5. Polaritet četkica ispod glavnih polova ovisno o smjeru vrtnje i izvedbi namota armature

Pravila spajanja svitaka namota statora i određivanje položaja stezaljki namota obrazložit ćemo na primjeru nekompenziranoga nezavisno uzbuđenoga generatora s neraspodijeljenim namotom pomoćnih polova i nekrižanim namotom armature, sve za lijevi smjer vrtnje. Shema spoja toga generatora je na slici 6, a



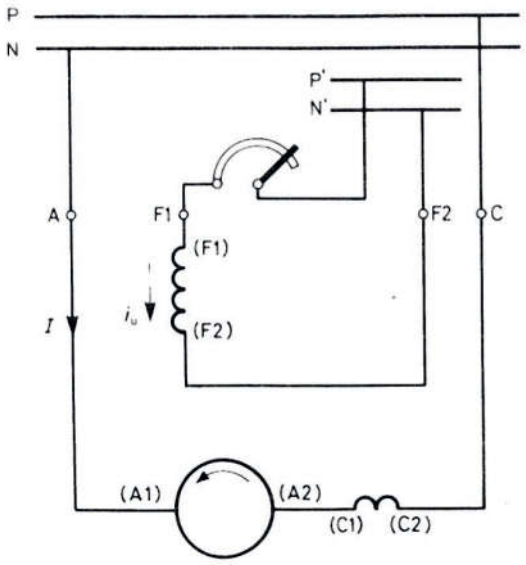
Sl. 6. Shema spoja nekompenziranoga nezavisno uzbuđenoga generatora s nepodijeljenim namotom pomoćnih polova

spajanje svitaka namotâ statora i određivanje položaja stezaljki namota na slici 7. Nacrtajmo geometrijski raspored glavnih i pomoćnih polova gledan sa strane kolektora, sa svicima određenog smjera namatanja (na sl. 7. nacrtan je desni smjer namatanja). Treba napomenuti da generator prema osnovnoj definiciji ima lijevi smjer vrtnje, ali u pogledu sa strane kolektora desni smjer vrtnje. Po volji odabiremo položaj N glavnog pola, a zatim ćemo pomoću tablice na slici 4, ovisno o radnom stanju stroja i smjeru vrtnje, odrediti redoslijed magnetskih polariteta glavnih i pomoćnih polova. Budući da magnetski tok N-pola izlazi iz polne papuče i ulazi u armaturu, možemo uz poznavanje smjera struje kroz pojedine namote (iz sheme na sl. 6) odrediti stezaljke namota (F1) i (B2) na koje ulazi struja. Položaj glavnog pola sa stezaljkom namota (F1) i pomoćnog pola sa stezaljkom namota (B2) valja odabrati u blizini priključne kutije stroja, radi manje dužine spojnih vodova. Zatim međusobno spajamo izvode svitaka ostalih polova (uzevši u obzir redoslijed magnetskih polariteta) sve do posljednjeg svitka, gdje dobivamo stezaljke namota (F2) i (B1). Prema izvedbi armaturnog namota i smjeru vrtnje, uz pomoć tablice na slici 5, naći ćemo električki polaritet četkica i stezaljke namota (A1) i (A2). Nakon toga spajamo stezaljke namota (A2) i (B1) prema shemi stroja na slici 6, te određujemo vanjske stezaljke A i B za armaturni strujni krug, te F1 i F2 za uzbudni strujni krug.



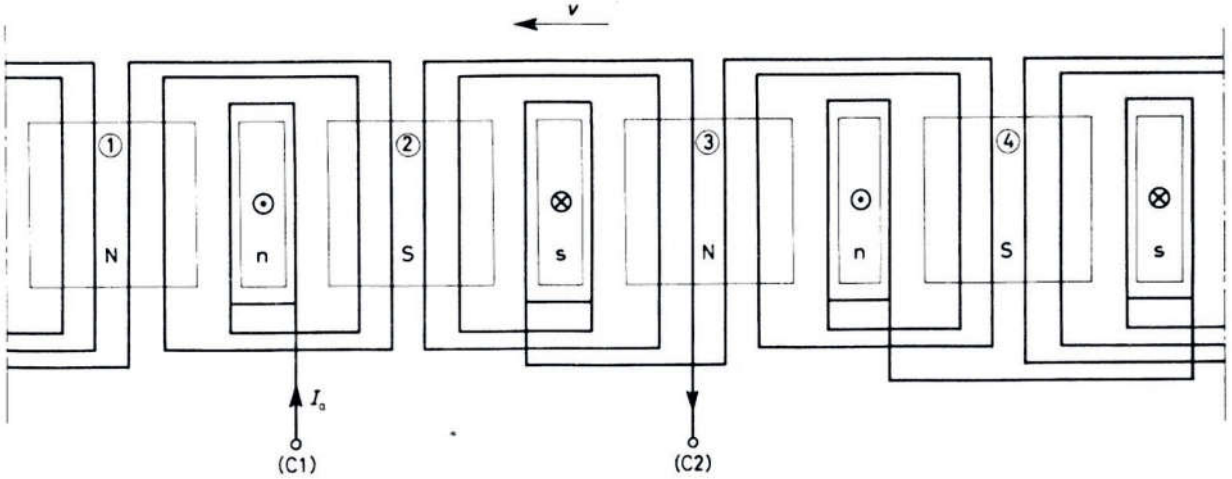
Sl. 7. Spoj svitaka pojedinih namota statora, položaj stezaljki namota i vanjskih stezaljki za generator na slici 6, gledan sa strane kolektora

Izložimo još spajanje svitaka statorskog namota i određivanje položaja stezaljki namota kompenziranoga nezavisno uzbuđenoga generatora s nepodijeljenim, ali isprepletenim namotom pomoćnih polova i kompenzacije, te nekrižanim namotom armature, sve za lijevi smjer vrtnje. Shema spoja toga generatora prikazana je na slici 8. Spajanje svitaka i položaj stezaljki namota uzbude (F1) i (F2) je jednako kao u prethodnom primjeru (vidi sl. 7), pa nije prikazano posebno.



Sl. 8. Shema spoja nezavisno uzbudenoga generatora s nepodijeljenim isprepletenim namotom pomoćnih polova i kompenzacije

Na slici 9. predočen je u ravninu razvijeni obod statora s pripadnim magnetskim polaritetom polova, pri čemu su oznake glavnih polova od 1 do 4 identične onima sa slike 7. Stezaljka namota (C2), na koju prema shemi sa slike 8. izlazi struja, odabrana je na pomoćnom polu u blizini priključne kutije, a svici namota pomoćnih polova i kompenzacije spajaju se tako da su međusobno isprepleteni svici ta dva namota. Nakon međusobnog spajanja svitaka svih polova dobivamo na posljednjem polu stezaljku namota (C1), koja služi za daljnje spajanje namota pomoćnih polova i kompenzacije sa stezaljkom armaturnog namota (A2).



Sl. 9. Spoj svitaka isprepletenog namota pomoćnih polova kompenzacije s položajem stezaljki namota za generator na slici 8.

6.3.4. Stara pravila o označavanju stezaljki

Opisani princip označavanja stezaljki, određivanja smjera vrtnje i crtanja shema spoja temelji se na preporukama IEC-a i upotrebljava se za sve novoizrađene istosmjerne strojeve. Prije tih preporuka IEC-a vrijedila su drukčija pravila, nazovimo ih *stara pravila*. Budući da se u eksploataciji nalazi velik broj istosmjernih strojeva sa starim oznakama, a neke ih tvornice i danas upotrebljavaju, potrebno se ukratko upoznati sa starim pravilima o označavanju stezaljki, određivanju smjera vrtnje i crtanju shema spoja.

U shemi spoja su se namoti armature i pomoćnih polova crtali u vertikali, a uzbudni namoti u horizontali i desno od armature. Kompenzacijski se namot nije posebno crtao, a ako je postojao, smatralo se da je uključen u oznaku namota pomoćnog pola. Pri tome se namot pomoćnih polova uvijek prikazivao tako da svojim protjecanjem djeluje nasuprot protjecanju armaturnog namota.

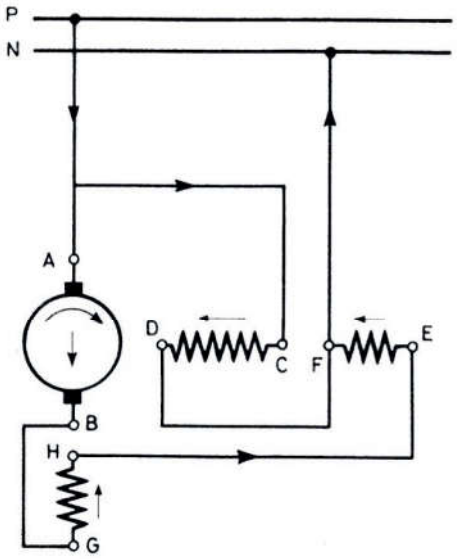
Smjer vrtnje stroja bio je određen kao smjer vrtnje gledan s pogonske strane. To znači da je smjer vrtnje generatora bio određen gledanjem sa strane pogonskog stroja (turbine, motora s unutrašnjim izgaranjem itd.), a smjer vrtnje motora gledanjem sa strane radnog mehanizma (ventilatora, kompresora, valjačkog stana itd.). Pri tome se desnim smjerom vrtnje nazivala vrtnja u smjeru kretanja kazaljke na satu, a lijevim smjerom vrtnje ona suprotna smjeru kretanja kazaljke na satu.

Vanjske stezaljke i stezaljke namota označavale su se velikim štampanim slovima, pa tako stezaljke namota na ovaj način:

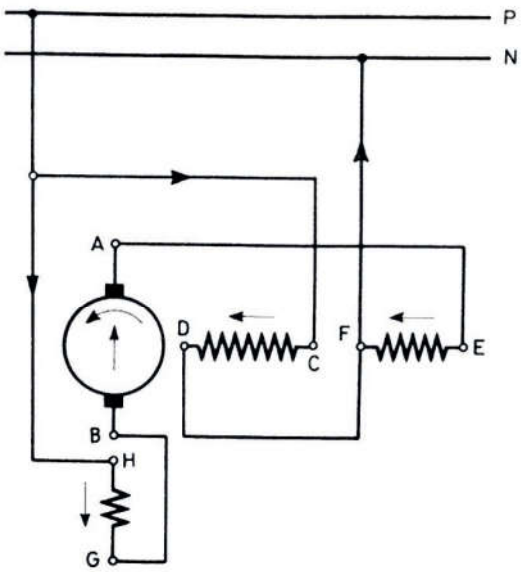
namot armature	slovima A i B
namot poredne uzbude	slovima C i D
namot serijske uzbude	slovima E i F
namot pomoćnih polova i kompenzacije	slovima G i H
namot nezavisne uzbude	slovima I i K.

Osim tako raspodijeljenih oznaka bilo je još potrebno znati kako se na jednom (bilo kojem) namotu određuju oznake s obzirom na smjer struje, jer su bile dvije mogućnosti (npr. A B ili B A). Za to također postoji čvrsto pravilo, koje se najlakše pamti u ovom obliku: Motoru s desnim smjerom vrtnje slijede oznake u smjeru toka struje abecednim redom, ali se pri tome moraju potpomagati magnetska djelovanja svih uzbudnih namota. Primjer takva spoja je kompaundirani motor shema kojega je prikazana na slici 10. Krećemo li se smjerom struje u bilo kojemu strujnom krugu, nailaze uvijek oznake abecednim redom. Za sve ostale strojeve možemo napraviti shemu i redoslijed na osnovi fizikalnih razlika prema stroju na koji se odnosi pravilo. Uzmimo za primjer kompaundirani motor s lijevim smjerom vrtnje, tj. isti stroj o kome govori pravilo, samo sa suprotnim smjerom vrtnje. Da se promijeni smjer momenta, a s njime i smjer vrtnje, treba promijeniti smjer struje u armaturi i pomoćnim polovima uz isti smjer struje u uzbudnim namotima. Slika 11. sadrži taj primjer. Ako pratimo smjer struje u uzbudnim namotima, oznake ostaju u abecednom redoslijedu, a oznake namota

armature i pomoćnih polova dolaze suprotno abecednom redoslijedu. Za daljnji primjer uzmimo Krämerov generator. Taj je generator prikladan za primjer jer ima sve tri vrste uzbudnih namota, pri čemu je djelovanje serijskoga suprotno zajedničkom djelovanju poredneg i nezavisnog namota. Neka Krämerov generator



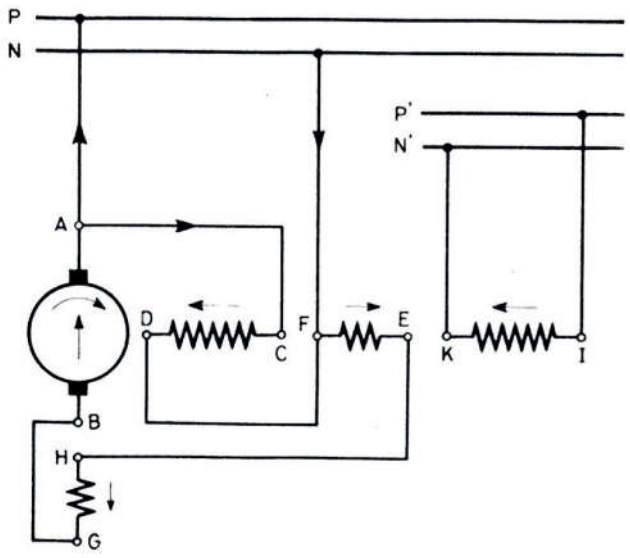
Sl. 10. Shema spoja kompaundiranog motora za desni smjer vrtnje prema starim pravilima o označavanju



Sl. 11. Shema spoja kompaundiranog motora za lijevi smjer vrtnje prema starim pravilima o označavanju

ima desni smjer vrtnje. Tad prema motoru desnog smjera vrtnje valja promijeniti smjer struje u armaturnom krugu uključivši i smjer struje u serijskome uzbudnom namotu, jer on djeluje suprotno porednom i nezavisnom uzbudnom namotu. Oznake na spoju moraju, dakle, izgledati kao na slici 12.

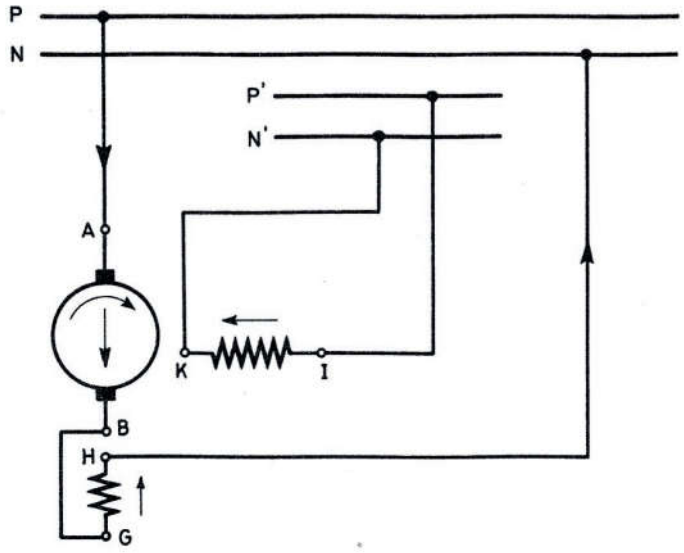
Shemu spoja porednog motora dobivamo ako na shemi spoja sa slike 10. izostavimo serijski uzbudni namot E-F, a serijski motor ako na slici 10. izostavimo



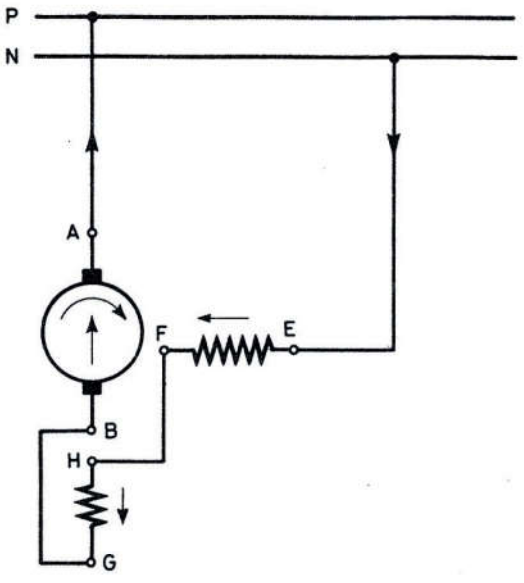
Sl. 12. Shema spoja Krämerova generatora prema starim pravilima o označavanju

poredni uzbudni namot C-D. Shema spoja nezavisno uzbuđenog motora prikazana je na slici 13.

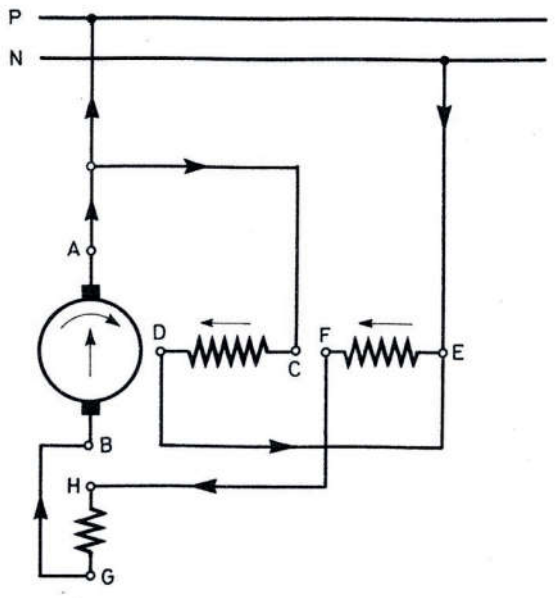
Shemu spoja porednoga generatora dobivamo ako na shemi spoja sa slike 12. izostavimo namot nezavisne uzbude I-K i serijske uzbude E-F, a nezavisno uzbuđeni generator ako na shemi spoja sa slike 12. izostavimo namot poredne uzbude C-D i serijske uzbude E-F. Shema spoja serijskoga generatora prikazana je na slici 14, a kompaundiranoga generatora na slici 15.



Sl. 13. Shema spoja nezavisno uzbuđenog motora prema starim pravilima označavanja



Sl. 14. Shema spoja serijskoga generatora prema starim pravilima označavanja



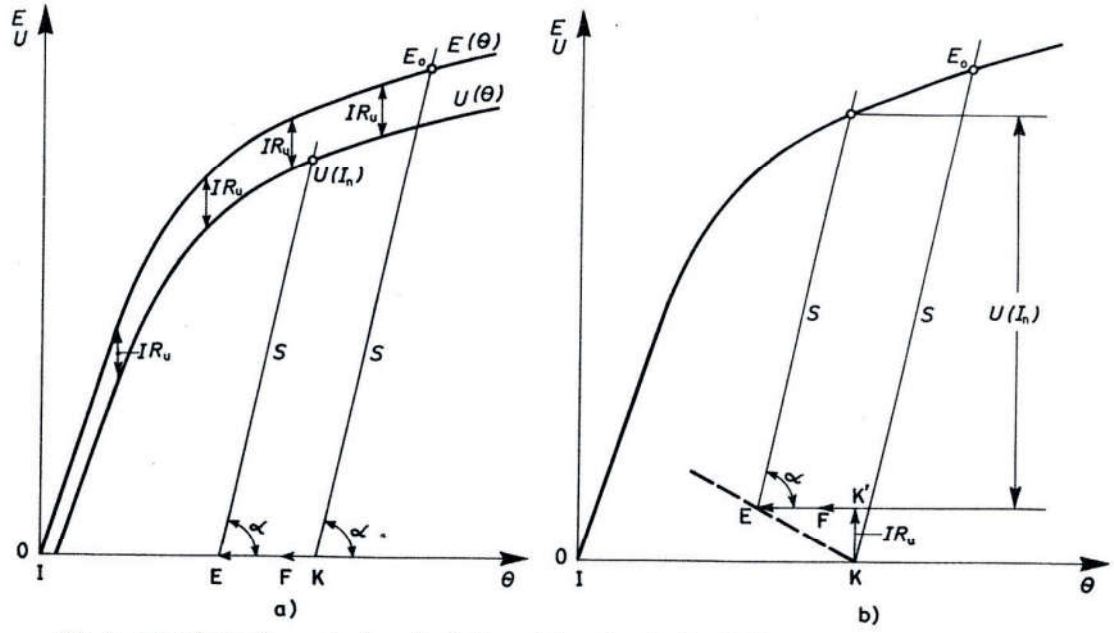
Sl. 15. Shema spoja kompaundiranoga generatora prema starim pravilima označavanja

6.4. »I«-linije istosmjernih strojeva

Razmatranje svojstava istosmjernog stroja uz pomoć »I«-linija po metodici je slično razmatranju svojstava asinhronog stroja pomoću kružnog dijagrama. Riječ je, dakle, o formalnome geometrijskom prikazivanju pogonskih fizikalnih veličina u raznim pogonskim stanjima istosmjernog stroja bilo koje vrste. Za razliku od kružnog dijagrama asinhronog motora, »I«-linija se ne može konstruirati na temelju matematičkoga analitičkog postupka. Ona je karakteristična krivulja za konkretni istosmjerni stroj i, uz pomoć dijagrama praznog hoda, daje vrlo jednostavan i pregledan uvid u svojstva istosmjernog stroja pri raznim opterećenjima. Prikazat ćemo kako ona nastaje.

U dijagramu praznog hoda držimo čvrstom krivulju induciranog napona E jer ćemo se pri promjeni struje koristiti njome kao krivuljom napona $U(\Theta)$, a pustimo da krajnja točka rezultantnog protjecanja (uključivši i fiktivni magnetski napon zbog reakcije armature, a isključivši samo poredne uzbude) putuje u adekvatnom smjeru osi uzbude, ali pomaknuta u odgovarajućem smjeru osi napona za iznos IR_u. Tako opisana linija pri promjeni struje tereta zapravo je »I«-linija. Prema tome »I«-linija predstavlja geometrijsko mjesto točaka rezultantnog protjecanja i omskog pada napona u istosmjernom stroju ovisno o promjeni struje tereta, kad se u dijagramu (U,Θ) drži čvrstom krivulja praznog hoda stroja. Početnu točku »I«-linije na dijagramu (U,Θ) nazivamo *ishodište uzbude*, a budući da struja stroja I uz iznesene pretpostavke uzrokuje pomicanje tog ishodišta uzbude, nastao je naziv »I«-linija.

Protumačimo konstrukciju na primjeru Krämerova generatora (prema sl. 6.3–2), koji je posebno prikladan za proučavanje jer je uzbuđen svima trima osnovnim vrstama uzbudnih namota. U praznom hodu protjecan je strujom samo nezavisni i poredni uzbudni namot. Na slici 1.a prikazana je krivulja praznog hoda



Sl. 1. Objašnjenje nastanka »I«-linije. a) karakteristike Krämerova generatora $E(\Theta)$ i $U(\Theta)$ uz nazivnu struju I_n; b) konstrukcija »I«-linije za taj primjer

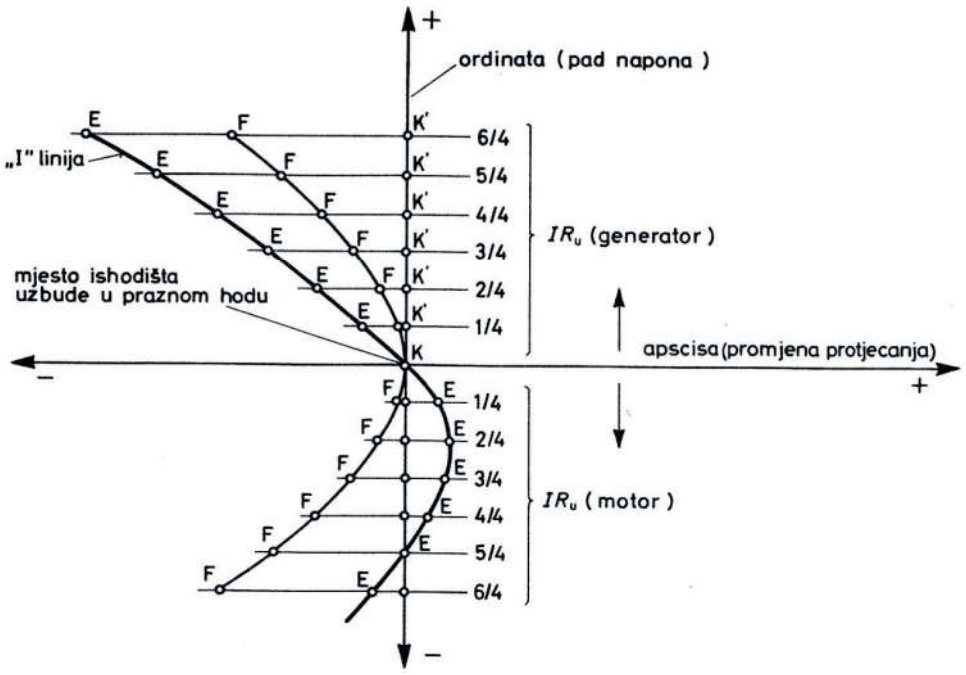
$E(\Theta)$, dana pri konstantnoj brzini vrtnje. Nezavisna uzbuda u iznosu $\overline{IK}$ na slici i pravac samouzbude porednog namota S s kutom nagiba α određuju napon praznog hoda u točki E_0. Želi li se ustanoviti napon za nazivno opterećenje ($I = I_n$), može se u svakoj točki krivulje $E(\Theta)$ odbiti iznos omskog pada napona IR_u pa se dobiva krivulja $U(\Theta)$ za nazivni teret. Pri tome su u R_u sadržani svi otpori u armaturnome strujnom krugu, uključivši i prelazni otpor na četkicama. Krivulja $U(\Theta)$ crtana je tako kao da nema reakcije armature, djelovanje koje ćemo uzeti u obzir na uzbudi (tj. na apscisnoj osi). Fiktivni magnetski napon zbog djelovanja reakcije armature u iznosu $\overline{KF}$djeluje tako da slabi tok, jednako kao i protjecanje serijskog namota u iznosu $\overline{FE}$. Ako sad u točki E postavimo pravac samouzbude S pod kutom α (jer se protjecanje uslijed tog djelovanja smanjilo na iznos $\overline{IE}$), sjecište tog pravca s krivuljom $U(\Theta)$ daje nam radnu točku za nazivnu struju, pa je napon generatora jednak udaljenosti točke $U(I_n)$ od apscisne osi.

Ponovimo upravo provedeni postupak na slici 1.b, samo nešto drukčijim redoslijedom. Na iznos protjecanja nezavisne uzbude $\overline{IK}$ nanosimo u smjeru ordinate ukupni omski pad napona IR_u, tako da dođemo do točke K′. Na nju nastavimo nanositi iznos protjecanja $\overline{K'F}$, nastaloga reakcijom armature, i $\overline{FE}$, uzrokovanoga serijskim namotom, suprotno pozitivnom smjeru apscisne osi. Postavimo li u točki E pravac samouzbude pod kutom α, udaljenost sjecišta tog pravca s krivuljom $E(\Theta)$ do pravca koji je paralelan s apscisnom osi, a prolazi kroz točku K′, daje nam opet iznos $U(I_n)$. Rezultat tog drugog postupka jednak je kao u onome prvom, s time što nismo dirali *naponsku krivulju*, nego smo sve promjene izvodili na *strani uzbude*. Pri tome nam se *ishodište uzbude* pomaknulo iz točke K (za prazni hod) u točku E (za nazivnu struju). Prema definiciji na početku ovog izlaganja točke E i K dvije su točke »I«-linije. Pretpostavimo li da se ukupni omski pad napona i fiktivni magnetski napon nastao zbog reakcije armature linearno mijenjaju sa strujom tereta, našu »I«-liniju čini pravac kroz te dvije točke izvučen na slici 1.b debelom crtkanom linijom. Nema li te proporcionalnosti, »I«--linija odstupa od pravca i pretvara se u krivulju koja bi prolazila točkama E i K pa bi manje ili više odstupala od pravca, već prema tome koliko pojedini elementi odstupaju od linearne ovisnosti o struji tereta.

»I«-linija se može nacrtati (u mjerilu) i nezavisno od dijagrama praznog hoda, pa se poslije unosi u ishodište uzbude na tom dijagramu, ili na bilo koje drugo mjesto u tom dijagramu, ako to zahtijeva konkretno razmatranje svojstava stroja, kao što ćemo to još vidjeti.

Točniji tok »I«-linije dobiva se kad se padovi napona i pojedina protjecanja izračunaju za više vrijednosti struje (obično za razlomke nazivne struje), pa se onda konstruira točka po točka. Na slici 2. točnije je konstruirana »I«-linija za Krämerov generator (sl. 6.3–3), koji je i dosad obrađivan. Za vrijednosti 1/4, 2/4, 3/4, 4/4, 5/4 i 6/4 nazivne struje izračunati su i unijeti u dijagram omski padovi napona $\overline{KK'}$, fiktivni magnetski napon zbog djelovanja reakcije armature $\overline{K'F}$ (koji se sad ne mijenja linearno sa strujom) i (suprotno) protjecanje serijskog namota $\overline{FE}$. Nacrtan je i dio »I«-linije koji bi odgovarao za motorski rad istog stroja, u istom spoju. U principu je razlika u tome što su sad padovi napona, zbog promjene smjera struje, crtani u smjeru obrnutome od pozitivnog smisla ordinate.

To znači da je motoru (i to uvijek!) »I«-linija ispod apscisne osi. Na slici 2. u motorskom je dijelu još i protjecanje serijskog namota nanijeto u smjeru apscisne osi, dakle obrnuto nego u generatorskom dijelu, i to zato što se u motorskom radu smjer struje armature promijenio prema onome u generatorskome, pa protjecanje serijskog namota potpomaže djelovanje nezavisne uzbude (što je za motorski rad normalno).



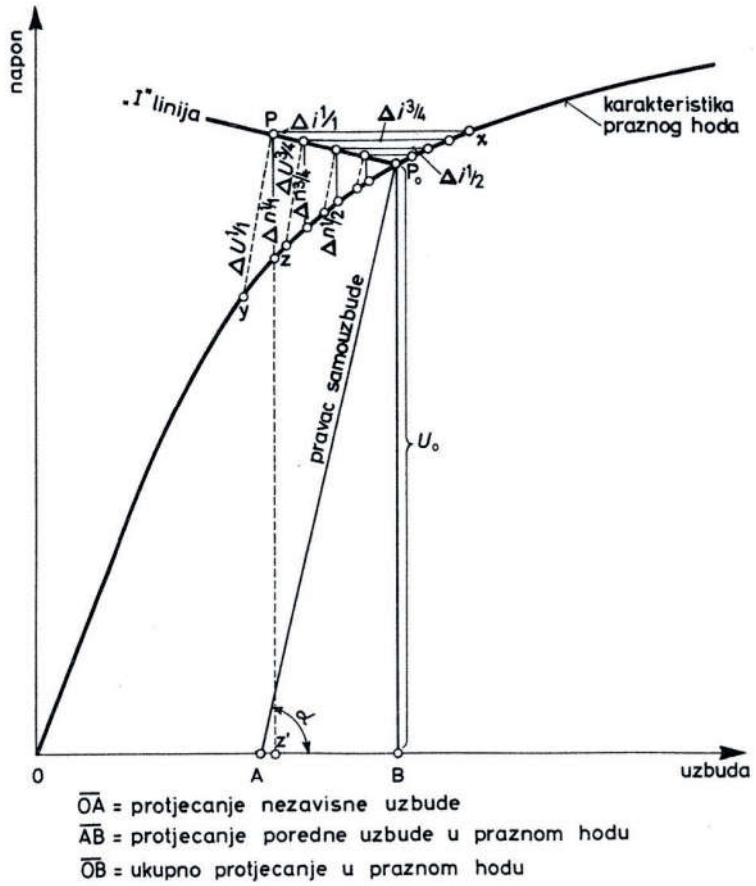
Sl. 2. Princip općenite konstrukcije »I«-linije neovisno o njezinu položaju primijenjen na Krämerovu stroju

Nakon upoznavanja s konstrukcijom »I«-linije možemo prijeći na njezinu upotrebu, tj. na istraživanje svojstava istosmjernih strojeva pomoću nje. Na slici 3. nacrtan je nanovo dijagram praznog hoda Krämerova generatora s protjecanjem nezavisne uzbude $\overline{OA}$ i protjecanjem poredne uzbude u praznom hodu $\overline{AB}$. Ukupna uzbuda u praznom hodu, koju čini zbroj svih protjecanja koja djeluju u praznom hodu Θ_0, prikazana je dužinom $\overline{OB}$ i određuje točku praznog hoda P_0 (snaga je jednaka nuli, $P = 0$) uz napon praznog hoda U_0. Pretpostavimo da je »I«-linija konstruirana posebno, na poznati način, i unesena u dijagram u točki P_0 (ne u ishodištu uzbude!). Dakle »I«-linija je predočena krivuljom, deblje crtanom linijom, koja prolazi točkama P_0 i P, pri čemu točka P odgovara nazivnoj struji, tj. nazivnom opterećenju. Za svako opterećenje istosmjernog stroja tri su karakteristične veličine koje određuju stanje stroja. To su brzina vrtnje n, uzbuda (uzbudno protjecanje) Θ_0 ili struja uzbude i_u, te napon U. One su prema poznatim zakonitostima iz prethodnih izlaganja međusobno povezane. Iz provedene konstrukcije možemo vidjeti kako se jedan od tih elemenata mijenja, ako su ostala dva konstantna, ili kako treba jedan od tih elemenata mijenjati (vanjskim zahvatom) želimo li da ostala dva ostanu konstantna.

a) Ako želimo pod teretom uz konstantnu brzinu vrtnje n zadržati i konstantan napon U, jednak onome u praznom hodu, moramo pojačati uzbudu. Za koji iznos treba promijeniti uzbudu, pokazuje horizontalna udaljenost pripadne točke »I«-linije od krivulje praznog hoda. To će prema našoj slici 3. biti (za točku nazivne snage):

$$\Delta\Theta = + \frac{\overline{PX}}{\overline{OB}} \Theta_0, \quad \text{ili} \quad \Delta i = + \frac{\overline{PX}}{\overline{OB}} i_0. \tag{1}$$

Pozitivan predznak vrijedi za generatorski rad stroja kad točke »I«-linije leže iznad krivulje praznog hoda. Za točke »I«-linije koje su ispod linije praznog hoda vrijedio bi negativan predznak jer bi stroju u motorskom radu valjalo smanjiti uzbudu da se održe uvodne pretpostavke.



Sl. 3. Mijenjanje ukupne uzbude (protjecanja Θ), napona stroja U i brzine vrtnje n u dijagramu istosjmjernog stroja (Krämerov stroj)

b) Drže li se konstantnima brzina vrtnje n i uzbuda (odnosno konstantan iznos otpora u uzbudnim krugovima), mijenja se nužno iznos napona. Promjenu napona ΔU pokazuje udaljenost promatrane točke na »I«-liniji od krivulje praznog hoda u smjeru paralelnome s pravcem samouzbude. Za našu sliku (nazivna točka) vrijedi:

$$\Delta U = - \frac{\overline{PY}}{\overline{P_0A}} U_0 \tag{2}$$

uz negativan predznak jer napon u promatranoj točki pada; to se odnosi na sve točke »I«-linije koje leže iznad krivulje praznog hoda. Za točke »I«-linije koje su ispod krivulje praznog hoda bit će pozitivan predznak.

c) Želimo li pod teretom održati konstantan napon, a da ne diramo uzbudu, odnosno uz konstantnu uzbudu, moramo mijenjati brzinu vrtnje (povećavati je generatoru) ili se ona sama mijenja (motoru). Te promjene proistječu iz omjera induciranog napona i ukupnoga magnetskog toka. Potrebnu promjenu brzine vrtnje generatora, ili nastalu promjenu brzine vrtnje motora, karakterizira vertikalna udaljenost promatrane točke »I«-linije od karakteristike praznog hoda. Na slici 3. za točku nazivnog tereta vrijedi:

$$\Delta n = + \frac{\overline{PZ}}{\overline{ZZ'}} n_o, \tag{3}$$

gdje pozitivan predznak znači da treba povećati brzinu kako bi se stanje održalo nepromijenjenim, jer je »I«-linija u promatranoj točki iznad krivulje praznog hoda. Za točke »I«-linije koje su ispod linije praznog hoda promjena brzine vrtnje Δn dobiva negativan predznak.

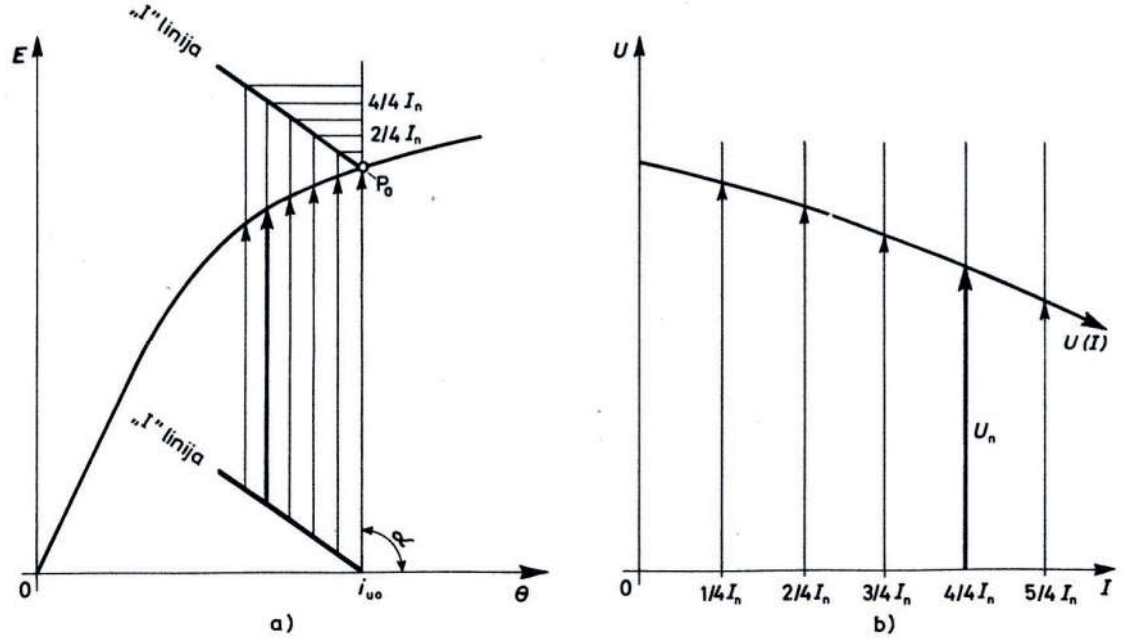
To su osnovna istraživanja koja se na stroju dadu provesti pomoću »I«-linije.

6.4.1. Konstrukcija vanjskih karakteristika generatora

Za primjer pokažimo kako se pomoću »I«-linija određuju vanjske karakteristike raznih vrsta generatora. Konstrukcija je izvedena na osnovi prethodnog izlaganja, u točki b), i relacije (2), i to za po pet točaka tereta (tj. za $I = \frac{1}{4} \ldots \frac{5}{4} I_n$). Radi jednostavnosti pretpostavit ćemo da su »I«-linije pravci, tj. da su fiktivni magnetski napon nastao zbog reakcije armature i pad napona na otporu stroja proporcionalni struji tereta.

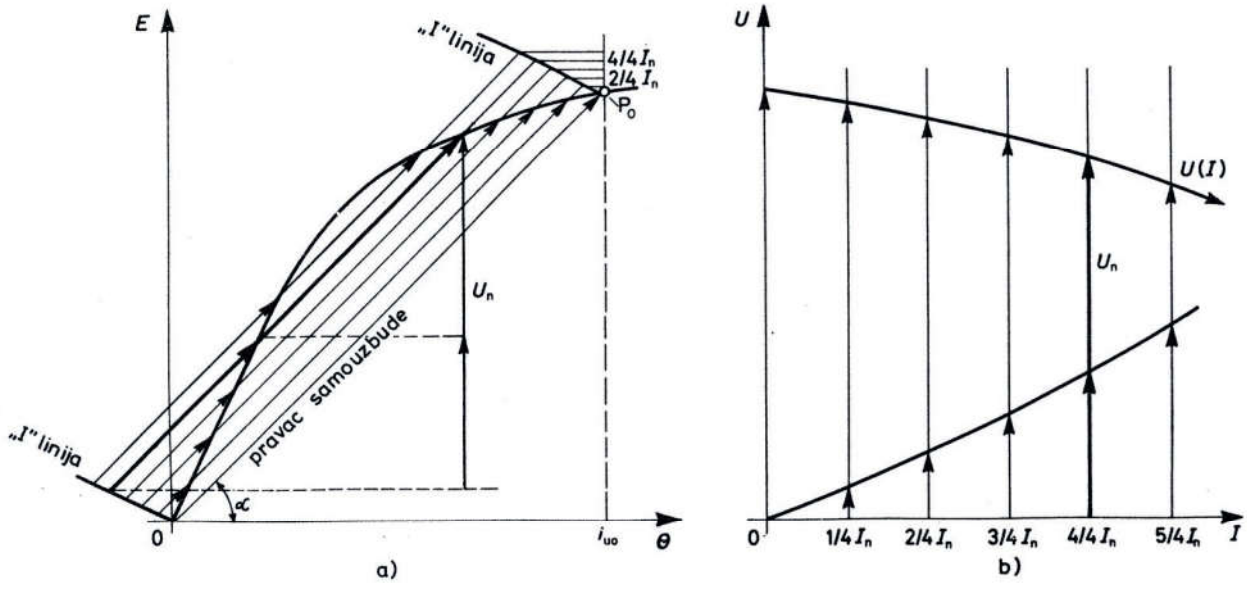
Na slici 4.a postavljene su *dvije* »I«-linije na karakteristiku praznog hoda nezavisno uzbuđenog generatora. Prva u točku P_o, tj. točku napona u praznom hodu, i druga u točku ishodišta uzbude i_{uo}. Padovi napona pod teretom (kao i naponi), prema prethodnom objašnjenju, paralelni su s pravcem samouzbude, tj. u ovom primjeru paralelni s ordinatom ($\alpha = 90°$). To možemo rastumačiti tako da zamislimo (nepostojeći) poredni uzbudni namot s otvorenim stezaljkama, tj. s beskonačno velikim otporom, pa je tad njegov pravac samouzbude okomit (sin $90° = 1$). Spojimo li vertikalama točke istih tereta obiju »I«-linija, dobivamo za svaki teret napon kao udaljenost karakteristike praznog hoda od donje »I«-linije (u ishodištu samouzbude), a pad napona pri svakom teretu kao udaljenost od gornje »I«-linije do karakteristike praznog hoda. Na slici 4.b nacrtana je vanjska karakteristika s naponima za odabrane točke struje tereta. Pri jednakom mjerilu za napon na slikama 4.a i b ti su naponi i crtani jednaki, što je jasno jer je pravac samouzbude na slici 4.a paralelan s ordinatnom osi. Tako smo došli do vanjske karakteristike. Pažljivi čitatelj vjerojatno je uočio da su padovi napona na slici 4.

vrlo veliki. To je namjerno učinjeno da bi se dobila preglednija slika. U stvarnosti se kvantitativno takva karakteristika kao na slici 4. može očekivati u nezavisno uzbuđenoga generatora vrlo male snage. I u prikazu primjera za ostale vrste generatora pretpostavit ćemo iz istog razloga generatore male snage.



Sl. 4. Konstrukcija vanjske karakteristike nezavisno uzbuđenoga generatora pomoću »I«-linije: a) karakteristika praznog hoda s »I«-linijama; b) vanjska karakteristika

Na slici 5.a postavljene su kao i prije dvije »I«-linije na karakteristiku praznog hoda poredno uzbuđenoga generatora, i to opet u točku praznog hoda i u točku ishodišta uzbude, koje se sad nalazi u ishodištu koordinatnog sustava. Spajanjem



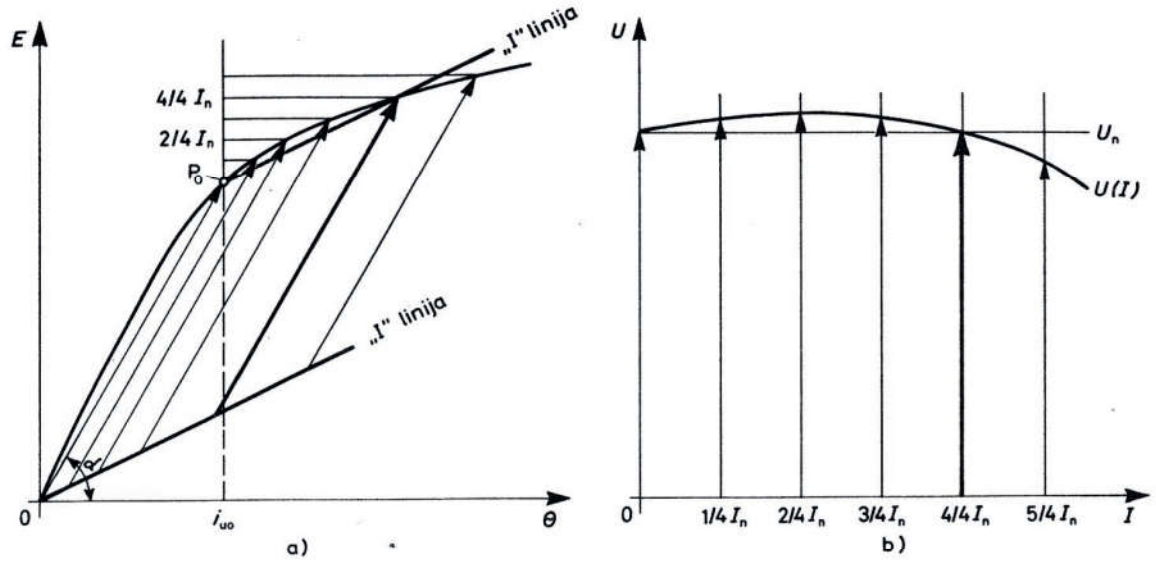
Sl. 5. Konstrukcija vanjske karakteristike poredno uzbuđenoga generatora pomoću »I«-linije: a) karakteristika praznog hoda s »I«-linijama; b) vanjska karakteristika

točaka istog tereta obiju »I«-linija pravcima paralelnim s pravcem samouzbude, mogu se otčitati i iznosi napona i padova napona na jednak način kao u prethodnom primjeru, tj. kao udaljenosti od krivulje praznog hoda do donje »I«-linije (napon) i od krivulje praznog hoda do gornje linije (pad napona), i to u relativnim veličinama prema naponu u praznom hodu. To znači da pri unošenju točaka napona za odabrane točke struja opterećenja u vanjsku karakteristiku na slici 5.b moramo pojedinične, sa slike 5.a otčitane, vrijednosti još pomnožiti sinusom kuta pravca samouzbude jer je npr. za prazni hod (sl. 5.a):

$$\sin\alpha = \frac{\overline{P_0 i_{uo}}}{\overline{P_0 O}} = \frac{U_0}{\overline{P_0 O}} = \frac{E_0}{\overline{P_0 O}}.$$

Konstrukcija pomoću »I«-linije daje i nestabilnu, povratnu granu opće karakteristike tereta poredno uzbuđenoga generatora, što se točno vidi na slici 5.

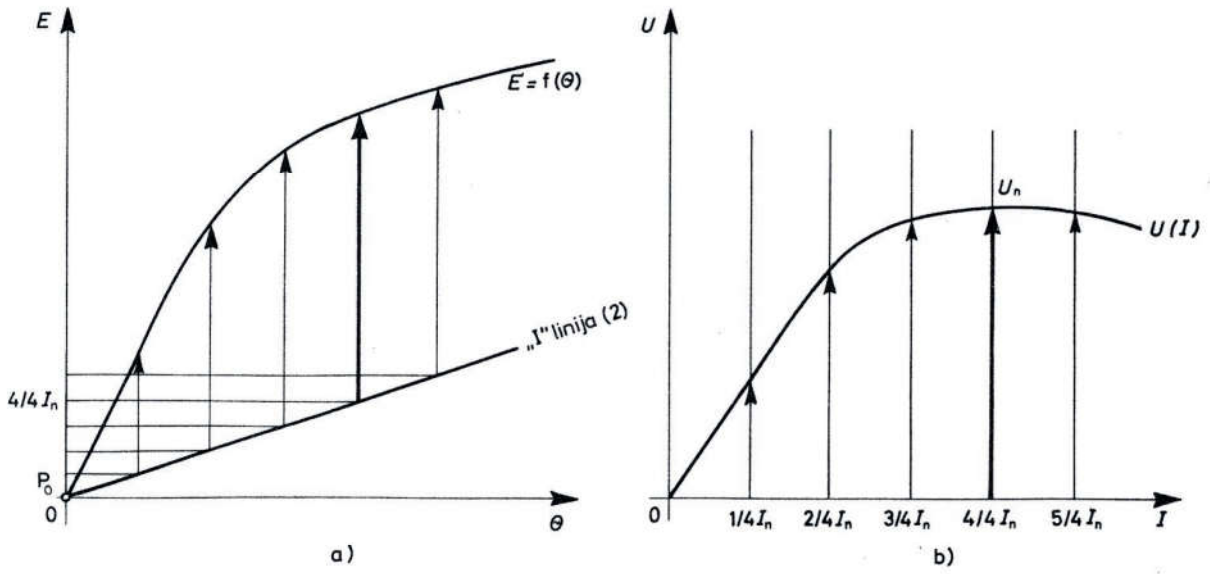
Osobitu ulogu ima »I«-linija ne samo u iznalaženju vanjske karakteristike kompaundiranoga generatora već i prilikom izračunavanja potrebnog iznosa protjecanja (posebno serijskog namota). Na slici 6.a to je prikazano za kompaundirani generator s porednom osnovnom uzbudom. Kad se nacrta karakteristika praznog hoda, podigne se u točki praznog hoda P_0 okomica na apscisnu os do iznosa pada napona koji odgovara nazivnoj struji I_n. Tamo gdje paralela s osi apscisa povučena kroz tu točku siječe karakteristiku praznog hoda mora biti točka napona generatora pod nazivnim teretom, jer u toj točki mora vladati napon jednak onome u točki praznog hoda. Budući da pri tome mora i pad napona biti jednak nuli, a pad napona je udaljenost od »I«-linije do karakteristike praznog hoda, mora upravo tom točkom prolaziti i »I«-linija, što se postiže



Sl. 6. Konstrukcija vanjske karakteristike kompaundiranoga generatora s osnovnom porednom uzbudom pomoću »I«-linije: a) karakteristika praznog hoda s »I«-linijama; b) vanjska karakteristika

opisanim postupkom. Iz toga se lako razlučuju odnosi potrebnoga porednog i serijskog protjecanja za nazivno stanje, a slično je i kad je kompaundiranom generatoru osnovna uzbuda nezavisna. Konstrukcija vanjske karakteristike za naš primjer s porednom uzbudom kompaundiranoga generatora kao osnovnom, provodi se na već opisani način u prethodnom primjeru (poredni generator) i nećemo je ponavljati. Rezultat se vidi na slici 6.b.

Već je prije u izlaganju napomenuto da serijski generator rijetko nalazi upotrebu u praksi. No opisat ćemo i taj primjer konstrukcije »I« – linije zbog nekih zanimljivih pojedinosti. Nacrtamo li kao na slici 7.a krivulju praznog hoda generatora i želimo postaviti dvije »I« – linije, u točku P_0 i točku ishodišta uzbude, odmah vidimo da se te dvije linije potpuno poklapaju i imaju polazište u ishodištu koordinatnog sistema, gdje su i točka praznog hoda i iznos struje (i protjecanja) u praznom hodu, dakle i ishodište uzbude. Iz definicije izlazi da su i napon (udaljenost donje »I« – linije do karakteristike praznog hoda) i pad napona na ukupnom otporu (udaljenost gornje »I« – linije do karakteristika praznog hoda) jednaki, samo što je pad napona formalno negativan. Tome je razlog što je u otpor pravca samouzbude serijskoga generatora uključen i vanjski otpor R_t, tj. otpor tereta na generatoru, pa s gledišta utroška energije nema jednak karakter. Energija utrošena u otporu R_t s gledišta pogona je korisna energija. Zbog toga ne treba crtati ni pravce samouzbude da bi se ustanovila realna vrijednost napona jer su iz bilo koje radne točke udaljenosti do P_0 i ishodišta uzbude jednake. Zato se jednostavno iz radnih točaka povuku pravci paralelni s osi ordinata pa se naponi dobivaju direktno kao udaljenosti karakteristika praznog hoda od »I« – linija. Te su vrijednosti unesene u sliku 7. b. U točki kratkog spoja (negdje u prostoru desno od sl. 7.a sijeku se karakteristika praznog hoda i »I« – linija.



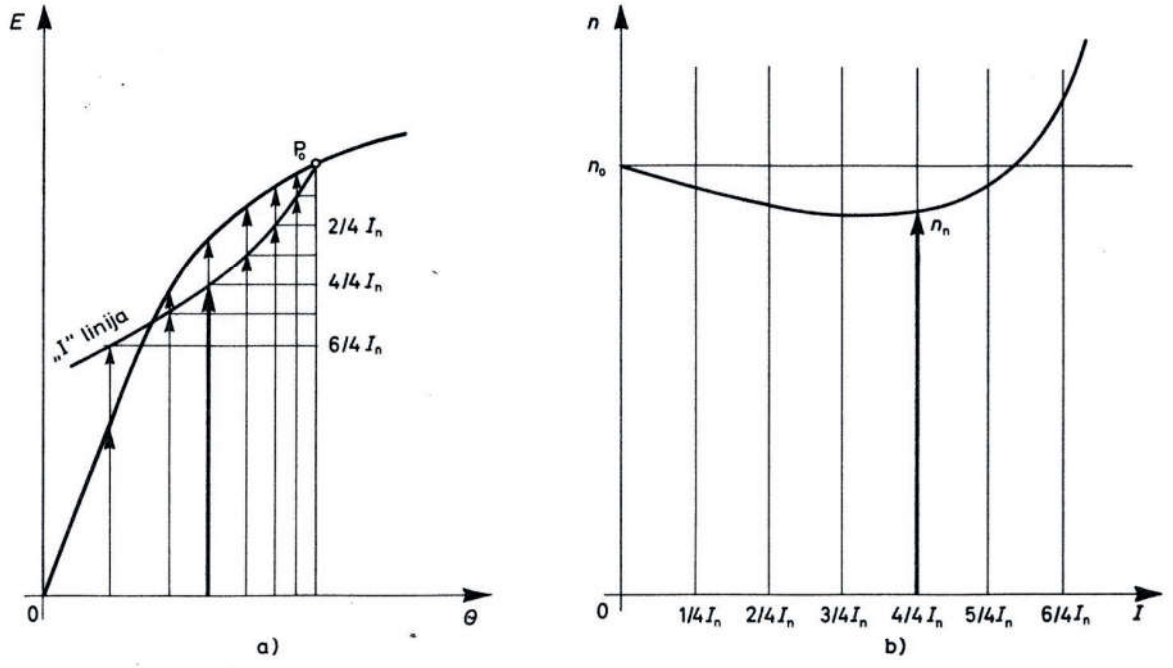
Sl. 7. Konstrukcija vanjske karakteristike serijski uzbuđenoga generatora pomoću »I«-linije: a) karakteristika praznog hoda s »I«-linijama; b) vanjska karakteristika

6.4.2. Konstrukcija motorskih karakteristika *n(I)*

Budući da smo u generatorskim primjerima opširno opisali postupak s »I« – linijom, nećemo to ponavljati za sve vrste motora. Obradit ćemo samo ona pitanja koja su specifično zanimljiva za motorske pogone. Za te pogone pretpostavljamo da se ne mijenjaju napon i otpori u uzbudnim krugovima, a zanima nas promjena brzine vrtnje s opterećenjem (strujom I) motora. Promjena brzine vrtnje pod teretom dobiva se na osnovi relacije (3) kao umnožak brzine vrtnje u praznom hodu s omjerom udaljenosti od »I« – linije do karakteristike praznog hoda i udaljenosti karakteristike praznog hoda od apscisne osi; vidi relaciju (3) i sliku 3. Brzina vrtnje pod teretom dobiva se prema tome kao:

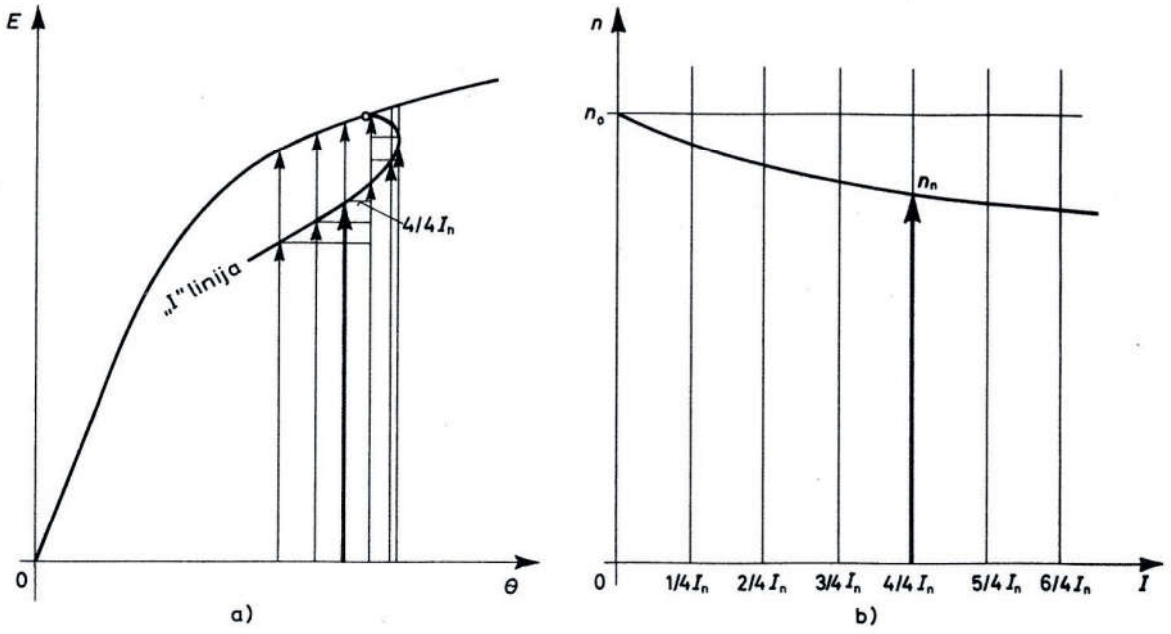
$$n = \frac{\overline{PZ'}}{\overline{ZZ'}}\, n_0, \tag{4}$$

tj. kao umnožak brzine vrtnje u praznog hoda n_0 s omjerom udaljenosti točke »I« – linije do apscisne osi i udaljenosti odgovarajuće točke na karakteristici praznog hoda do apscisne osi (vidi sl. 3). Dalje, reakcija armature može djelovati neugodnije na motor nego na generator jer zna biti uzrok nestabilnosti vanjske karakteristike, a generatorsku redovno stabilizira. Zato ćemo za prvi primjer motorskog pogona pretpostaviti motor s jakim djelovanjem reakcije armature, pa joj je posljedica »I« – linija koja nije pravac. Na slici 8.a nacrtana je karakteristika praznog hoda poredog ili nezavisno uzbuđenog motora s jakom reakcijom



Sl. 8. Konstrukcija karakteristike *n(I)* poredno (nezavisno) uzbuđenog motora s jakom reakcijom armature: a) karakteristika praznog hoda s »I«-linijom; b) karakteristika *n(I)*

armature i unijeta je njegova »I« – linija. Za struje motora ($I = \frac{1}{4} I_n ... \frac{6}{4} I_n$) ucrtane su točke na »I«-liniji i uz pomoć relacije (4) nacrtana je na slici 8.b ovisnost brzine vrtnje o struji tereta $n(I)$ za taj motor. Dobro se vidi nestabilnost motora pri preopterećenjima, osobito većima, kad (fizikalno gledano) djelovanje reakcije armature na glavni tok nadvlada utjecaj pada napona na potrebni inducirani napon. Budući da je riječ o nezavisno (poredno) uzbuđenome motoru, i vanjska karakteristika $n(M)$ je slična i pokazuje istu tendenciju nestabilnosti.



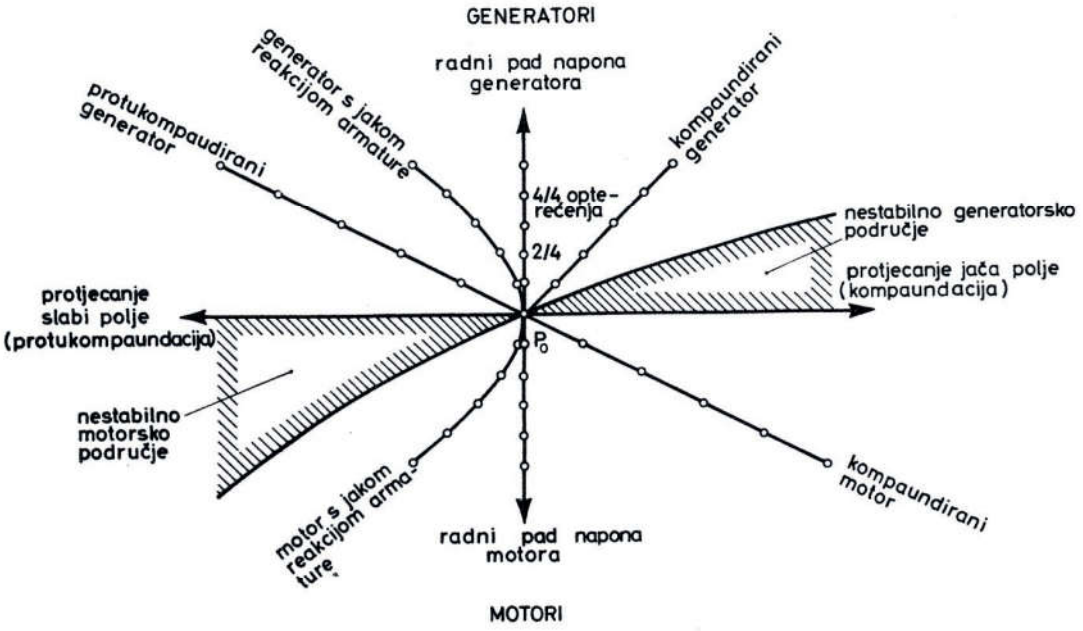
Sl. 9. Konstrukcija karakteristike $n(I)$ kompaundirano uzbuđenog motora: a) karakteristika praznog hoda; b) karakteristika $n(I)$

Kad se motoru iz prikazanog primjera doda serijski namot radi stabiliziranja, on postaje kompaundirani motor. Na slici 9.a nacrtana je za taj primjer karakteristika praznog hoda i ucrtana je odgovarajuća »I«-linija. Uz pomoć relacije (4) konstruirana je na slici 9.b karakteristika $n(I)$, iz koje se vidi poboljšana situacija stabilnosti u pogonu prema prethodnom primjeru. Dakako, slično je i s vanjskom karakteristikom motora $n(M)$.

6.4.3. Analiza općih svojstava »I«-linije

Osim za detaljnije istraživanje svojstava istosmjernih strojeva, kad su bilo iz proračuna, bilo iz ispitivanja poznati elementi, »I« – linija odlično služi i za brzu grubu procjenu svojstava stroja. Poznavalac će problematike moći odmah, iz položaja »I«-linije, grubo procijeniti kako će se stroj ponašati u pogonu. Zato napravimo još jedan pregled svojstava raznih strojeva s raznim »I«-linijama.

Neka nam za osnovu razmatranja posluži slika 10. Na njoj je prikazan dio karakteristike praznog hoda u okolici točke P_0, točke u koju postavljamo »I«-liniju za naša osnovna razmatranja (vidi sl. 3. i tumačenje). Apscisna os nam razgraničuje dva područja; gornje, gdje leže »I«-linije generatora, i donje, gdje su »I«-linije motora. U smjeru desnog kraka apscisne osi djeluju protjecanja koja jačaju glavno magnetsko polje, a u smjeru lijevog kraka iste osi protjecanja koja slabe glavno magnetsko polje. Ordinatna os dijeli dva područja; lijevo, s »I«-linijema strojeva kojima pod teretom slabi glavno magnetsko polje, i desno, s »I«-linijama strojeva kojima s porastom tereta jača glavno magnetsko polje. »I«-linija koja bi ležala točno u ordinatnoj osi pripadala bi stroju koji pod teretom nema promjene glavnoga magnetskog polja, a to bi bio generator kad bi »I«-linija bila u gornjemu, odnosno motor kad bi ona ležala u donjem području. Posebno su zanimljiva i za pogon opasna dva područja osjenčeno prikazana na slici 10. Lijevo od točke P_0 između apscisne osi i karakteristike praznog hoda je područje nestabilnosti motora. Ako u njemu leži cijela »»I«-linija nekog motora ili u njega uđe samo jedan njezin dio, takav je motor nestabilan za terete koji odgovaraju točkama »I«-linije u tom području tj. raste mu brzina vrtnje s opterećenjem (pobjeg!). Desno od točke P_0 između apscisne osi i karakteristike praznog hoda je područje nestabilnosti generatora. Ako je u njemu cijela »I«-linija nekoga generatora, ili samo njezin dio tad je on nestabilan za terete koji odgovaraju točkama »I«-linije u tom području, tj. raste mu napon s opterećenjem. Na slici 10. još je nekoliko karakterističnih »I«-linija s naznakom kakvoj vrsti stroja pripadaju. Na osnovi slike 10. s malo se vježbe stječe mogućnost brze približne ocjene svojstava stroja čim mu je poznata njegova »I«-linija.



Sl. 10. »I«-linije raznih vrsta istosmjernih strojeva

6.5. Gubici istosmjernog stroja – korisnost

Zbog porasta cijene energije, posebno njezinim nerazmjernim poskupljenjem u proteklom desetljeću, pitanje gubitaka snage stroja i korisnosti postalo je od prvorazrednog značenja. Dok su prije prilikom zasnivanja i konstruiranja stroja ili serije strojeva pitanja što jeftinije njihove nabavne cijene potiskivala sve ostale elemente ekonomskog karaktera, pa i troškove gubitaka snage, danas je pitanje tih troškova ravnopravno pitanju osnovne cijene stroja. Riječ je, dakako, o strojevima opće namjene. Ekonomski optimum ne daje više najlakši i najjeftiniji stroj, već približno stroj kojem su troškovi gubitaka snage smanjeni na račun nešto povećanih dimenzija. Zbog toga se pitanju gubitaka, njihovu što točnijem poznavanju i računanju posvećuje sve više pažnje.

6.5.1. Gubici istosmjernog stroja – sistematizacija

Dobro su poznate tri osnovne vrste gubitaka snage: mehanički gubici, gubici u željezu zbog vremenske promjene magnetskog polja i gubici u bakru kojim protječe struja.

Mehaničke gubitke dijelimo na:

a) P_{tr} – *gubitke trenja* u ležajima i trenja o zrak dijelova koji se vrte;

b) P_v – *gubitke ventilacije* nastale kao gubitak snage predan ventilatoru (ili ventilatorima) kojim se rashladni zrak protjeruje strojem;

c) P_{km} – *mehaničke gubitke na kolektoru* koji nastaju zbog trenja četkica o kolektor; oni su proporcionalni ukupnoj površini četkica, pritisku četkice na kolektor i koeficijentu trenja četkica o kolektor te brzini kojom se četkice kreću po kolektoru.

Gubitke u željezu dijelimo na:

d) P_{Fez} – *gubitke u zubima* željeza armature, koji su proporcionalni masi zubi rotora, kvadratu najveće indukcije u zubima armature i približno 1,3-potenciji frekvencije što vlada u rotoru. Oni još vise o kvaliteti limova rotora u smislu širine petlje histereze željeza rotora i električne vodljivosti željeza rotora. Kompenziranom stroju (pri konstantnoj brzini vrtnje i konstantnom naponu) oni se ne mijenjaju s opterećenjem stroja, a nekompenziranome rastu s opterećenjem zbog iskrivljenja magnetskog polja uzrokovanoga reakcijom armature. Na te gubitke ima znatan utjecaj i kvaliteta mehaničke izrade, obrade i dorade zubi armature.

e) P_{Fej} – *gubitke u jarmu* željeza rotora, koji su proporcionalni masi jarma rotora, kvadratu najveće indukcije u jarmu armature i približno 1,3-potenciji frekvencije što vlada u rotoru. Ovise još o kvaliteti limova rotora, u vezi sa širinom petlje histereze željeza rotora i električne

vodljivosti željeza rotora. Za razliku od gubitaka u željezu zubi, na njih uopće ne utječe opterećenje stroja bez obzira na to je li stroj kompenziran ili nije. I na njih utječe kvaliteta obrade željeza (limova), ali manje nego na gubitke u željezu zubi.

f) P_{Fep} – *površinske gubitke u željezu glavnih polova,* koji su proporcionalni kvadratu indukcije pulsacije B_p (a to je razlika maksimalne i minimalne vrijednosti indukcije u zračnom rasporu B_δ pod polom kad se ona mijenja zbog razlike magnetskog otpora zračnog raspora nad zubom i utorom armature). Dalje su oni proporcionalni 1,5-potenciji utorske frekvencije f_u s kojom pulsira promjena indukcije B_δ i ukupnoj površini polova okrenutoj prema rotoru. Ovise jako o kvaliteti željeza glavnih polova, njihovoj konstrukciji i tehnologiji izrade.

Gubici nastali zbog struje, često kraće nazvani *strujni gubici* ili i *gubici u bakru* namota, ovise o zagrijanju namota u pogonu s nazivnom snagom i klasificirani su kao:

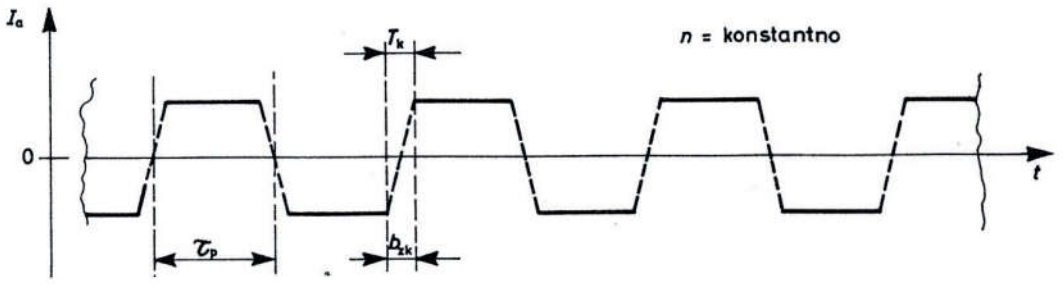
g) P_{Cua} – nazivni (»istosmjerni«) *gubici u namotu armature,* koji ovise o kvadratu armaturne struje I_a i o otporu armature u užem smislu R_a.

h) P_{Cupp} – *gubici u namotu pomoćnih polova,* koji ovise o kvadratu armaturne struje I_a i o otporu pomoćnih polova R_{pp}.

i) P_{Cuk} – *gubici kompenzacijskog namota* (ako ga stroj ima), ovisni o kvadratu armaturne struje I_a i o otporu kompenzacijskog namota R_k.

j) P_{Cus} – *gubici u serijskom namotu* (ako ga stroj ima), ovisni o kvadratu armaturne struje I_a i o otporu serijskog (uzbudnog) namota R_s.

k) P_{Cudp} – *dodatni gubici u armaturnom namotu zbog djelovanja poprečnoga magnetskog polja.* Struja je u armaturi izmjeničnog karaktera i za pojedini vodič izgleda približno kao na slici 1. Kažemo približno jer joj ne poznajemo dovoljno vremenski tok za trajanja komutacije T_k. Ipak je načelno jasno da se ti gubici pojavljuju zbog potiskivanja struje poprečnim (rasipnim) poljem armature, pa će oni ovisiti o kvadratu armaturne struje I_a, normalnom istosmjernom otporu armature R_a i faktoru ili stupnju potiskivanja i spektru harmoničkih članova koji bi se dobio analizom oblika izmjenične struje, a njega dovoljno ne poznajemo.



Sl. 1. Približni vremenski oblik struje u jednom vodiču armaturnog namota. Trajanje poluperiode odgovara prostornoj dužini polnog koraka τ_p, a trajanje komutacije T_k širini komutacijske zone b_{zk}, sve uz konstantnu brzinu vrtnje n

l) P_{Cudu} – *dodatni gubici u armaturnom namotu zbog djelovanja uzdužnoga magnetskog polja.* Strojevima s visokom indukcijom u zubima armature dio glavnoga magnetskog polja prodire u utore i pri tome se deformira. To prostorno deformirano polje potiskuje struju u armaturnom vodiču i izaziva dodatne gubitke. Točnija numerička interpretacija tih gubitaka skopčana je s još znatno većim teškoćama od interpretacije gubitaka nastalih uslijed poprečnoga magnetskog polja.

m) $P_{elč}$ – *električni gubici na kolektoru* nastaju prilikom prolaska struje kroz prelazni otpor između četkica i kolektora te kolektora i četkica. Oni su, dakle, proporcionalni prelaznom otporu četkica $R_č$ (prelazni otpor svih plus-četkica zbrojen s prelaznim otporom svih minus-četkica) i kvadratu armaturne struje I_a. Mogu se definirati i drukčije jer je umnožak otpora četkica $R_č$ i armaturne struje I_a jednak padu napona na četkicama $\Delta U_č$. Oni su, dakle, jednaki i umnošku armaturne struje I_a s padom napona na četkicama $\Delta U_č$ za tu konkretnu armaturnu struju.

n) P_u – *gubici u bakru uzbudnih namota.* Oni su zbroj gubitaka u pojedinim uzbudnim namotima kad ima više od jednoga uzbudnog namota. Za poredni stroj i nezavisno uzbuđeni stroj jednaki su umnošku uzbudne struje i_u i napona na namotu uzbude U_u. Za serijski stroj oni su već dani pod točkom j) kao P_{Cus}. Kompaundiranom stroju su zbroj gubitaka serijskoga uzbudnog namota s gubicima porednog ili nezavisnog namota.

Sumu svih gubitaka od a) do n) zovemo ukupni gubici istosmjernog stroja P_g i oni služe kao osnova za određivanje korisnosti η u širem smislu, što će biti razloženo u odjeljku 6.5.2. Naravno, ne smije se sumirajući gubitke serijskog ili kompaundiranog stroja učiniti pogreška pa zbrojiti gubitke u bakru serijskog namota dva puta!

U ovome kratkom pregledu dan je kratki fizikalni pregled gubitaka istosmjernog stroja, na osnovi kojeg se mogu razumjeti razni načini kojima se snaga pretvara u toplinu. Približno rečeno, svi gubici u stroju pretvaraju se u toplinu koja zagrijava razne dijelove stroja, osim dijela gubitaka ventilacije koji izlazi iz rashladnih otvora stroja u obliku kinetičke energije rashladnog sredstva (zraka) u gibanju. Smatrajući ovaj pregled dovoljnom informacijom za upoznavanje fizikalnih svojstava stroja, za čitaoca koga zanima sam proračun pojedinih vrsta gubitaka bit će on konkretnije prikazan u odjeljku 6.5.3.

6.5.2. Snaga stroja i korisnost

Kad govorimo o snazi stroja, onda redovito mislimo na njegovu *izlaznu snagu,* tj. snagu koju generator predaje mreži na stezaljkama:

$$P_2 = UI \text{ [W]}, \tag{1}$$

ili snagu što je motor predaje pogonjenom stroju (radnome mehanizmu) prema relaciji:

$$P_2 = M_m \omega = \frac{n\pi}{30} M_m \text{ [W]}, \tag{2}$$

pri čemu je M_m moment na osovini između motora i radnog mehanizma. *Ulaznom snagom* P_1 nazivamo onu snagu koju generator na osovini prima od pogonskog stroja (turbine) ili je motor na ulaznim stezaljkama uzima iz mreže. Razlika tih snaga, tj. $P_1 - P_2 = P'_g$, čini gubitke u stroju ili tzv. *uže gubitke* stroja. Operiramo s dva pojma gubitaka: *užim* i *širim*. Uži gubici upravo su definirani, a širima smatramo dodatno još i one što nisu ušli na opisani način u stroj, već nekim drugim putem. To su npr. gubici uzbude nezavisno uzbuđenog stroja i gubici ventilacije stroja koji ima posebni ventilator ili posebni uređaj za hlađenje. Dakle, širi su gubici zbroj svih gubitaka P_g opisanih u prethodnom odjeljku.

Korisnost stroja definirana je omjerom predane i primljene snage, tj.:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P'_g}. \tag{3}$$

Razlikujemo također korisnost u užem i širem smislu riječi, već prema tome uvedemo li u relaciju za računanje korisnosti za zbroj gubitaka gubitke u širem ili užem smislu. Tako relacija (3) daje korisnost u užem smislu, a u širem smislu relacija (4):

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_g}. \tag{4}$$

Za svaki stroj važno je da su mu gubici pri određenoj snazi što manji, tj. da ima što veću korisnost. Budući da se i istosmjerni stroj jednake snage može graditi na više načina, bilo s većim gubicima u bakru, a manjima u željezu, bilo obrnuto, to zapravo korisnost određuje koja je metoda povoljnija. Za veliku većinu strojeva koji rade konstantnom brzinom vrtnje uz konstantni napon (generatori, poredni i nezavisni motori) optimalno η postiže se kad su promjenljivi gubici, tj. oni koji ovise o struji, jednaki nepromjenljivim gubicima, tj. onima koji ne ovise o struji. To je poznato pravilo za sve strojeve kojima je jedan dio gubitaka konstantan, a drugi ovisi o kvadratu argumenta (u našem primjeru struje). Kao i ostalim strojevima, nastoji se istosmjerni stroj graditi tako da poprimi optimalno η negdje u području opterećenja od 75 do 100 % nazivne snage

6.5.3. Proračun pojedinih vrsta gubitaka

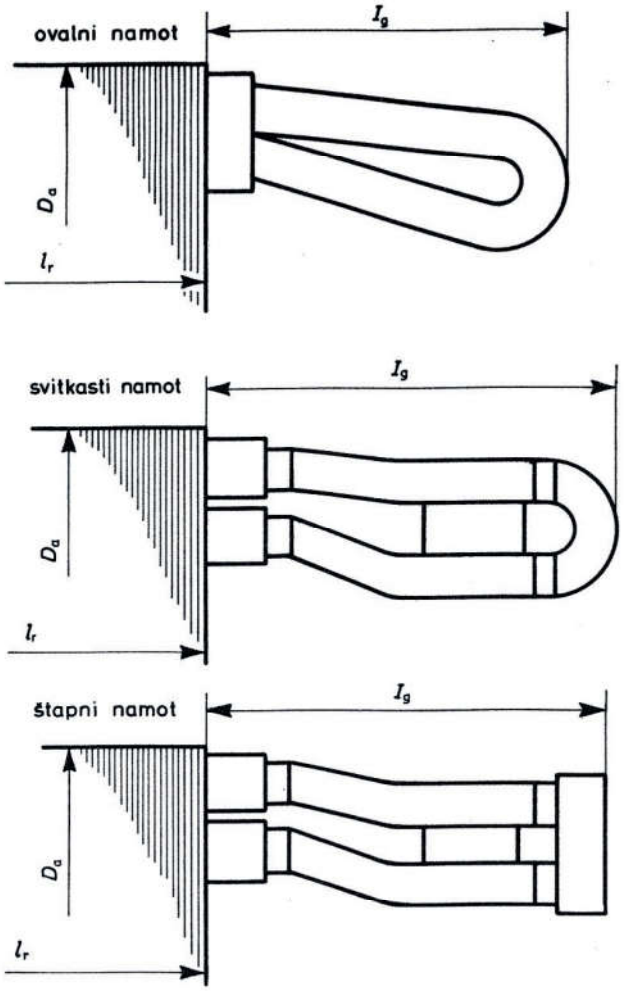
Prikazat ćemo proračun pojedinih vrsta gubitaka. Budući da se neće ići u detaljno tumačenje kako se došlo do izvjesnih, najčešće iskustvenih emprijskih faktora ili sistema računanja pojedinih detalja, navodi se glavna literatura [L 39, 5, 9, 10, 14, 34, 59] rezultati koje su provjereni u praksi, a dio podataka potječe iz iskustva autora i prakse proizvođača strojeva »Rade Končara«. Izlaganje teče redoslijedom vrsta gubitaka iz odjeljka 6.5.1.

a) i b) *Gubici trenja i ventilacije* takva su karaktera da ih je teško razlučiti. Za strojeve velike snage i specijalne namjene izvodi se obično detaljan proračun (aerodinamički)

hlađenja, određuje se ventilator ili ventilatori i izračunavaju trenja. Za veliku većinu strojeva opće namjene, a i za dio specijalne namjene, zadovoljava za te gubitke uzete zajedno kao $P_m = P_{tr} + P_v$ izraz:

$$P_m = 0{,}885\, D_a^2 k_{tr}(l_r + 2I_g)n^{1,5}[\mathrm{W}], \tag{5}$$

pri čemu je D_a promjer armature [m], l_r ukupna dužina paketa limova armature [m], I_g dužina istaka namota armature [m] (vidi sliku 2), n brzina vrtnje stroja [min^{-1}] i k_{tr} je iskustveni faktor različit za razne izvedbe ventilacije stroja [1].



Sl. 2. Skica triju najčešćih vrsta namota istosmjernog stroja s oznakom istaka glava namota l_g, ukupnom dužinom paketa limova l_r i promjenom armature D_a

Za stroj s jednim ventilatorom uzima se $k_{tr} = 1$, a za onaj s dva ventilatora $k_{tr} = 1{,}5 - 1{,}8$. Za primjer stroja bez ventilatora koji on pogoni, dakle pri vanjskoj, prisilnoj ventilaciji, račun se provodi pomoću relacije (5), ali se za k_{tr} uvrštava vrijednost od 0,2 do 0,3.

c) *Mehanički gubici na kolektoru* računaju se kao:

$$P_{km} = \mu p_č S_č v_k \ [\mathrm{W}], \tag{6}$$

gdje $p_č$ označava specifični pritisak četkica na kolektor [Nm^{-2}], v_k obodnu brzinu kolektora [ms^{-1}], $S_č$ ukupnu površinu svih četkica [m^2] i μ – koeficijent trenja između četkica i kolektora. Za razne vrste četkica može ga se naći na slici 5.2–1.

d) *Gubici u zubima željeza armature* računaju se kao:

$$P_{Fez} = 0{,}36\ v_{15} m_z B_{zgub}^2 f^{1{,}33} \cdot 10^{-2}\ [W]. \tag{7}$$

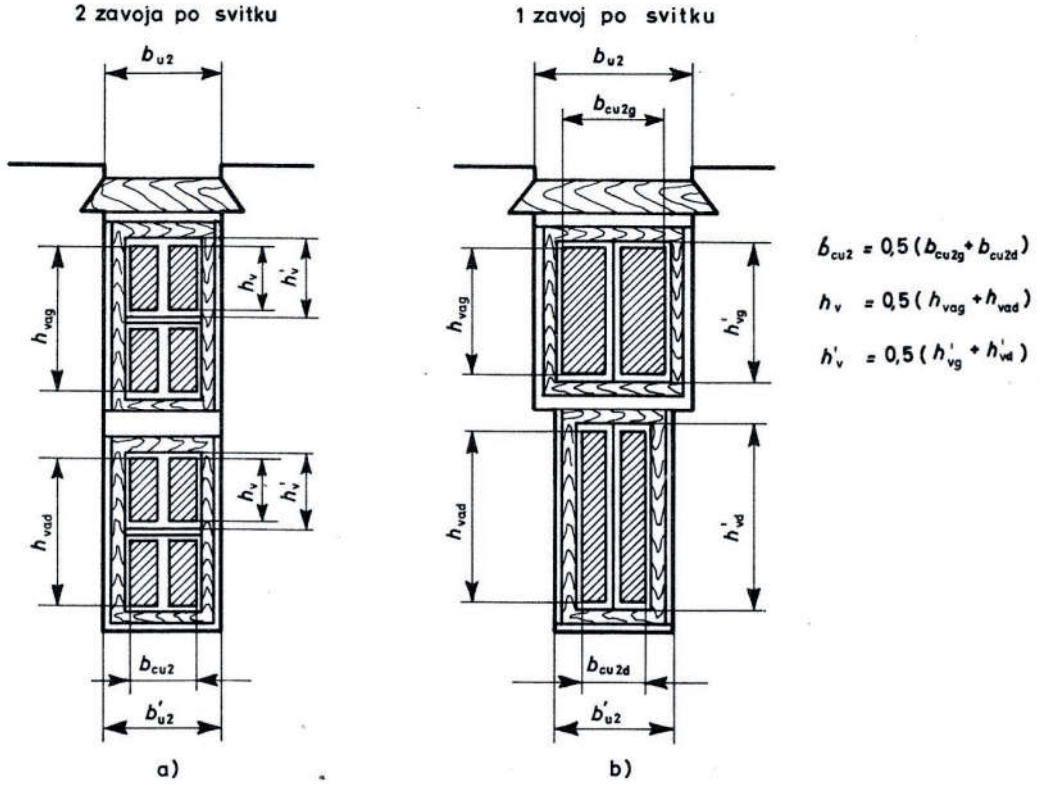
Pri tome su v_{15} specifični gubici u željezu pri indukciji od 1,5 T [Wkg^{-1}], m_z je ukupna masa željeza zubi armature [kg], B_{zgub} indukcija u zubu mjerodavna za proračun gubitaka, a f frekvencija rotora koju računamo kao:

$$f = \frac{pn}{60}\ [Hz],$$

pri čemu p znači broj pari polova. Indukcija B_{zgub} mjerodavna za račun gubitaka u zubu razlikuje se za stroj u praznom hodu i za opterećeni stroj. Za gubitke u *praznom hodu* i za utor oblika kao na slici 3.a računa se ona ovako:

$$B_{zgub} = \frac{2B_{zs} + B_{zd}}{3}. \tag{8}$$

Tu je B_{zs} indukcija na sredini zuba (gledano po visini), a B_{zd} u njegovu korijenu (dnu utora). Dvostepenim utorima, kao onome na slici 3.b, izračuna se B_{zgub} po formuli (8), ali posebno za širi i posebno za uži dio utora, pa se uzima njihova srednja vrijednost.



Sl. 3. Skica za tumačenje o računanju dodatnih gubitaka u bakru armature: a) jednostepeni ravni utor s dva zavoja po svitku, $m_v = 4$; b) dvostepeni utor s jednim zavojem (dva štapa) po svitku, $m_v = 2$. Sve potrebne dimenzije mogu se odrediti na temelju slike.

Kompenziranim strojevima tako izračunata vrijednost indukcije B_{zgub} jednaka je i u opterećenom stanju. *Nekompenziranim strojevima* povećava se pod opterećenjem vrijednost indukcije B_{zgub} dobivena računom po formuli (8) i daljnjim tumačenjem, i to tako da se ta izračunata vrijednost pomnoži još faktorom k_B, kojim se približno uzima u obzir teretom izazvano izobličenje glavnoga magnetskog polja. Faktor k_B dobiva se pomoću izraza:

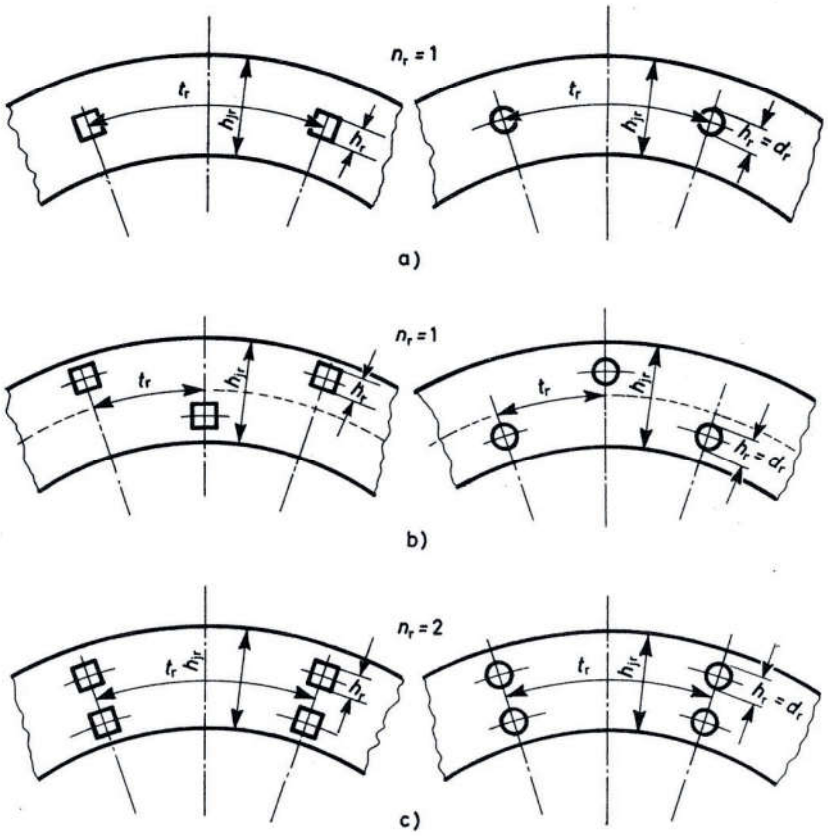
$$k_B = 1 + \frac{0{,}1\alpha z I_a}{apV_\delta} \quad [1]. \tag{9}$$

Pri tome je z broj vodiča armature, α je faktor prekrivanja glavnog pola, a broj pari paralelnih grana armaturnog namota, V_δ magnetski napon zračnog raspora pod glavnim polom, a I_a je struja armature za odgovarajući teret.

e) *Gubici u željezu jarma armature* jednostavno se računaju kad u jarmu armature nema aksijalnih kanala za hlađenje. No kad njih ima i kad mogu biti poredani na razne načine kao na slici 4, mora se to uzeti u obzir. Jedinstvenom formulom gubici se u jarmu armature računaju ovako:

$$P_{Fej} = V_{15} m_j B_{jf}^2 f^{1,33} \left[0{,}25 + \left(\frac{0{,}4 h_{jr}}{h_{jr} - n_r h_r} \right)^2 \right] \cdot 10^{-2} \ [W]. \tag{10}$$

U formuli (10) označuje m_j masu željeza jarma armature [kg], B_{jr} indukciju [T], a h_{jr} [mm] visinu jarma armature. Broj aksijalnih kanala jarma po visini je n_r, a njihova visina h_r [m] što je vidljivo sa slike 4.



Sl. 4. Skica jarma armature uz tumačenje o računanju gubitaka u jarmu armature: a) jedan red rashladnih kanala na istom promjeru $n_r = 1$; b) jedan red rashladnih kanala poredanih naizmjenično na dva promjera $n_r = 1$; c) dva reda rashladnih kanala $n_r = 2$. Kanalima okrugla oblika računa se visina h_r jednaka promjeru kanala d_r.

Masa jarma m_j izračunava se uvijek kao da jaram nije oslabljen kanalima (i kad on ima kanale). Dalje, visina jarma armature h_{jr} uvijek se uvrštava za kanalima neoslabljeni jaram (čak i kad je oslabljen). Kako se računa broj kanala n_r po visini, prepoznatljivo je sa slike 4, pa i kako se uzima visina kanala h_r kad je on okrugla oblika.

f) *Površinski gubici u željezu glavnih polova* računaju se uz pomoć izraza:

$$P_{Fep} = k_{ogub} S_{pgp} (nN)^{1,5} (\beta_{gub} k_c \tau_u B_\delta)^2 \text{ [W]}, \tag{11}$$

pri čemu se faktorom k_{ogub} uzima u obzir vrsta materijala glavnog pola, s β_{gub} konfiguracija polja pulsacije, a k_c je Carterov faktor. S_{pgp} je površina polnih papuča glavnih polova [m²], a N i τ_u – broj i korak utora armature. B_δ[T] je indukcija u zračnom rasporu glavnih polova.

Vrijednost faktora k_{ogub} za glavne polove od raznih vrsta materijala (limova) je ova:

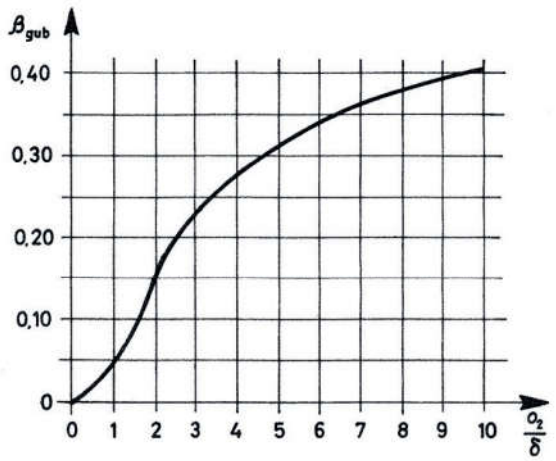
puni (lijevani) čelik 17;
dinamo-lim (1,0 mm) 4,6;
dinamo-lim (0,5 mm) 2,5;
čelični lim (1,0 mm) 2.

Ukupna površina polnih papuča S_{pgp} računa se kao:

$$S_{pgp} = \pi \alpha l_{gp} (D_a + 2\delta) \text{ [m²]}, \tag{12}$$

gdje je l_{gp} dužina jezgre glavnog pola, a δ zračni raspor glavnih polova [m].

Faktor konfiguracije polja pulsacije β_{gub} može se otčitati s dijagrama na slici 5, ovisno o omjeru $\frac{o_2}{\delta}$, pri čemu je o_2 širina otvora utora armature.



Sl. 5. Faktor konfiguracije polja pulsacije β_{gub} ovisno o omjeru otvora utora o_2 i zračnog raspora pod glavnim polom δ

g) Nazivni »istosmjerni« *gubici u bakru armature* su:

$$P_{Cua} = I_a^2 R_a \text{ [W]}. \tag{13}$$

gdje je R_a otpor armature u pogonskome toplom stanju.

h) *Gubici u namotu pomoćnih polova* su:

$$P_{cupp} = I_a^2 R_{pp} \text{ [W]}. \tag{14}$$

i) *Gubici u kompenzacijskom namotu* su:

$$P_{\mathrm{Cuk}} = I_{\mathrm{a}}^2 R_{\mathrm{k}} \ [\mathrm{W}]. \tag{15}$$

j) *Gubici u serijskome uzbudnom namotu* su:

$$P_{\mathrm{Cus}} = I_{\mathrm{a}}^2 R_{\mathrm{s}} \ [\mathrm{W}]. \tag{16}$$

k) *Dodatni gubici u armaturnom namotu nastali djelovanjem poprečnoga magnetskoga polja* računaju se prema izrazu:

$$P_{\mathrm{Cudp}} = \frac{k_{\mathrm{gub}} \xi'^4}{0{,}13\xi'^2 + \sigma_{\mathrm{g}}} P_{\mathrm{Cua}} \ [\mathrm{W}]. \tag{17}$$

Faktor ξ' (brojna visina štapa ili vodiča) može se odrediti kao:

$$\xi' = \frac{h_{\mathrm{v}}}{0{,}5} \sqrt{\frac{2 b_{\mathrm{Cu2}} \varkappa_{\mathrm{hl}} f}{(b_{\mathrm{u2}} + b'_{\mathrm{u2}}) k_{\mathrm{t}}}}. \tag{18}$$

U toj jednadžbi označuje (vidi sl. 3) h_{v} visinu vodiča [m], b_{Cu2} srednju širinu bakra u utoru; b_{u2} je širina utora kod zračnog raspora, a b'_{u2} na dnu utora. Dalje je s $\varkappa_{\mathrm{hl}}$ označena vodljivost materijala vodiča uz temperaturu od 20°C, a s k_{t} koeficijent povećanja otpora zbog zagrijavanja vodiča. Za više vodiča po visini utora m_{v} (ne dionih vodiča!) korekcija se u relaciju (17) unosi faktorom brojnosti vodiča k_{gub}, koji se računa pomoću izraza:

$$k_{\mathrm{gub}} = 0{,}0492 \ m_{\mathrm{v}}^2 \frac{l_{\check{\mathrm{z}}}}{l_{\mathrm{v}}}, \tag{19}$$

pri čemu je $l_{\check{\mathrm{z}}}$ dužina željeza paketa armature, a l_{v} dužina jednog vodiča namota armature. Iz strukture izraza (19) vidi se da on ograničuje i utjecaj potiskivanja struje na onaj dio namota u kojem potiskivanje stvarno i nastaje. Valja protumačiti i značenje veličine σ_{g}, koja se računa kao:

$$\sigma_{\mathrm{g}} = \frac{D_{\mathrm{a}}[b_{\check{\mathrm{c}}} + (u - 1)\tau_{\mathrm{k}}]}{D_{\mathrm{k}} \tau_{\mathrm{p}}}, \tag{20}$$

pri čemu je u broj strana svitaka u jednom sloju utora, $b_{\check{\mathrm{c}}}$ širina četkice po luku, τ_{k} korak kolektorske lamele, τ_{p} polni korak stroja i D_{k} je promjer kolektora.

Tako je zapravo σ_{g} omjer širine komutacijske zone jednog utora b_{zkl} i polnog koraka stroja, tj. ovisi na neki način o obliku struje u vodiču za trajanja jedne izmjenične poluperiode struje.

Valja napomenuti da se strojevima manje snage kojima je armaturni namot izrađen od vodiča s okruglom žicom, mogu zanemariti dodatni gubici nastali djelovanjem poprečnog polja. Dalje, za raspored vodiča drukčije od onih (u praksi najčešćih) na slici 3, potrebno je proračun potražiti u literaturi, npr. u [39]

l) *Dodatni gubici u armaturnom namotu nastali djelovanjem uzdužnog polja* uočljivi su tek pri indukcijama u korijenu zuba većima od 1,6 [T]. Pri tome se misli na prividnu indukciju B'_{zd}, tj. indukciju koja bi bila u zubu kad bi cijeli glavni magnetski tok prolazio zubima. Tad su ti gubici:

$$P_{\mathrm{Cudu}} = \left[\frac{h_{\mathrm{v}} \varkappa_{\mathrm{hl}} f (B'_{\mathrm{zd}} - 1{,}6)}{4 k_{\mathrm{t}} \Gamma_{\mathrm{a}}} \right]^2 \frac{l_{\check{\mathrm{z}}}}{l_{\mathrm{v}}} P_{\mathrm{Cua}} \ [\mathrm{W}]. \tag{21}$$

Sve su veličine protumačene pri dosadašnjim računanjima gubitaka, osim $\Gamma_a \left[\frac{A}{mm^2}\right]$, što je gustoća struje u namotu armature. Ako su kod nekoga konkretnog stroja različiti presjeci vodiča u gornjem i donjem sloju namota, valja gustoću struje Γ_a računati pomoću srednje geometrijske vrijednosti gustoće gornjeg i donjeg sloja.

m) *Električni gubici na kolektoru* računaju se prema izrazu:

$$P_{elč} = \Delta U_č I_a \text{ [W]}. \tag{22}$$

Pad napona na četkicama kao funkciju gustoće struje na četkicama treba poznavati za konkretnu vrstu četkica. Jedan je primjer takve ovisnosti pada napona na četkicama o gustoći struje prikazan na slici 5.3–3. Kad se ne zna ovisnost, može se približno (grubo) računati:

$$P_{elč} \doteq 2I_a \text{[W]} \tag{23}$$

jer pad napona za mnoge vrste četkica iznosi približno 1 [V] u području od malih do velikih (još dopuštenih) gustoća struje.

n) Gubitke u bakru uzbudnih namota za serijski namot već smo izračunali u relaciji (15). Gubitke u bakru namota poredne uzbude dobivamo kao:

$$P_{Cup} = i_p^2 R_{up} \text{ [W]}, \tag{24}$$

a u bakru namota nezavisne uzbude:

$$P_{Cun} = i_n^2 R_{un} \text{ [W]}. \tag{25}$$

Pri tome su i_p i i_n struje poredne i nezavisne uzbude, R_{up} je otpor porednoga, a R_{un} nezavisnoga uzbudnog namota.

Time su prikazani načini proračuna svih vrsta gubitaka.

6.5.4. Kritična visina vodiča namota armature

U armaturnim namotima s profilnim vodičima rastu dodatni gubici u bakru (zbog potiskivanja djelovanjem poprečnog polja) kako se povećava visina vodiča. Dakle, kad raste visina vodiča (uz nepromijenjenu širinu), osnovni gubici u bakru armature P_{Cua} padaju obratno proporcionalno visini (presjeku) vodiča, a dodatni gubici rastu zbog potiskivanja struje, osobito uz visoke frekvencije. Važno je da, raste li visina vodiča, *ukupni gubici* u bakru armature $P_{Cua} + P_{Cudp}$ opadaju do neke visine vodiča, a s daljnjim porastom visine vodiča ukupni gubici u armaturnom namotu rastu. Tu visinu vodiča pri kojoj ukupni gubici prestaju padati i počinju rasti nazivamo *kritična visina vodiča*. Budući da je strojevima velike snage utor sam po sebi visok, pa su i vodiči visoki, a brzohodnim su strojevima već pri srednjim snagama frekvencije visoke, u realnim je okolnostima takvo stanje da bi se, ne vodeći računa o uvodno spomenutim činjenicama, gradili strojevi s visinom vodiča većom od kritične. To se, osim u sasvim izuzetnim okolnostima izbjegava da se ne dobije stroj s nepotrebno previsokim gubicima i s povećanim problemima hlađenja.

Kritična je visina vodiča za neki konkretan primjer:

$$h_{kr} = 1{,}9 \frac{h_v}{\xi'} \sqrt[3]{\frac{l_v}{l_{\check{z}} m_v^2}} \cdot \sqrt[6]{\sigma_{g'}} \tag{26}$$

pri čemu su sve fizikalne veličine i njihov račun poznati iz dosadašnjeg izlaganja.

Zbog ipak različitog ulančenja vodiča gornjeg i donjeg stroja namota u armaturi rasipnim magnetskim poljem, kritične visine vodiča gornjeg i drugog sloja očito nisu jednake. U praksi se često sreću strojevi s nižim vodičima u gornjem i višima u donjem sloju namota. U literaturi, npr. [L 33], taj je problem djelomično obrađen. Jednako tako upotreba isprepletenih vodiča (sl. 4.5–10) pridonosi smanjenju dodatnih gubitaka u bakru armature. Pitanja točnog proračuna različitih kritičnih visina vodiča u slojevima namota armature, pa i točna interpretacija prepletenih vodiča, nisu danas dokraja riješena.

6.6. Zadaci i problemi

6.6.1. Zadaci

1. Četveropolnome istosmjernom motoru s 15 kW, 220 V i 780 min^{-1} treba, za ostvarenje glavnoga magnetskog toka, protjecanje od 5 000 A po paru polova. Srednja je dužina zavoja uzbudnog namota 950 mm, a korisnost motora je 0,88. Dopuštena gustoća struje uzbudnog namota za termičku klasu izolacije F iznosi 3 $\frac{A}{mm^2}$.

Odredite broj zavoja i pad napona na uzbudnom namotu u primjeru:
a) poredne uzbude;
b) serijske uzbude.

2. Šesteropolni istosmjerni generator od 40 kW, 230 V i 1 000 min^{-1} treba za nazivno opterećenje protjecanje nezavisne uzbude od 5 850 A po paru polova i protjecanje serijske uzbude od 1 390 A po paru polova. Srednja je dužina zavoja uzbudnih namota 980 mm, a dopuštena gustoća struje 2,9 $\frac{A}{mm^2}$. Namot nezavisne uzbude priključuje se na napon od 110 V.
Potrebno je naći minimalni presjek vodiča i broj zavoja za:
a) namot nezavisne uzbude;
b) namot serijske uzbude.

3. Poredni istosmjerni stroj napona U_1 i brzine vrtnje n_1 potrebno je premotati za napon U_2 i brzinu vrtnje n_2.

Odredite u općem slučaju broj zavoja i presjek vodiča namota armature, pomoćnih polova i uzbude za primjere:
a) nepromijenjena efikasnost hlađenja;

b) promijenjena efikasnost hlađenja uz nepromijenjeno protjecanje namota poredne uzbude;

c) promijenjena efikasnost hlađenja uz smanjenje protjecanja namota poredne uzbude.

4. Isto kao u 3. zadatku, samo za stroj s nezavisnom uzbudom.

5. Isto kao u 3. zadatku, samo za stroj sa serijskom uzbudom.

6. Isto kao u 3. zadatku, samo za stroj sa složenom uzbudom.

7. Pri prematanju istosmjernih strojeva osim određivanja broja zavoja i presjeka vodiča pojedinih namota mora se obratiti pažnja i na druge parametre i dijelove stroja od kojih neki mogu onemogućiti prematanje za zadane podatke.

   Odgovorite koji su to osnovni parametri i dijelovi stroja.

8. Četveropolni istosmjerni generator s 50 kW, 115 V i 1 500 min^{-1} ima na armaturi petljasti jednovojni namot i 48 utora s po četiri vodiča ($u = 2$), svaki presjeka od 16 mm^2. U namotu pomoćnog pola ima osam zavoja po polu i vodič presjeka od 87 mm^2. Namot poredne uzbude ima 280 zavoja po polu i vodič presjeka od 3,53 mm^2.

   Generator treba premotati za 230 V i 1 000 min^{-1}. Zbog smanjenja efikasnosti hlađenja pri nižoj brzini vrtnje moraju se gustoće struje u svim namotima smanjiti 10 %. Generator se dade premotati uz uvjet nepromijenjenog protjecanja namota poredne uzbude, jer ima mogućnosti da se poveća ukupni presjek namota poredne uzbude u međupolnom prostoru.

   Treba odrediti:

   a) broj zavoja i presjek vodiča armaturnog namota;
   b) broj zavoja i presjek vodiča namota pomoćnih polova;
   c) broj zavoja i presjek vodiča namota poredne uzbude;
   d) snagu generatora nakon prematanja.

9. Četveropolnome istosmjernom kompaundiranom motoru od 85 kW, 220 V, 435 A i 1 500 min^{-1} promjer je armature 290 mm, dužina mu je paketa limova 320 mm, a ima petljasti jednovojni namot armature u 38 utora sa šest vodiča po utoru ($u = 3$) svaki presjeka od 29 mm^2. Namot pomoćnog pola ima devet zavoja po polu i vodič presjeka od 120 mm^2. U namotu poredne uzbude je 900 zavoja po polu i vodič je promjera 1,6 mm. Namot serijske uzbude ima dva zavoja po polu i vodič presjeka od 120 mm^2. Motor ima stranu (prisilnu) ventilaciju. Stroj valja premotati u kompaundirani motor za 440 V i 1 000 min^{-1} uz nepromijenjeni odnos protjecanja poredne i serijske uzbude.

   Treba izračunati:

   a) broj zavoja i presjek vodiča namota armature i pomoćnih polova;
   b) broj zavoja i presjek vodiča namota poredne i serijske uzbude;
   c) snagu motora uz pretpostavku nepromijenjene korisnosti prije prematanja i nakon njega;
   d) srednju vrijednost napona između lamela kolektora i C-vrijednost.

10. Četveropolnom serijskom motoru od 1,8 kW, 540 V, 3,9 A i 1 000 min^{-1} promjer je armature 150 mm, dužina paketa limova 100 mm, a ima valoviti jednovojni namot armature u 25 utora sa 130 vodiča po utoru ($u = 5$), svaki promjera od 0,85 mm. U namotu pomoćnog pola je 270 zavoja po polu i vodič promjera od 1,32 mm. Serijski uzbudni namot ima 300 zavoja po polu i vodič promjera od 1,6 mm. Na kolektoru su ukupno četiri četkice dimenzija 10 × 10 mm.

Stroj je potrebno premotati u serijski motor za 300 V i 1 450 min^{-1}. Premotani stroj može izdržati povećana mehanička naprezanja nastala zbog povišenja brzine vrtnje na 1 450 min^{-1}.

Potrebno je:

a) naći broj zavoja i presjek vodiča namota armature i pomoćnih polova;

b) odrediti broj zavoja i presjek vodiča namota serijske uzbude ako dopuštena struja, s obzirom na zagrijanje kolektora, iznosi 11 A;

c) ustanoviti snagu motora uz pretpostavku nepromijenjene korisnosti prije prematanja i nakon njega;

d) odrediti broj zavoja i presjek vodiča namota serijske uzbude, te snagu motora u primjeru kad dopuštena struja, s obzirom na zagrijanje kolektora, iznosi 8 A;

e) provjeriti vrijednosti ostalih osnovnih parametara premotanog stroja i zaključiti može li se provesti prematanje na zahtijevane podatke.

11. Istosmjerni poredni generator za brzinu vrtnje od 1 000 min^{-1} ima oblik karakteristike praznog hoda:

E[V]	20	41	62	81	100	110	120	140
i_u[A]	0,5	1	1,5	2	2,6	3,1	3,7	5,7

Treba odrediti:

a) napon praznog hoda generatora kad je ukupni otpor uzbudnog kruga 32 Ω;

b) kritičnu brzinu vrtnje za samouzbudu pod a);

c) kritični otpor samouzbude za brzinu vrtnje od 1 000 min^{-1};

d) dodatni otpor u uzbudnom krugu s obzirom na stanje pod a) ako želimo pri brzini vrtnje od 1 200 min^{-1} ostvariti napon jednak kao pod a).

12. Istosmjerni poredni generator, kao uzbudnik sinhronoga generatora, ima oblik karakteristike praznog hoda:

E[V]	20	45	72	99	119	133	144	152	158	162	165
i_u[A]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

snimljene pri zračnom rasporu glavnih polova od 2,5 mm. Otpor porednoga uzbudnog namota iznosi 18,5 Ω.

Valja odrediti:

a) minimalnu i maksimalnu vrijednost otpora regulatora u porednome uzbudnom krugu za podešavanje napona generatora u praznom hodu od 40 do 150 V;

b) područje podešavanja napona generatora u praznom hodu, uz minimalni i maksimalni otpor regulatora kao pod a), uz pretpostavku da se zračni raspor glavnih polova promijeni na 1,5 mm.

13. Istosmjerni poredni generator s 35 kW, 400 V i 1000 min^{-1} ima oblik karakteristike praznog hoda:

E[V]	100	200	300	370	415	450	475	490
i_u[A]	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6

Otpor namota armature, pomoćnih plova i kompenzacije te ekvivalentni prelazni otpor na četkicama iznose ukupno 0,45 Ω.

Potrebno je nacrtati vanjsku karakteristiku $U(I)$ generatora kad mu je regulator u uzbudnom krugu podešen na napon praznog hoda od 475 V.

14. Istosmjernome porednom generatoru karakteristike praznog hoda je:

E[V]	50	100	150	200	225	240	250
i_u[A]	1	2	3,3	5,6	8	10	12

»I« – linija generatora za nazivno opterećenje, reducirana na uzbudnu struju, zadana je točkom 20 V, – 0,5 A.

Odredite otpor uzbudnog kruga tako da pri nazivnom opterećenju dobijemo na stezaljkama generatora napon od 220 V.

15. Četveropolni istosmjerni generator od 11 kW i 110 V ima oblik karakteristike praznog hoda snimljen nezavisnim uzbuđivanjem:

E[V]	30	60	85	101	110	116	121
i_u[A]	2	4	6	8	10	12	14

Generator ima dva jednaka uzbudna namota, od kojih se jedan uzbuđuje nezavisno strujom od 5 A, a drugi poredno. Regulator u porednome uzbudnom krugu podešen je tako da napon u praznom hodu bude 110 V. Otpor namota armature i pomoćnih polova te ekvivalentni prelazni otpor na četkicama iznose ukupno 0,068 Ω.

Reakcija armature, izražena u uzbudnoj struji, za nazivno opterećenje iznosi 1,5 A.

Treba odrediti:

a) vanjsku karakteristiku generatora $U(I)$ uz konstantan otpor kruga poredne uzbude;

b) karakteristiku regulacije $i_u(I)$ uz konstantan otpor kruga poredne uzbude;

c) za koliko geometrijskih stupnjeva i u kojem smjeru valja zaokrenuti četkice iz neutralne zone, da bi napon na stezaljkama u punom opterećenju bio jednak naponu praznog hoda. Protjecanje namota armature po paru polova iznosi 4 000 A, a svitak namota nezavisne uzbude ima 150 zavoja po polu. (Pretpostavlja se da će generator izdržati pogoršanje komutacije).

16. Istosmjerni generator od 110 V, 100 A i 1 450 min^{-1} ima otpor namota armature, pomoćnih polova i kompenzacije 0,08 Ω. Karakteristika praznog hoda pri brzini vrtnje od 1 450 min^{-1} je:

E[V]	29	57	82	97	106	112	118	122	126	130
i_u[A]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Potrebno je ustanoviti:

a) napon na stezaljkama pri nazivnoj struji, ako je generator poredni, a otpor je regulatora u porednome uzbudnom krugu podešen tako da napon praznog hoda bude 110 V;

b) isto kao pod a), samo u primjeru generatora s nezavisnom uzbudom.

17. Istosmjernom generatoru s 20 kW, 115 V i 1 000 min^{-1} otpor namota armature, pomoćnih polova i kompenzacije iznosi 0,062 Ω. Generator ima porednu i nezavisnu uzbudu, pri čemu svaki namot ima jednak broj zavoja. Karakteristika praznog hoda snimljena nezavisnom uzbudom pri 1 000 min^{-1} ima oblik:

E[V]	40	60	80	95	104	110	115	119	123
i_u[A]	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Odredite napon na stezaljkama generatora kad namotom nezavisne uzbude prolazi struja od 5 A, a regulator u krugu poredne uzbude je tako podešen da napon praznog hoda, pri brzini vrtnje od 1 000 min^{-1}, bude 115 V.

18. Istosmjerni kompaundirani generator od 20 kW i 220 V ima namot poredne uzbude s 400 zavoja po polu, namot serijske uzbude sa sedam zavoja po polu i (snimljen) oblik karakteristike praznog hoda:

E[V]	20	80	140	170	200	220	240	250
i_u[A]	0,25	1	1,8	2,35	3,25	4	5,1	5,9

Otpor svih namota u armaturnome strujnom krugu iznosi 0,189 Ω, a reakcija armature izražena u uzbudnoj struji je 0,8 A pri nazivnoj struji tereta. Potrebno je nacrtati vanjsku karakteristiku $U(I)$ generatora u primjeru kad je regulator u uzbudnom krugu podešen tako da napon praznog hoda bude 220 V.

19. Istosmjerni generator s 20 kW i 115 V ima namot nezavisne uzbude s 500 zavoja po polu i namot serijske uzbude sa sedam zavoja po polu. Otpor namota armature, pomoćnih polova i serijske uzbude iznosi mu 0,068 Ω. Karakteristika praznog hoda pri nazivnoj brzini vrtnje bit će:

E[V]	79	95	107	115	121	125	129	131	140
i_u[A]	4	5	6	7	8	9	10	11	14

Reakcija armature uz nazivno opterećenje izražena u uzbudnoj struji iznosi 1,5 A.

Treba odrediti:

a) vanjsku karakteristiku generatora $U(I)$, uz konstantnu uzbudnu struju, za napon praznog hoda od 115 V;

b) karakteristiku regulacije $i_u(I)$ u primjeru konstantnog napona od 115 V na stezaljkama generatora.

20. Istosmjerni protukompandirani generator sa nezavisnom i serijskom uzbudom od 13,5 kW, 45 V i 300 A ima napon praznog hoda od 70 V, te otpor namota armature, pomoćnih polova i serijske uzbude 0,0166 Ω. Namot nezavisne uzbude ima 500 zavoja po polu, a serijske uzbude dva zavoja po polu. Reakcija armature izražena u uzbudnoj struji pri nazivnom opterećenju iznosi 1,2 A. Karakteristika praznog hoda pri nazivnoj brzini vrtnje ima oblik:

E[V]	12	23	34	46	56	64	70	74	76	78
i_u[A]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Kad je regulator u krugu nezavisne uzbude podešen tako da napon praznog hoda bude 70 V, valja ustanoviti:

a) vanjsku karakteristiku $U(I)$ generatora;

b) trajnu struju kratkog spoja.

21. Istosmjerni generator od 65 kW, 250 A i 1 500 min^{-1} ima karakteristiku praznog hoda snimljenu nezavisnom uzbudom:

E[V]	133	199	248	281	300	314
i_u[A]	2	3	4	5	6	7

Generator ima dva jednaka uzbudna namota sa 600 zavoja po polu, od kojih se jedan napaja iz nezavisnog izvora strujom od 3 A, a drugi poredno. Otpor namota armature pomoćnih polova i ekvivalentni prelazni otpor na četkicama iznosi 0,079 Ω. Namot je armature valovit jednovojni s jednim zavojem između lamela kolektora. Reakcija armature izražena u uzbudnoj struji pri nazivnom opterećenju iznosi 0,65 A.

Kad je regulator u krugu poredne uzbude podešen tako da napon praznog hoda bude 300 V, potrebno je odrediti:

a) napon na stezaljkama generatora pri nazivnoj struji tereta od 250 A;

b) za koliko lamela i u kojem smjeru valja pomaknuti četkice iz neutralne zone da bi napon na stezaljkama generatora bio 280 V pri nazivnom opterećenju strujom od 250 A.

22. Istosmjerni serijski motor s 220 V, 90 A i 500 min^{-1} ima otpor namota armature, pomoćnih polova, serijske uzbude i prelaza struje na četkicama od 0,178 Ω. Karakteristika praznog hoda pri brzini vrtnje od 500 min^{-1} zadana je tablicom:

E[V]	68	136	166	185	208	220	230	240
i_u[A]	20	40	50	60	80	100	120	140

Reakcija armature pri nazivnoj struji tereta iznosi 15 A.

Potrebno je naći:

a) karakteristiku $n(I)$;

b) na koliko % moramo smanjiti uzbudnu struju šantiranjem serijskoga uzbudnog namota da bi motor imao brzinu vrtnje od 700 min^{-1} pri nazivnom naponu i nazivnoj struji. Zanemarite promjenu reakcije armature i pada napona pri šantiranju.

23. Istosmjernome porednom motoru s 22 kW, 220 V i 115 A oblik je karakteristike praznog hoda snimljen pri brzini vrtnje od 1 150 min^{-1}:

E[V]	75	140	190	220	240
i_u[A]	0,5	1	1,5	2	2,75

Otpor namota armature, pomoćnih plova, kompenzacije i ekvivalentni prelazni otpor na četkicama iznosi 0,12 Ω. Motor služi za pogon centrifugalnog ventilatora kojem se moment tereta mijenja s kvadratom brzine vrtnje. Pri priključku motora na mrežu napona od 220 V potrebno je odrediti:

a) brzinu vrtnje motora pri opterećenju strujom iz mreže od 87 A, ako je otpor u uzbudnom krugu podešen tako da brzina vrtnje motora u praznom hodu bude 1 150 min^{-1};

b) dodatni otpor u uzbudnom krugu za ostvarenje brzine vrtnje od 1 200 min^{-1} pri opterećenju motora ventilatorom.

24. Istosmjernome porednom motoru s 25 kW i 220 V u praznom je hodu brzina vrtnje 750 min^{-1}. Namot je armature valovit jednovojni s dva zavoja između kolektorskih lamela. Korisnost je motora 88 %, a otpor namota armature i pomoćnih polova iznosi 0,144 Ω. Namot poredne uzbude ima 625 zavoja po polu, a karakteristika praznog hoda pri 750 min^{-1} je:

E[V]	138	192	208	220	230	238
i_u[A]	2	3	3,5	4	4,5	5

Reakcija armature pri nazivnoj struji tereta izražena uzbudnom strujom iznosi 0,5 A

Valja odrediti:

a) karakteristiku $n(I)$;

b) za koliko kolektorskih lamela i u kojem smjeru valja pomaknuti četkice iz neutralne zone da bi motor imao 665 min^{-1} pri nazivnom opterećenju?

25. Istosmjernome serijskom motoru s 80 kW, 600 V, 150 A i 830 min^{-1} otpor namota armature, pomoćnih polova i uzbudnog namota je 0,22 Ω, a karakteristika praznog hoda pri brzini vrtnje od 830 min^{-1}:

E[V]	230	370	450	500	535	565	587	610
i_u[A]	20	40	60	80	100	130	160	200

Reakcija armature uz nazivno opterećenje izražena uzbudnom strujom iznosi 20 A.

Potrebno je ustanoviti brzinu vrtnje za 50, 100 i 150 % nazivne struje uz priključak motora na napon od 600 V.

26. Istosmjerni serijski motor s podacima kao u 25. zadatku ima serijski uzbudni namot s 25 zavoja po polu. Serijskome motoru želimo ograničiti brzinu vrtnje praznog hoda na 2000 min^{-1} pri naponu od 600 V dodavanjem porednoga uzbudnog namota.

Valja naći:

a) potrebno protjecanje porednoga uzbudnog namota;

b) brzinu vrtnje motora sa serijskom i porednom uzbudom uz priključak na napon od 600 V i opterećenje nazivnom strujom od 150 A. Zanemarite promjenu reakcije armature.

27. Istosmjernome porednom motoru s 25 kW, 110 V i 1500 min^{-1} korisnost je 0,85. Otpor namota armature i pomoćnih polova iznosi 0,034 Ω. Reakcija armature pri nazivnoj struji izražena uzbodnom strujom je 0,3 A. Karakteristika praznog hoda pri brzini vrtnje od 1500 min^{-1} mu je:

E[V]	80	100	110	121	128
i_u[A]	1,8	2,5	3	4	5

Valja naći brzinu vrtnje praznog hoda koju će postići motor pri rasterećenju s nazivnoga pogonskog stanja.

28. Četveropolni istosmjerni poredni motor s 63 kW, 220 V i 315 A ima na armaturi valoviti jednovojni namot s 43 utora i šest vodiča po utoru ($u = 3$).

Otpor namota armature i pomoćnih polova mu je 0,0387 Ω. Reakcija armature izražena uzbudnom strujom je 0,5 A. Karakteristika praznog hoda pri brzini vrtnje od 1 500 min^{-1} je u tablici:

E[V]	121	173	202	220	232	240
i_u[A]	2	3	4	5	6	7

Potrebno je odrediti:

a) karakteristiku $n(I)$;

b) karakteristiku momenta M u zračnom rasporu i momenta M_{os} na osovini ovisno o struji, ako je moment vlastitih mehaničkih gubitaka 7 Nm;

c) vanjsku karakteristiku motora $n(M_{os})$.

29. Dva jednaka istosmjerna poredna generatora bez pomoćnih polova rade paralelno na zajedničke sabirnice. Zabunom su prvom generatoru četkice pomaknute u smjeru vrtnje, a drugome suprotno smjeru vrtnje za jednak broj kolektorskih lamela.

Treba ustanoviti:

a) koji će od dva generatora preuzeti veći teret;

b) koji će od dva generatora teže komutirati, bez obzira na razliku u strujnom opterećenju, ako je pri položaju četkica u neutralnoj zoni primijećena potkomutacija.

30. Dva jednaka istosmjerna nezavisno uzbuđena generatora od 100 kW, 230 V i 1 000 min^{-1} rade paralelno na sabirnice. Njihovi uzbudni namoti spojeni su u seriju i protjecani istom strujom. Generatori su iste konstrukcije, samo je jednome zračni raspor glavnih polova 5 mm, a drgome 4 mm. Oba generatora imaju jednak otpor namota armature, pomoćnih polova, kompenzacije i ekvivalentni prelazni otpor na četkicama od 0,035 Ω.

Karakteristika je praznog hoda generatora sa zračnim rasporom glavnih polova od 5 mm pri brzini vrtnje od 1 000 min^{-1}:

E[V]	158	190	214	230	244
i_u[A]	4	5	6	7	8

U primjeru kad uzbudna struja iznosi 7 A, a na sabirnice je priključen potrošač koji uzima struju od 800 A, potrebno je odrediti:

a) struju opterećenja pojedinog generatora;

b) struju izjednačenja među generatorima;

c) napon sabirnica.

31. Istosmjerni poredni generatori sa 63 kW, 220 V i 1 000 min^{-1} i 90 kW, 220 V i 500 min^{-1} rade paralelno. Vanjske karakteristike prikazane su im na slici 19 (u rješenju).

U primjeru opterećenja sabirnica strujom od 550 A valja ustanoviti:

a) napon sabirnica;

b) struju opterećenja pojedinog generatora.

32. Istosmjerni serijski motor s 40 kW, 600 V i 1 000 min^{-1} radi paralelno na istoj osovini sa serijskim motorom od 30 kW, 600 V i 1 000 min^{-1}. Motori rade na nezasićenom dijelu karakteristike praznog hoda. U primjeru kad je ukupno opterećenje 900 Nm, potrebno je odrediti:

a) brzinu vrtnje motorâ;

b) raspodjelu opterećenja na pojedine motore.

33. Istosmjerni poredni motor s 80 kW, 220 V i 1 000 min^{-1} radi paralelno s motorom od 60 kW, 220 V i 1 000 min^{-1}. Vanjske su im karakteristike $n_1(M)$ i $n_2(M)$ prikazane su na slici 21 (u rješenju).
Kad je ukupno opterećenje 1 050 Nm valja naći:

a) brzinu vrtnje motora;

b) raspodjelu opterećenja na pojedine motore.

34. Dva jednaka istosmjerna nezavisno uzbuđena motora s 14 kW, 220 V, 75 A i 1 500 min^{-1} pogone paralelno neki radni mehanizam. Otpor namota armature, pomoćnih polova, kompenzacije i ekvivalentni prelazni otpor na četkicama iznose 0,2 Ω. Prilikom pokretanja motora u strujnom krugu armature motora M2 ostao je ukopčan dio otpora pokretača u iznosu od 0,4 Ω.

Potrebno je:

a) odrediti brzinu vrtnje praznog hoda;

b) ustanoviti brzinu vrtnje i raspodjelu opterećenja na oba motora ako je ukupno opterećenje 170 Nm;

c) nacrtati vanjske karakteristike $n(M)$ pojedinih motora i zajedničku karakteristiku za oba motora.

35. Dvama istosmjernima nezavisno uzbuđenim i kompenziranim motorima od 100 kW, 220 V i 500 A snimljene su vanjske karakteristike:

M	Nm	0	650
M1 n	min^{-1}	1 540	1 500
M2 n	min^{-1}	1 450	1 410

Oba rade paralelno pokrećući neki radni mehanizam.
U primjeru kad ukupno opterećenje iznosi 1 300 Nm potrebno je izračunati:

a) brzinu vrtnje i raspodjelu opterećenja na pojedine motore;

b) što valja učiniti da se izjednače momenti opterećenja obaju motora.

36. Dva jednaka istosmjerna nezavisno uzbuđena kompenzirana motora s 200 kW, 500 V, 440 A i 1 000 min^{-1} pogone zajednički radni mehanizam. Otpor namota armature, pomoćnih polova, kompenzacije i ekvivalentni prelazni otpor na četkicama iznose 0,07 Ω. Uzbuda je motoru M1 podešena na nazivnu vrijednost, a motoru M2 je smanjena, tako da mu glavni magnetski tok ima 95 % nazivne vrijednosti.

Treba odrediti:

a) brzinu vrtnje praznog hoda motorâ M1 i M2, te brzinu vrtnje i moment motora M2 pri nazivnome strujnom opterećenju armaturnog kruga kad motori ne rade paralelno;

b) brzinu vrtnje i raspodjelu opterećenja na oba motora u paralelnom radu ako je ukupno opterećenje 3 800 Nm.

37. Porednome istosmjernom motoru s 20 kW i 220 V gubici su praznog hoda 1 300 W, a pri nazivnom opterećenju osnovni gubici namota armature i pomoćnih polova su 1 600 W, gubici prelaza struje na kolektoru iznose mu 200 W i dodatni gubici u namotu armature 100 W.

Nađite najveću korisnost motora i opterećenje pri kojem ona nastaje.

38. Poredni istosmjerni motor s 4 kW i 220 V ima otpor namota armature i pomoćnih polova 1,3 Ω, te otpor uzbudnog namota 122,2 Ω. U praznom hodu motor uzima iz mreže struju od 2,4 A. Pad je napona na četkicama 2 V, a dodatni gubici u namotu armature pri nazivnom opterećenju su 40 W.

Valja ustanoviti:

a) nazivnu struju motora i korisnost pri toj struji;

b) maksimalnu korisnost motora i struju pri kojoj ona nastaje.

39. Osmeropolnome istosmjernom nezavisno uzbuđenom motoru nazivnih podataka:

74,5–110	461	24–40	150–250
V	A	kW	min^{-1}
110	461–471	40	250–500

promjer armature je 530 mm, dužina paketa limova 170 mm i istak armaturnog namota 90 mm. Otpor namota armature, pomoćnih polova, kompenzacije i serijske uzbude u pogonski toplom stanju iznosi 0,042 Ω. Masa željeza zubi armature je 46 kg, a jarma armature 78 kg. Specifični gubici magnetskog lima armature su 6,8 $\frac{W}{kg}$ pri indukciji od 1,5 T. Indukcija u zubu armature je 1,9 T, odnosno 0,95 T, a u jarmu armature 1, 2, T, odnosno 0,6 T za brzine vrtnje od 250 min^{-1} i 500 min^{-1}. Kolektor promjera od 450 mm ima ukupno 16 četkica dimenzija 16 × 32 mm s pritiskom od 20 kPa i koeficijentom trenja od 0,15, te 2,2 V pada napona za dvije četkice.

Otpor namota nezavisne uzbude u pogonski toplom stanju iznosi 11 Ω, a uzbudna struja je 10 A za brzine vrtnje od 150 do 250 min^{-1} (podešavanje brzine vrtnje naponom) i 2,6 A za brzinu vrtnje od 500 min^{-1} (podešavanje brzine vrtnje slabljenjem magnetskog polja). Motor ima vlastitu ventilaciju s jednim ventilatorom, a nema aksijalnih kanala za hlađenje jarma armature.

Potrebno je ustanoviti:

a) pojedinačne gubitke i korisnost motora u užem i širem smislu za brzinu vrtnje od 250 min^{-1};

b) isto kao pod a), samo za brzine vrtnje od 150 i 500 min^{-1}.

Zanemarite dodatne gubitke u armaturnom namotu i površinske gubitke u željezu glavnih polova!

40. Osmeropolnome istosmjerernom motoru brzine vrtnje od 900 min^{-1} promjer armature je 800 mm, dužina paketa limova 310 mm, a ima petljasti jednovojni namot armature s dužinom vodiča od 746 mm. Utor armature širok 11,8 mm ima pet strana svitka po utoru ($u = 5$) s jednim zavojem po lameli kolektora, a dimenzije vodiča od bakra su 1,8 × 14 mm. Kolektor promjera od 650 mm ima 460 lamela, a širina četkice (lučna mjera) je 20 mm. Motor je termičke klase izolacije F, a prividna magnetska indukcija u korijenu zuba je 2,25 T i gustoća struje namota armature 5,4 $\frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$.

Treba odrediti za namot armature:

a) kritičnu visinu vodiča;

b) dodatne gubitke zbog djelovanja poprečnoga magnetskog polja;

c) dodatne gubitke nastale djelovanjem uzdužnoga magnetskog polja.

6.6.2. Rješenja

1. Specifična vodljivost vodiča od bakra u toplom stanju za termičku klasu izolacije F (prosječna temperatura = dopušteno zagrijanje 100 °C + temperatura okoline 40 °C = 140 °C) je:

$$\varkappa_t = \varkappa_{20} \frac{1}{1 + \alpha_{Cu}(\vartheta - 20)} = 57 \frac{1}{1 + 0{,}0039 \cdot (140 - 20)} = 38{,}83 \frac{\text{Sm}}{\text{mm}^2}.$$

a) Otpor namota poredne uzbude iznosi:

$$R_m = 2p \frac{l_z w_u}{\varkappa_t q_u} = \frac{U}{i_u},$$

pri čemu je l_z dužina zavoja namota [m], w_u broj zavoja po polu, U napon uzbude i q_u je presjek vodiča [mm].

Uz protjecanje namota poredne uzbude $\Theta_o = 2w_u i_u$ A po paru polova bit će potrebni presjek vodiča:

$$q_u = \frac{p\Theta_o l_z}{\varkappa_t U} = 1{,}112 \text{ mm}^2.$$

Dobiveni presjek vodiča je minimalna vrijednost, pa pri odabiranju vodiča valja uzeti njoj jednak ili veći presjek. U našem primjeru uzimamo okrugli vodič promjera od 1,25 mm i presjeka od 1,227 mm^2.

Pri dopuštenoj gustoći struje uzbude $\Gamma_u = 3 \frac{A}{mm^2}$ uzbudna će struja biti $i_u = q_u \Gamma_u = 3{,}68$ A, a broj zavoja uzbudnog namota po polu:

$$w_u = \frac{\Theta_o}{2 \cdot i_u} = \frac{5000}{2 \cdot 3{,}68} = 679.$$

Otpor namota poredne uzbude u toplom stanju pri 140 °C je:

$$R_m = 2p \frac{w_u l_z}{\varkappa_t q_u} = 54{,}16\ \Omega.$$

Pad napona na namotu poredne uzbude iznosi:

$$U_u = i_u R_m = 3{,}68 \cdot 54{,}16 = 199{,}3\ \text{V}.$$

Budući da smo odabrali vodič presjeka većega od izračunatog, mora pad napona na namotu poredne uzbude biti manji od napona na koji se priključuje taj namot. Razlika napona od 199,3 do 220 V, u primjeru poredne ili nezavisne uzbude, poništava se na uključenom predotporu (regulatoru) uzbude. Iz provedenog određivanja parametara uzbudnog namota zaključuje se da presjek vodiča za poredni i nezavisni uzbudu ovisi o naponu uzbude, a ne o gustoći struje, dok je broj zavoja uzbudnog namota ovisan o gustoći struje.

[Broj zavoja namota poredne uzbude je 679 po polu, a pad napona na tom namotu iznosi 199,3 V.]

b) Nazivna struja motora je $I_n = 77{,}5$ A. U primjeru serijske uzbude struja uzbude i_u jednaka je struji iz mreže. Broj zavoja serijskoga uzbudnog namota po polu bit će:

$$w_{ser} = \frac{\Theta_o}{2 i_u} = \frac{\Theta_o}{2 I_n} = 32{,}25.$$

Budući da broj zavoja po polu mora biti cijeli broj, odabiremo $w_{ser} = 32$ zavoja po polu. Presjek vodiča namota serijske uzbude iznosi:

$$q_s = \frac{I_n}{\Gamma_u} = 25{,}83\ \text{mm}^2.$$

Odlučujemo se za profilni vodič dimenzija 6,3 × 4,5 mm, koji sa zaobljenjem bridova ima presjek 27,49 mm². Otpor namota serijske uzbude u toplom stanju pri 140 °C bit će:

$$R_m = \frac{2p w_{ser} l_z}{\varkappa_t q_s} = 0{,}114\ \Omega.$$

Pad napona na namotu serijske uzbude iznosi:

$$\Delta U_s = I_n R_m = 8{,}835\ \text{V}.$$

[Namot serijske uzbude ima 32 zavoja po polu, a pad napona na tom namotu je 8,835 V.]

2. a) [Minimalni presjek vodiču namota nezavisne uzbude je 4,03 mm², a broj je zavoja po polu 250.]

   b) [Minimalni presjek vodiču namota serijske uzbude je 60 mm², a tri su zavoja po polu.]

3. Porednome istosmjernom stroju uzbudni namot priključen je na stezaljke stroja. Prematanjem istosmjernih strojeva mijenjaju se samo namoti, a ostali aktivni dijelovi ostaju isti. Sve parametre stroja prije prematanja označit ćemo indeksom 1, a nakon prematanja indeksom 2.

   a) Nepromijenjena efikasnost hlađenja pri prematanju strojeva dopušta da se nakon prematanja ne mijenjaju specifična elektromagnetska opterećenja (magnetska indukcija, gustoća struje namota, strujni oblog, gustoća struje četkica itd.).

   Namot armature mora biti tako dimenzioniran da ima ukupni broj zavoja w_{a1}, u kojima se pri brzini vrtnje n_1 inducira napon E_1, te takav presjek vodiča q_{a1} pri kojem se namot zbog prolaska struje ne zagrijava više od dopuštenih granica. Uz pomoć relacije (4.1–4), za inducirani napon E_1 i E_2, uz isti broj polova i nepromijenjenu indukciju, te pretpostavku $\frac{E_2}{E_1} = \frac{U_2}{U_1}$, dobivamo broj zavoja namota armature nakon prematanja:

$$w_{a2} = w_{a1} \frac{U_2 a_2 n_1}{U_1 a_1 n_2}. \tag{A}$$

   Budući da broj zavoja između kolektorskih lamela mora biti cijeli broj, a izračunata vrijednost w_{a2} može biti bilo kakav broj, mora se konačna vrijednost broja zavoja w_{a2} nakon prematanja tako odabrati da zadovoljava uvjet $\frac{w_{a2}}{k}$ = cijeli broj (k je broj lamela kolektora).
   Iz uvjeta jednakoga ukupnog presjeka svih vodiča u utoru, dobivamo presjek vodiča nakon prematanja:

$$q_{a2} = q_{a1} \frac{U_1 a_1 n_2}{U_2 a_2 n_1}. \tag{B}$$

   Izračunati presjek vodiča q_{a2} mora se korigirati s obzirom na mogućnost punjenja utora ovisno o promjeni broja zavoja između lamela (promjena količine izolacije vodiča) i promjeni visine napona (količina izolacije prema masi).

   Namot pomoćnih polova mora biti tako dimenzioniran da mu protjecanje ne samo poništi ono od armaturnog namota već da stvori i višak protjecanja, tj. da u svitku koji komutira, napon e_{pp} nadmaši napon samoindukcije e_s. Odnos broja zavoja po polu w_{pp} namota pomoćnih polova i ukupnog broja zavoja w_a armaturnog namota (vidi 4.7.2, 22. zadatak) bit će:

$$w_{pp} = \vartheta' \frac{w_a}{4ap}.$$

Napiše li se omjer broja zavoja pomoćnog pola w_{pp1} i w_{pp2} te uvođenjem relacije (A), dobivamo broj zavoja namota pomoćnih polova po polu nakon prematanja:

$$w_{pp2} = w_{pp1}\frac{U_2 n_1}{U_1 n_2}. \tag{C}$$

Prematanjem se mijenja napon samoindukcije e_s svitka u komutaciji, pa redovito nakon prematanja valja korigirati zračni raspor pomoćnih polova.

Iz uvjeta jednakoga ukupnog presjeka svih vodiča na polu dobivamo presjek vodiča namota pomoćnog pola nakon prematanja:

$$q_{pp2} = q_{pp1}\frac{U_1 n_2}{U_2 n_1}. \tag{D}$$

Namot poredne uzbude valja tako dimenzionirati da osigurava potrebno protjecanje Θ_0 koje stvara glavni magnetski tok potreban da se inducira zadani napon u namotu armature i da ima takav presjek vodiča q_{u1} pri kojem se namot ne pregrijava više od dopuštene granice. Presjek vodiča porednoga uzbudnog namota ovisan je o naponu na koji se taj namot priključuje (a ne o gustoći struje), dok broj zavoja porednoga uzbudnog namota ovisi o gustoći struje. Potrebni presjek vodiča porednoga uzbudnog namota (vidi 1. zadatak) određen je relacijom:

$$q_u = \frac{p\Theta_0 l_z}{\varkappa U}.$$

Iz omjera presjekâ vodiča porednoga uzbudnog namota prije prematanja i nakon njega dobivamo potrebni presjek vodiča nakon prematanja:

$$q'_{u2} = q_{u1}\frac{U_1}{U_2} \tag{E}$$

Na osnovi izračunatoga poželjnog presjeka vodiča q'_{u2} odabire se iz kataloga vodič stvarnog presjeka q_{u2}, obično nešto malo veći od presjeka q'_{u2}. Iz uvjeta nepromijenjenog protjecanja namota poredne uzbude prije prematanja i nakon njega dobivamo broj zavoja namota poredne uzbude po polu nakon prematanja:

$$w_{u2} = w_{u1}\frac{U_2 q'_{u2}}{U_1 q_{u2}} \tag{F}$$

[Broj zavoja i presjek vodiča armaturnog namota određeni su izrazima (A) i (B), broj zavoja i presjek vodiča namota pomoćnih polova izrazima (C) i (D), a presjek vodiča i broj zavoja namota poredne uzbude izrazima (E) i (F).]

b) Promijenjena efikasnost hlađenja u prematanju strojeva znači da nakon prematanja valja promijeniti specifična elektromagnetska opterećenja. Zbog pada efikasnosti hlađenja valja smanjiti gustoće struje svim namotima i strujni oblog armaturnom namotu, a pri porastu efikasnosti

ventilacije ti se parametri mogu povećavati. U uvjetima prematanja kad je moguć smještaj premotanog namota poredne uzbude u međupolni prostor, može se prematanje provesti uz nepromijenjeno protjecanje namota poredne uzbude, tj. uz nepromijenjenu magnetsku indukciju i glavni magnetski tok.

Broj zavoja i presjek vodiča *namota armature i pomoćnih polova* određuju se istim postupkom kao u primjeru nepromijenjene efikasnosti hlađenja, pa (vrijede relacije (A), (B), (C) i (D), jer se ne može promijeniti ukupni presjek svih vodiča u utoru armature. Utjecaj promjene efikasnosti hlađenja uzima se u obzir dopuštenom gustoćom struje, tj. dopuštenom strujom opterećenja premotanog stroja.

Presjek vodiča *namota poredne uzbude* određen je izrazom (E), a broj zavoja po polu nakon prematanja, uz upotrebu relacije (F), bit će:

$$w_{u2} = w_{u1} \frac{U_2 q'_{u2} \Gamma_{u1}}{U_1 q_{u2} \Gamma_{u2}}. \qquad \text{(G)}$$

Iz relacije (G) vidi se da u primjeru smanjenog hlađenja (prematanje stroja s vlastitom ventilacijom na nižu brzinu vrtnje) moramo povećati ukupni presjek namota poredne uzbude po polu u omjeru $\frac{\Gamma_{u1}}{\Gamma_{u2}}$. Ako nema mogućnosti da se povećani ukupni presjek namota poredne uzbude smjesti u međupolni prostor, stroj se ne može tako premotati da zadovolji uvjet konstantnog protjecanja namota poredne uzbude.

[Broj zavoja i presjek vodiča namota armature određeni su izrazima (A) i (B), broj zavoja i presjek vodiča namota pomoćnih polova izrazima (C) i (D), presjek vodiča namota poredne uzbude izrazom (E), a broj zavoja namota poredne uzbude izrazom (G).]

c) Kad nema mogućnosti da se poveća ukupni presjek namota poredne uzbude, potrebno je odrediti još moguće (smanjeno) protjecanje porednoga uzbudnog namota nakon prematanja. Uz poznato protjecanje porednoga uzbudnog namota Θ_{o1}, te poznate gustoće struje uzbude Γ_{u1} prije prematanja i Γ_{u2} nakon njega, smanjeno protjecanje porednoga uzbudnog namota bit će:

$$\Theta_{o2} = \Theta_{o1} \frac{\Gamma_{u2}}{\Gamma_{u1}}.$$

U dosad provedenim razmatranjima prematanja, protjecanje uzbude, glavni magnetski tok i indukcija u zračnom rasporu glavnih polova bili su konstantne veličine. S opadanjem protjecanja uzbudnog namota smanjuje se indukcija i glavni magnetski tok (prema karakteristici), pa to smanjenje valja uzeti u obzir kad se određuju parametri za prematanje stroja. Zato se prije prematanja, uz brzinu vrtnje n_1, mora izračunati ili ispitivanjem odrediti inducirani napon E_3 za protjecanje uzbude Θ_{o1} i inducirani napon E_4 za protjecanje uzbude Θ_{o2}. Omjer induciranih napona $\frac{E_4}{E_3}$ određuje smanjenje indukcije u zračnom rasporu glavnih polova.

Iz omjera relacije (4.1–4) za inducirani napon E_1 prije prematanja i E_2 nakon prematanja, uz isti broj polova i promijenjenu indukciju u omjeru $\frac{E_4}{E_3}$, te pretpostavku $\frac{E_2}{E_1} = \frac{U_2}{U_1}$, dobivamo za broj zavoja *namota armature* nakon prematanja:

$$w_{a2} = w_{a1} \frac{U_2 a_2 n_1 E_3}{U_1 a_1 n_2 E_4}, \tag{H}$$

a odabrana vrijednost w_{a2} mora zadovoljavati uvjet $\frac{w_{a2}}{k}$ = cijeli broj.

Iz uvjeta jednakoga ukupnog presjeka svih vodiča u utoru dobivamo presjek vodiča armaturnog namota nakon prematanja:

$$q_{a2} = q_{a1} \frac{U_1 a_1 n_2 E_4}{U_2 a_2 n_1 E_3} = q_{a1} \frac{w_{a1}}{w_{a2}}. \tag{I}$$

Pri određivanju stvarnog presjeka q_{a2} treba uzeti u obzir napomene uz izraz (B).

Iz omjera broja zavoja pomoćnog pola w_{pp1} i w_{pp2}, te uz pomoć relacije (H), izlazi broj zavoja *namota pomoćnog pola* po polu:

$$w_{pp2} = w_{pp1} \frac{U_2 n_1 E_3}{U_1 n_2 E_4}. \tag{K}$$

Iz uvjeta jednakoga ukupnog presjeka svih vodiča na polu, dobivamo presjek vodiča namota pomoćnog pola nakon prematanja:

$$q_{pp2} = q_{pp1} \frac{U_1 n_2 E_4}{U_2 n_1 E_3}. \tag{L}$$

Utjecaj promjene efikasnosti hlađenja uzima se u obzir dopuštenom gustoćom struje, tj. dopuštenom strujom opterećenja premotanog stroja.

Iz omjera presjeka vodiča *namota poredne uzbude*, uz protjecanje Θ_{o1} prije prematanja i Θ_{o2} nakon prematanja, te $\frac{\Theta_{o1}}{\Theta_{o1}} = \frac{\Gamma_{u1}}{\Gamma_{u2}}$, izlazi potrebni presjek vodiča nakon prematanja:

$$q'_{u2} = q_{u1} \frac{U_1 \Gamma_{u2}}{U_2 \Gamma_{u1}}. \tag{M}$$

Pri određivanju stvarnog presjeka q_{u2} valja uzeti u obzir napomenu uz izraz (E).

Iz uvjeta promijenjenog protjecanja, s Θ_{o1} na Θ_{o2}, bit će, uz $\frac{\Theta_{o1}}{\Theta_{o2}} = \frac{\Gamma_{u1}}{\Gamma_{u2}}$, broj zavoja namota poredne uzbude po polu:

$$w_{u2} = w_{u1} \frac{U_2 \Gamma_{u1} q'_{u2}}{U_1 \Gamma_{u2} q_{u2}}. \tag{G}$$

Vidi se iz izraza (M) i (G) da, u okolnostima smanjenog hlađenja i protjecanja poredne uzbude proporcionalnog smanjenju gustoće struje, ostaje isti ukupni presjek namota poredne uzbude po polu.
[Broj zavoja i presjek vodiča namota armature određeni su izrazima (H) i (I), broj zavoja i presjek vodiča namota pomoćnih polova izrazima (K) i (L), a presjek i broj zavoja namota poredne uzbude izrazima (M) i (G).]

4. [Za prematanje nezavisno uzbuđenog stroja u raznim uvjetima vrijede sve relacije kao u 3. zadatku, s tim što se u izraze za broj zavoja i presjek vodiča namota nezavisne uzbude umjesto napona U_1 mora uvrstiti napon nezavisne uzbude prije prematanja, odnosno umjesto napona U_2 napon nezavisne uzbude nakon prematanja.]

5. Serijskom stroju su svi namoti protjecani strujom armaturnoga strujnog kruga. Broj zavoja i presjek vodiča namota armature i pomoćnih polova u zadanim uvjetima određuje mu se istim postupkom i istim jednadžbama kao porednom stroju u 3. zadatku. Razlika u prematanju serijskog i porednog stroja pojavljuje se jedino u određivanju broja zavoja i presjeka vodiča serijskoga uzbudnog namota. Serijskome uzbudnom namotu presjek je uvjetovan dopuštenom gustoćom struje armature, a broj zavoja još zadanim protjecanjem.

   a) Iz uvjeta konstantnog protjecanja serijskoga uzbudnog namota prije prematanja i nakon njega, uz nepromijenjenu efikasnost hlađenja (iste gustoće struje prije prematanja i nakon njega), pomoću izraza (B) iz 3. zadatka dobivamo broj zavoja namota serijske uzbude po polu nakon prematanja:

$$w_{ser2} = w_{ser1} \frac{U_2 n_1}{U_1 n_2}. \tag{N}$$

   Iz uvjeta jednakoga ukupnog presjeka svih vodiča na polu (nepromijenjeno protjecanje uz istu gustoću struje) izlazi presjek vodiča namota serijske uzbude nakon prematanja:

$$q_{s2} = q_{s1} \frac{U_1 n_2}{U_2 n_1}. \tag{O}$$

   [Broj zavoja i presjek vodiča namota armature određeni su izrazima (A) i (B) u 3. zadatku, broj zavoja i presjek vodiča namota pomoćnih polova izrazima (C) i (D) iz istog zadatka, a broj zavoja i presjek vodiča namota serijske uzbude izrazima (N) i (O).]

   b) Prematanje uz promjenu (smanjenje) efikasnosti hlađenja i nepromijenjeno protjecanje namota serijske uzbude (konstantna indukcija u zračnom rasporu glavnih polova), može se provesti u primjeru gdje je moguć smještaj premotanog (povećanog presjeka!) namota serijske uzbude u međupolni prostor.

   Iz uvjeta konstantnog protjecanja serijskoga uzbudnog namota prije prematanja i nakon njega, uz upotrebu izraza (B) iz 3. zadatka i

pretpostavke $\frac{\Gamma_{s1}}{\Gamma_{s2}} = \frac{\Gamma_{a1}}{\Gamma_{a2}}$, dobivamo broj zavoja namota serijske uzbude po polu nakon prematanja:

$$w_{ser2} = w_{ser1} \frac{U_2 n_1 \Gamma_{s1}}{U_1 n_2 \Gamma_{s2}} \tag{P}$$

i presjek vodiča namota serijske uzbude nakon prematanja:

$$q_{s2} = q_{s1} \frac{U_1 n_2}{U_2 n_1}. \tag{O}$$

Iz izraza (P) i (O) vidi se da u primjeru smanjenja efikasnosti hlađenja moramo povećati ukupni presjek namota serijske uzbude po polu u omjeru $\frac{\Gamma_{s1}}{\Gamma_{s2}}$. Dakle, povećanje je uzbudnog namota jednako kao u primjeru stroja s porednom uzbudom.

[Broj zavoja i presjek vodiča namota armature određeni su izrazima (A) i (B) u 3. zadatku, broj zavoja i presjek vodiča namota pomoćnih polova izrazima (C) i (D) iz istog zadatka, a broj zavoja i presjek vodiča namota serijske uzbude izrazima (P) i (O).]

c) Kad nema mogućnosti da se poveća ukupni presjek namota serijske uzbude, potrebno je smanjiti protjecanje namota serijske uzbude. Uz poznate podatke o protjecanju serijskoga uzbudnog namota Θ_{s1} i o gustoći struje Γ_{s1} prije prematanja i Γ_{s2} nakon njega, bit će smanjeno protjecanje serijskoga uzbudnog namota:

$$\Theta_{s2} = \Theta_{s1} \frac{\Gamma_{s2}}{\Gamma_{s1}}.$$

Jednakim postupkom kao u 3. zadatku valja pri brzini vrtnje n_1 odrediti inducirani napon E_3 za protjecanje uzbude Θ_{s1} i inducirani napon E_4 za protjecanje uzbude Θ_{s2}. Uz $\frac{\Theta_{s1}}{\Theta_{s2}} = \frac{\Gamma_{s1}}{\Gamma_{s2}} = \frac{\Gamma_{a1}}{\Gamma_{a2}}$ izlazi broj zavoja po polu namota serijske uzbude:

$$w_{ser2} = w_{ser1} \frac{U_2 n_1 E_3}{U_1 n_2 E_4} \tag{R}$$

i presjek vodiča namota serijske uzbude:

$$q_{s2} = q_{s1} \frac{U_1 n_2 E_4}{U_2 n_1 E_3}. \tag{S}$$

[Broj zavoja i presjek vodiča namota armature određeni su izrazima (H) i (I) u 3. zadatku, broj zavoja i presjek vodiča namota pomoćnih polova izrazima (K) i (L) u istom zadatku, a broj zavoja i presjek vodiča namota serijske uzbude izrazima (R) i (S).]

6. [Stroju sa složenom uzbudom namot armature i onaj pomoćnih polova prematraju se jednakim postupkom kao u 3. zadatku. Namot poredne uzbude premata se kao u 3. zadatku, namot nezavisne uzbude kao u 4. zadatku i namot serijske uzbude kao u 5. zadatku.]

7. [Kad se prematraju istosmjerni strojevi, mora se pripaziti na ove parametre i dijelove stroja:
   a) gustoću struje četkica za trajno i kratkotrajno opterećenje, posebno pri prematanju na niži napon;
   b) zagrijanje kolektora, osobito pri prematanju na niži napon, a za samoventilirane strojeve i na nižu brzinu vrtnje;
   c) vrijednost srednjeg i maksimalnog napona između kolektorskih lamela, posebno pri prematanju na viši napon;
   d) iznos napona samoindukcije svitka u komutaciji (ili C-vrijednost), posebno pri prematanju na veće struje i više brzine vrtnje;
   e) smanjenje gustoćâ struje pri prematanju na niže brzine vrtnje;
   f) povećanje mehaničkih sila u prematanju na veće brzine vrtnje, osobito za bandažu glava namota armature, klin armaturnog utora i kolektorske lamele;
   g) spojne vodove između svitaka namota i priključne kutije, posebno pri prematanju na veće struje;
   h) promjenu punjenja utora armature s obzirom na količinu izolacije vodiča i količinu izolacije prema masi, posebno pri prematanju na viši napon.]

8. Broj kolektorskih lamela iznosi $k = Nu = 96$, broj zavoja namota armature prije prematanja je $w_{a1} = \frac{N z'}{2} = 96$, a broj pari paralelnih grana za petljasti jednovojni namot (prije prematanja) je $a_1 = p = 2$.
   a) Premotanom stroju ne mijenjamo vrstu namota armature, pa je $a_2 = a_1 = p = 2$.
   Novi broj zavoja namota armature prema izrazu (A) iz 3. zadatka bit će:

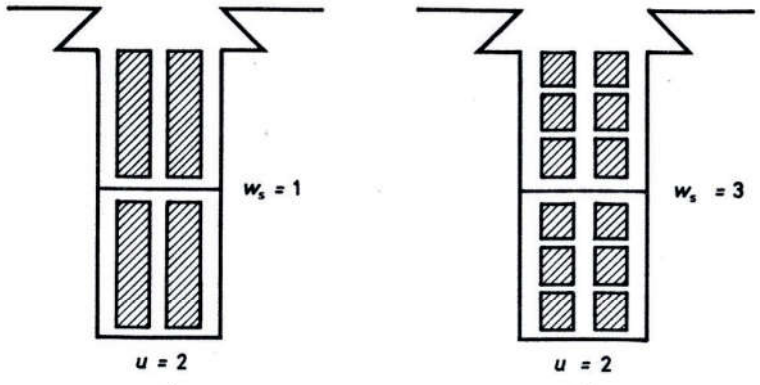
$$w_{a2} = w_{a1} \frac{U_2 a_2 n_1}{U_1 a_1 n_2} = 288.$$

   Broj zavoja između kolektorskih lamela nakon prematanja je $w_s = \frac{w_{a2}}{k} = 3$, pa se namot može izvesti kao petljasti jednovojni. Valoviti namot nakon prematanja ne dolazi u obzir iz dva razloga. Prvo, uz zadani broj utora, lamela i polova valoviti jednovojni namot nije izvediv, i drugo, ako se odabere manjkavi namot, trebalo bi imati 1,5 zavoja između kolektorskih lamela, a to je nemoguće.

   Presjek vodiča namota armature prema izrazu (B) iz 3. zadatka iznosi:

$$q_{a2} = q_{a1} \frac{U_1 a_1 n_2}{U_2 a_2 n_1} = 5{,}33 \text{ mm}^2.$$

Shematski prikaz rasporeda vodiča u utoru prije prematanja vidi se na slici 1.a, a nakon prematanja na slici 1.b. Pregledom utora utvrđeno je da se u njega može smjestiti vodič izračunatog presjeka.
[Nakon prematanja namot armature ima 288 zavoja, a presjek vodiča mu je 5,33 mm².]



Sl. 1.

b) Broj zavoja namota pomoćnih polova po polu nakon prematanja prema relaciji (C) iz 3. zadatka bit će:

$$w_{pp2} = w_{pp1}\frac{U_2 n_1}{U_1 n_2} = 24.$$

Presjek vodiča namota pomoćnih polova poslije prematanja prema izrazu (D) iz 3. zadatka iznosi:

$$q_{pp2} = q_{pp1}\frac{U_1 n_2}{U_2 n_1} = 29 \text{ mm}^2.$$

[Nakon prematanja namot pomoćnih polova ima 24 zavoja po polu, a presjek vodiča mu je 29 mm².]

c) Potrebni presjek vodiča namota poredne uzbude nakon prematanja prema izrazu (E) iz 3. zadatka je:

$$q'_{u2} = q_{u1}\frac{U_1}{U_2} = 1{,}765 \text{ mm}^2,$$

a odabrani vodič promjera od 1,5 mm ima presjek $q_{a2} = 1{,}767$ mm². Broj zavoja po polu namota poredne uzbude nakon prematanja, uz smanjenu gustoću struje za 10 %, prema izrazu (F) iz 3. zadatka bit će:

$$w_{u2} = w_{u1}\frac{U_2 q'_{u2} \Gamma_{u1}}{U_1 q_{u2} \Gamma_{u2}} = 621{,}52.$$

Odabiremo 622 zavoja po polu.
[Nakon prematanja namot poredne uzbude ima 622 zavoja po polu, a presjek vodiča mu je 1,767 mm².]

d) Iz omjera snage generatora P_{21} prije prematanja i P_{22} nakon njega, uz nepromijenjenu magnetsku indukciju u zračnom rasporu glavnih polova i promjenu strujnog obloga namota armature proporcionalno promjeni gustoće struje, dobivamo snagu generatora nakon prematanja:

$$P_{22} = P_{21}\frac{n_2\Gamma_{a2}}{n_1\Gamma_{a1}} = 30 \text{ kW}.$$

[Snaga generatora poslije prematanja je 30 kW.]

9. a) [$w_{a2} = 342$ zavoja, $w_{s2} = 3$ zavoja, $q_{a2} = 9{,}66$ mm^2, $w_{pp2} = 27$ zavoja po polu i $q_{pp2} = 40$ mm^2]

b) [$q'_{u2} = 1{,}0053$ mm^2, vodič promjera od 1,18 mm, $q_{u2} = 1{,}094$ mm^2, $w_{u2} = 1\,655$ zavoja po polu, $w_{ser2} = 6$ zavoja po polu i $q_{s2} = 40$ mm^2]

c) [$P_{22} = 56{,}7$ kW]

d) [$e_k = 15{,}44$ V, $C = 119$]

10. Uvodno određujemo broj lamela kolektora k, broj zavoja w_{a1} i broj pari paralelnih grana armaturnog namota a_1, ukupnu površinu četkica $S_č$, te presjeke vodiča namota armature q_{a1}, pomoćnih polova q_{pp1} i serijske uzbude q_{s1}: $k = 125$, $w_{a1} = 1\,625$, $a_1 = 1$, $S_č = 4$ cm^2, $q_{a1} = 0{,}5674$ mm^2, $q_{pp1} = 1{,}368$ mm^2 i $q_{s1} = 2{,}01$ mm^2.

a) Premotanom stroju ne mijenjamo vrstu namota armature, pa je $a_2 = a_1 = 1$. Broj zavoja namota armature prema izrazu (A) iz 3. zadatka iznosi:

$$w_{a2} = w_{a1}\frac{U_2 a_2 n_1}{U_1 a_1 n_2} = 622{,}6.$$

Uzimamo broj zavoja armaturnog namota $w_{a2} = 625$, pa je $w_s = 5$. Presjek vodiča namota armature, prema izrazu (B) iz 3. zadatka je:

$$q_{a2} = q_{a1}\frac{U_1 a_1 n_2}{U_2 a_2 n_1} = 1{,}481 \text{ mm}^2.$$

Odlučujemo se za vodič promjera od 1,4 mm s presjekom $q_{a2} = 1{,}539$ mm^2. Broj zavoja namota pomoćnih polova po polu prema relaciji (C) iz 3. zadatka bit će:

$$w_{pp2} = w_{pp1}\frac{U_2 n_1}{U_1 n_2} = 103{,}44.$$

Odabiremo 103 zavoja po polu.

Presjek vodiča namota pomoćnih polova, prema izrazu (D) iz 3. zadatka iznosi:

$$q_{pp2} = q_{pp1}\frac{U_1 n_2}{U_2 n_1} = 3{,}57 \text{ mm}^2.$$

Odabiremo vodič promjera od 2,12 mm s presjekom $q_{pp2} = 3{,}53$ mm^2.

[Nakon prematanja armaturni namot ima 625 zavoja i vodič promjera od 1,4 mm s presjekom od 1,539 mm^2, a namot pomoćnih polova 103 zavoja i vodič promjera od 2,12 mm s presjekom od 3,53 mm^2.]

b) Gustoća je struje namota armature prije prematanja:

$$\Gamma_{a1} = \frac{I_{a1}}{2a_1 q_{a1}} = 3{,}44 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}.$$

Struja armaturnoga strujnog kruga nakon prematanja, uz istu gustoću struje, iznosi $I_{a2} = 2a_2\Gamma_{a1}q_{a2} = 10{,}18$ A i manja je od dopuštene struje s obzirom na zagrijavanje kolektora. Broj zavoja namota serijske uzbude po polu, uz nepromijenjeno protjecanje uzbude prije prematanja i nakon njega iznosi:

$$w_{ser2} = w_{ser1}\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = 115,$$

a potrebni presjek vodiča, uz nepromijenjenu gustoću struje, bit će:

$$q_{s2} = q_{s1}\frac{I_{a2}}{I_{a1}} = 5{,}247 \text{ mm}^2.$$

Odabiremo vodič promjera od 2,65 mm i presjeka $q_{s2} = 5{,}515$ mm². [$w_{ser2} = 115$, vodič promjera od 2,65 mm i presjeka od 5,515 mm²]

c) Korisnost motora prije prematanja iznosi:

$$\eta = \frac{P_{21}}{U_1 I_{a1}} = 0{,}855,$$

a snaga je motora nakon prematanja:

$$P_{22} = U_a I_{a2}\eta = 2{,}61 \text{ kW}.$$

[$P_{22} = 2{,}61$ kW]

d) Kad jedan od namota ili kolektor ograničava struju serijskom stroju treba stroj premotati tako da i uz tu ograničenu (smanjenu) struju pri naponu U_2 on ima zahtijevanu brzinu vrtnje n_2. To, dalje, znači da smanjenom strujom (i povećanim brojem zavoja) moramo ostvariti isto protjecanje uzbude kao što je bilo prije prematanja.

Broj zavoja namota serijske uzbude po polu, uz nepromijenjeno protjecanje prije prematanja i nakon njega iznosi:

$$w_{ser2} = w_{ser1}\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = 300\,\frac{3{,}9}{8} = 146,$$

a potrebni presjek vodiča, uz nepromijenjenu gustoću struje, bit će:

$$q_{s2} = q_{s1}\frac{I_{a2}}{I_{a1}} = 2{,}01\,\frac{8}{3{,}9} = 4{,}123 \text{ mm}^2.$$

Odabiremo vodič promjera od 2,36 mm i presjeka od 4,374 mm². Snaga je motora nakon prematanja:

$$P_{22} = U_2 I_{a2}\eta = 2{,}05 \text{ kW}.$$

[$w_{ser2} = 146$, vodič promjera od 2,36 mm i presjeka od 4,374 mm², te $P_{22} = 2{,}05$ kW]

e) Osnovni parametri i dijelovi stroja koje valja provjeriti premotanom stroju nabrojeni su u rješenju 7. zadatka, a provjera se obavlja na primjeru snage od 2,61 kW.

- Gustoća struje četkica u trajnom radu uz struju od 10,18 A iznosi 5,09 $\frac{A}{cm^2}$ i manja je od dopuštenih vrijednosti, koje za elektrografitne četkice iznose od 10 do 12 $\frac{A}{cm^2}$. Kratkotrajno opterećenje nije posebno zadano, pa se smatra (prema propisima) da je ono 1,6 I_a. Pri tom opterećenju gustoća je struje četkica 8,15 $\frac{A}{cm^2}$, a to je također manje od dopuštenih vrijednosti, koje su za elektrografitne četkice od 17 do 20 $\frac{A}{cm^2}$.
- Zagrijanje kolektora uz struju armature od 10,18 A ne premašuje dopuštene vrijednosti jer zadana dopuštena struja s obzirom na zagrijanje kolektora iznosi 11 A.
- Vrijednosti srednjeg i maksimalnog napona između lamela kolektora nije potrebno provjeravati jer se stroj premata na niži napon.
- C-vrijednost, kao pokazatelj komutacijskog naprezanja stroja, prema izrazu (4.4–17) bit će 23,1, a to je manje od dopuštene vrijednosti, koja prema slici 4.4–10. za promjer armature od 150 mm iznosi $C = 80$.
- Smanjenje gustoća struja nije potrebno jer se stroj premata na veću brzinu vrtnje.
- Presjek spojnih vodova između svitaka namota i priključne kutije mora se povećati u omjeru porasta struje.
- Koeficijent punjenja utora praktički se nije promijenio jer ukupni presjek svih lakom izoliranih vodiča u utoru iznosi prije prematanja (uz promjer izoliranog vodiča od 0,937 mm) 89,64 mm², a nakon prematanja (uz promjer izoliranog vodiča od 1,506 mm) 89,06 mm². Premotanom stroju se ne mijenja debljina izolacije prema masi.

[Na osnovi provjere ostalih parametara i dijelova stroja zaključuje se da se zadani serijski motor može premotati za potrebne podatke.]

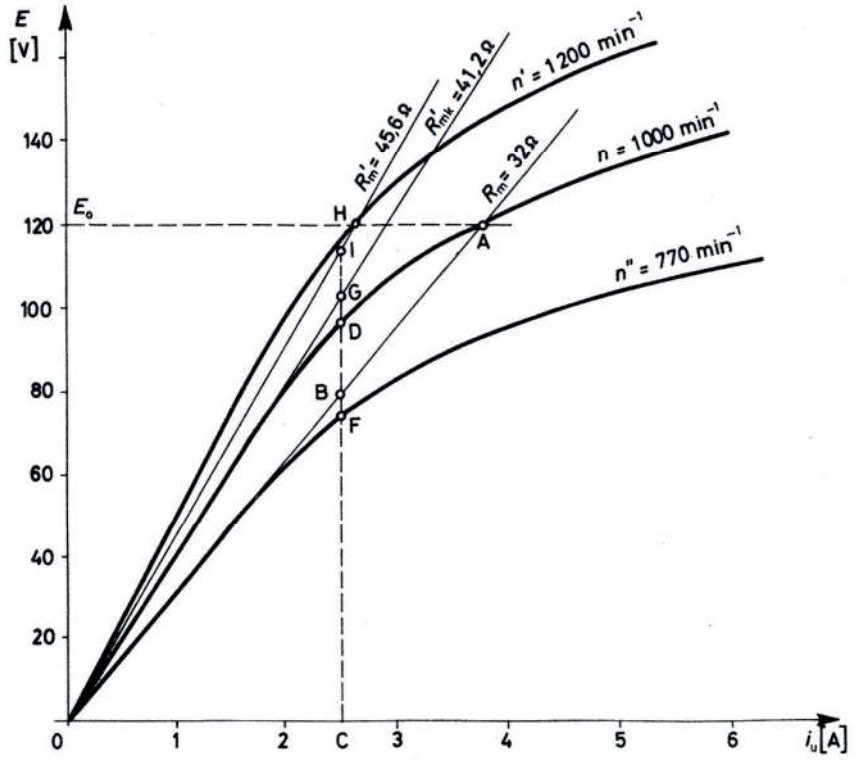
11. a) Na slici 2. prikazana je karakteristika praznog hoda za brzinu vrtnje od 1 000 min^{-1} i pravac otpora samouzbude R_m za vrijednost otpora porednoga uzbudnog kruga od 32 Ω. Pravac otpora samouzbude određen je točkom O (ishodištem, jer nema druge uzbude osim poredne) i točkom B. Koordinate točke B određene su nekom uzbudnom strujom (npr. 2,5 A) i padom napona na otporu uzbudnog kruga pri toj struji (za otpor od 32 Ω pad je napona 80 V). Napon E_0 u praznom hodu do kojeg će se uzbuditi poredni generator određen je presjecištem karakteristike praznog hoda s pravcem otpora samouzbude (točka A na sl. 2). Vrijednost napona praznog hoda E_0 otčitana s karakteristike praznog hoda za točku A je 120 V.

$$[E_0 = 120 \text{ V}]$$

b) Kritičnu brzinu vrtnje za samouzbudu uz otpor uzbudnog kruga $R_m = 32\ \Omega$ dobivamo crtanjem krivulje praznog hoda za brzinu vrtnje n'', kojoj je pravac otpora samouzbude tangenta u ishodištu. Kritična brzina vrtnje, uz oznake prema slici 2, iznosi:

$$n'' = n\frac{\overline{FC}}{\overline{CD}} = 770\ \text{min}^{-1}.$$

[Kritična brzina vrtnje za otpor uzbudnog kruga od 32 Ω je 770 min^{-1}.]



Sl. 2.

c) Kritični otpor samouzbude za brzinu vrtnje od 1 000 min^{-1} je tangenta na karakteristiku praznog hoda u ishodištu pri toj brzini vrtnje.

[Kritični otpor samouzbude, uz oznake prema slici 2, bit će:

$$R_{mk} = \frac{E_{\overline{(GC)}}}{i_{u\overline{(OC)}}} = \frac{103}{2{,}5} = 41{,}2\ \Omega.]$$

d) Potrebno je nacrtati karakteristiku praznog hoda za brzinu vrtnje od 1 200 min^{-1}. Na toj karakteristici, uz napon $E_0 = 120$ V, određena je točka H, a spajanjem točke H s ishodištem O određen je pravac ukupnog otpora uzbudnog kruga. Ukupni otpor uzbudnog kruga, uz oznake na slici 2, bit će:

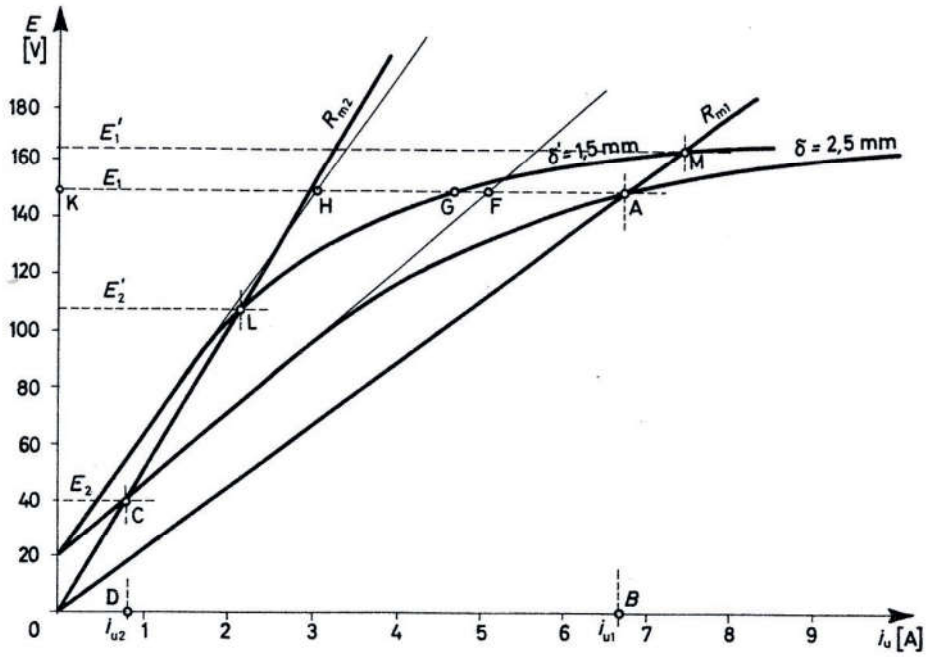
$$R'_m = \frac{E_{\overline{(IC)}}}{i_{u\overline{(OC)}}} = \frac{114}{2{,}5} = 45{,}6\ \Omega.$$

Dodatni otpor u uzbudnom krugu, uz otpor uzbudnog namota od 32 Ω, iznosi:

$$R_d = R'_m - R_m = 13{,}6\ \Omega.$$

$$[R_d = 13{,}6\ \Omega]$$

12. a) Ukupni otpor uzbudnoga strujnog kruga (otpor uzbudnog namota i otpor regulatora) za ostvarenje napona praznog hoda E_1 iznosi R_{m1}, a za postizanje napona praznog hoda E_2 je R_{m2}. Na slici 3. prikazana je



Sl. 3.

karakteristika praznog hoda pri zračnom rasporu glavnih polova $\delta = 2{,}5$ mm i pravci otpora samouzbude R_{m1} i R_{m2}. Minimalna vrijednost ukupnog otpora uzbudnog kruga, uz oznake prema slici 3, bit će:

$$R_{m1} = \frac{E_{(\overline{AB})}}{i_{u(\overline{OB})}} = \frac{E_1}{i_{u1}} = \frac{150}{6{,}66} = 22{,}5\ \Omega.$$

Minimalni otpor regulatora, uz otpor uzbudnog namota R_m, iznosi:

$$R_{rmin} = R_{m1} - R_m = 4\ \Omega.$$

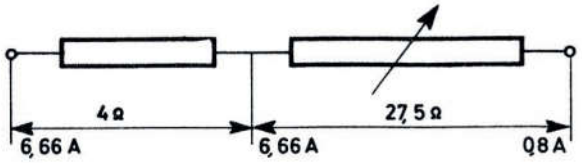
Maksimalna vrijednost ukupnog otpora uzbudnog kruga, uz oznake prema slici 3, jest:

$$R_{m2} = \frac{E_{(\overline{CD})}}{i_{u(\overline{OD})}} = \frac{E_2}{i_{u2}} = 50\ \Omega.$$

Maksimalni otpor regulatora iznosi:

$$R_{rmax} = R_{m2} - R_m = 31{,}5\ \Omega.$$

Na slici 4. električka je shema regulatora, pri čemu stalni otpor (takozvani predotpor) od 4 Ω mora biti termički dimenzioniran za struju od 6,66 A, a promjenjivi otpor od 27,5 Ω za područje struje od 6,66 do 0,8 A. [Minimalna vrijednost otpora regulatora je 4 Ω, a maksimalna vrijednost 31,5 Ω.]



Sl. 4.

b) Najprije valja odrediti karakteristiku praznog hoda za promijenjeni zračni raspor glavnih polova $\delta' = 1{,}5$ mm.
Karakteristika praznog hoda sadrži magnetski napon zračnog raspora glavnog pola i magnetski napon feromagnetskih dijelova magnetskog kruga glavnih polova. Na primjer, za točku A (vidi sl. 3) na karakteristici praznog hoda pri zračnom rasporu $\delta = 2{,}5$ mm magnetski se napon (izražen u uzbudnoj struji) $\overline{KF}$ odnosi na zračni raspor, a $\overline{FA}$ na feromagnetski dio magnetskog kruga. S promjenom zračnog raspora njegov se magnetski napon mijenja linearno, a ne mijenja se magnetski napon feromagnetskih dijelova. Potrebno protjecanje izraženo u uzbudnoj struji za napon praznog hoda E_1 pri zračnom rasporu $\delta = 1{,}5$ mm iznosi:

$$i_u = \overline{KG} = \overline{KF}\frac{\delta'}{\delta} + \overline{FA}.$$

Ponavljanjem istog postupka za nekoliko vrijednosti napona dobivamo karakteristiku praznog hoda pri zračnom rasporu $\delta = 1{,}5$ mm, kao što je prikazano na slici 3.

Napon E'_1 za minimalni otpor regulatora određen je sjecištem karakteristike praznog hoda pri $\delta' = 1{,}5$ mm s pravcem otpora samouzbude R_{m1} (točka M na sl. 3). Napon E'_1 otčitan sa slike 3. iznosi 164 V.

Napon E'_2 za maksimalni otpor regulatora određen je sjecištem karakteristike praznog hoda pri $\delta' = 1{,}5$ mm s pravcem otpora samouzbude R_{m2} (točka L na sl. 3). Napon E'_2 otčitan sa slike 3. iznosi 108 V. [Područje podešavanja napona generatora je od 108 do 164 V.]

13. Karakteristika praznog hoda $E(i_u)$ prikazana je na slici 5. Kad je regulatorom podešen napon praznog hoda $U_0 = 475$ V, struja će poredne uzbude, očitanjem s karakteristike praznog hoda, biti $i_u = 1{,}4$ A. Struja armature, za struju tereta $I = 100$ A, iznosi:

$$I_a = I + i_u = 101{,}4 \text{ A}.$$

Pad napona u generatoru zbog djelovanja struje armature je:

$$\Delta U = I_a R_u + \Delta U_č = 45{,}63 \text{ V}.$$

Budući da stroj ima kompenzacijski namot, nema reakcije armature, a kako nema ni serijskog namota, to »I«-liniju dobivamo nanašanjem pada napona

vertikalno od točke praznog hoda P_o, pa »I«-liniju čini pravac P_o P. Konstrukcija »I«-linije prikazana je na slici 5, a na samoj »I«-liniji označeni su padovi napona za struje opterećenja od 50, 100 i 150 A.

Da bi se odredila vanjska karakteristika generatora $U(I)$, potrebno je na karakteristici praznog hoda ucrtati novi (kosokutni) koordinatni sustav. Jedna njegova os paralela je s »I«-linijom u točki na apscisnoj osi u ishodištu uzbude (u našem primjeru u ishodištu $E(i_u)$ jer nema nezavisne uzbude), a druga je os pravac otpora samouzbude. U tome novom koordinatnom sustavu karakteristika je praznog hoda $E(i_u)$ vanjska karakteristika $U(I)$. Objasnimo određivanje napona generatora za struju tereta od 100 A. Kroz točku P vučemo pravac paralelan s pravcem otpora samouzbude, koji na presjecištu s »I«-linijom daje točku A, a na presjecištu s karakteristikom praznog hoda točke B i C. Udaljenost »I«-linije (na apscisnoj osi) do karakteristike praznog hoda predočuje napon pod teretom. U primjeru porednoga generatora dva su napona: $\overline{AB}$ i $\overline{AC}$.

Vrijednost će napona $\overline{AC}$, za struju tereta od 100 A, biti:

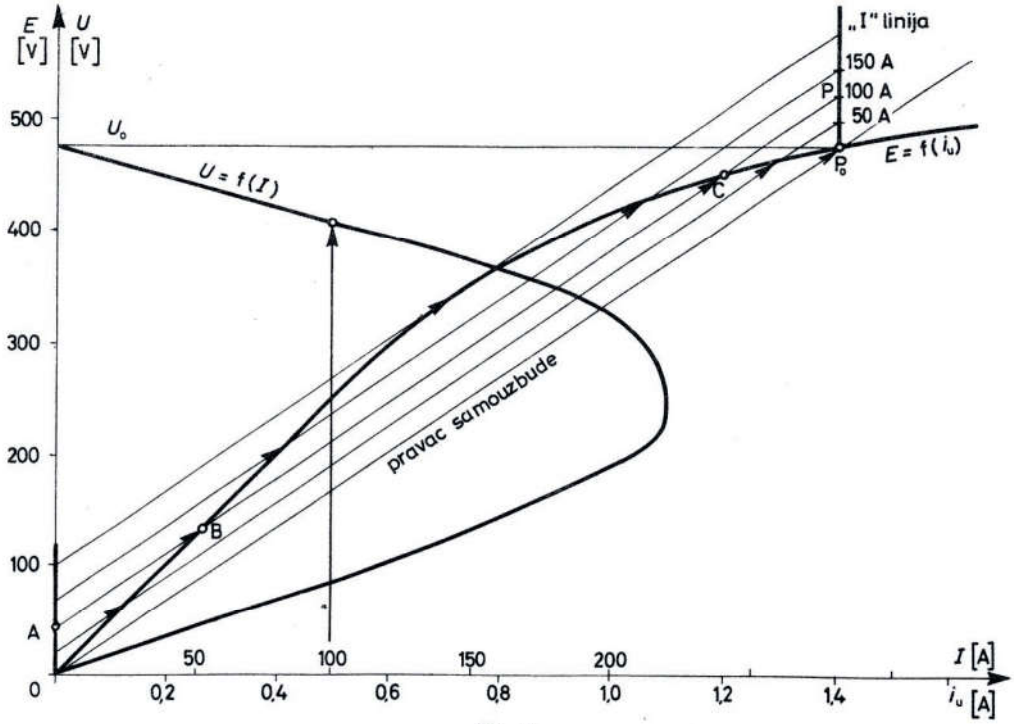
$$U_{AC} = U_o \frac{\overline{AC}}{\overline{OP_o}} = 406 \text{ V},$$

a napona $\overline{AB}$:

$$U_{AB} = U_o \frac{\overline{AB}}{\overline{OP_o}} = 84{,}2 \text{ V}.$$

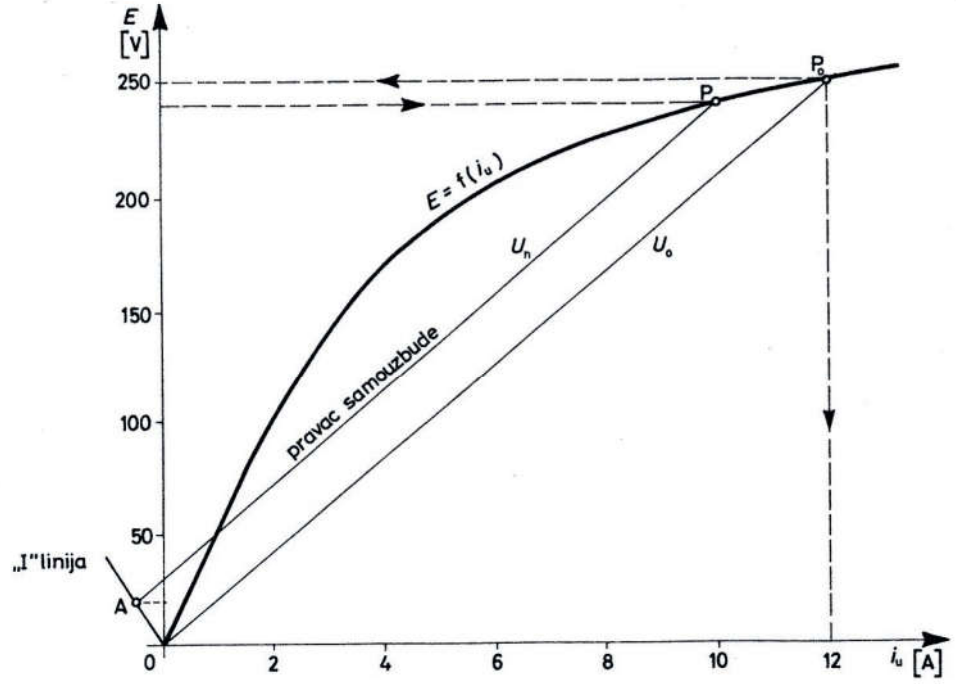
Ponavljajući postupak za razne vrijednosti struje tereta dobivamo vanjsku karakteristiku $U(I)$, što je nalazimo na slici 5.

[Vanjska karakteristika generatora $U(I)$ prikazana je na sl. 5.]



Sl. 5.

14. Karakteristika je praznog hoda predočena na slici 6. Na apscisnoj osi u točki početka poredne uzbude s vrijednostima pada napona od 20 V i reakcije armature od $-0{,}5$ A, crtamo »I«-liniju (pravac O A).



Sl. 6.

Inducirani napon generatora, za napon od 220 V pri nazivnom opterećenju, iznosi:

$$E_n = U_n + \Delta U = 240 \text{ V}.$$

Za inducirani napon E_n na karakteristici praznog hoda dobivamo točku P. Spajanjem točke A i P nastaje pravac otpora samouzbude, a dužina $\overline{AP}$ predočuje nazivni napon U_n. Paralela s pravcem AP kroz točku O odsijeca na karakteristici praznog hoda točku P_o praznog hoda generatora, a dužina je $\overline{OP_o}$ napon praznog hoda U_o. Otčitavanjem s karakteristike praznog hoda dobivamo napon praznog hoda $U_o = 250$ V i struju poredne uzbude $i_u = 12$ A.

Otpor uzbudnog kruga bit će:

$$R_m = \frac{U_o}{i_u} = 20{,}83 \ \Omega.$$

[Otpor uzbudnog kruga mora biti 20,83 Ω.]

15. a) Karakteristika praznog hoda prikazana je na slici 7. Pravac otpora samouzbude određen je točkom O_1 (zadana struja nezavisne uzbude je 5 A) i točkom P_o praznog hoda na karakteristici praznog hoda (zadan je napon praznog hoda od 110 V). Struja poredne uzbude otčitana sa slike 7. je $i_{upor} = 5$ A, a struja armature iznosi:

$$I_a = I + i_{upor} = \frac{P_2}{U} + i_{upor} = 105 \text{ A}.$$

Pad napona u generatoru uzrokovan strujom armature je:

$$\Delta U = I_a R_u + \Delta U_č = 7{,}14 \text{ V}.$$

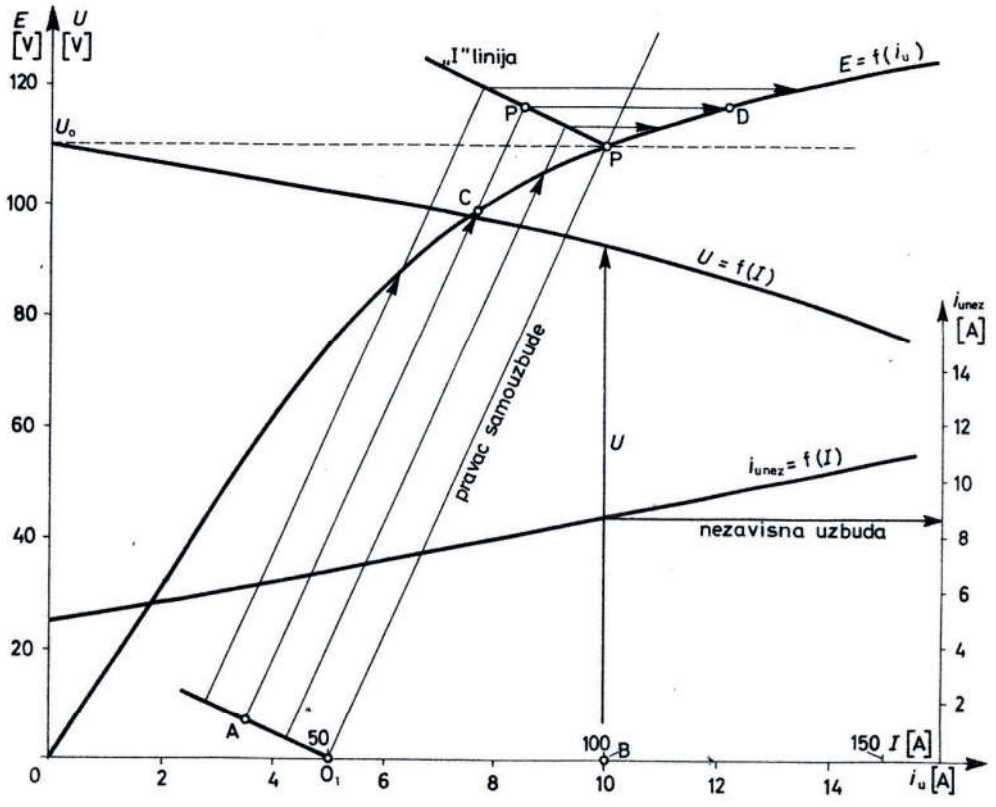
S tom vrijedošću i uz reakciju armature od 1,5 A crtamo »I«-liniju. Iznos napona $\overline{AC}$, za struju tereta od 100 A, bit će:

$$U_{AC} = U_o \frac{\overline{AC}}{\overline{O_1P_o}} = 92 \text{ V}.$$

Ponavljanjem postupka za razne vrijednosti struje tereta dobivamo vanjsku karakteristiku generatora $U(I)$, kao što je to na slici 7.
[Vanjska karakteristika generatora $U(I)$ prikazana je na sl. 7.]

b) Ako pri opterećenju želimo imati na stezaljkama iznos napona kao u praznom hodu, moramo struju uzbude povećati za iznos $\Delta i_{unez} = \overline{PD}$. Uzbudnu struju ćemo povećati promjenom otpora regulatora u krugu poredne uzbude uz nepromijenjenu nezavisnu uzbudu ili promjenom nezavisne uzbude uz nepromijenjeni otpor u krugu poredne uzbude. Odlučimo se za drugi način, pa će struja nezavisne uzbude pri opterećenju od 100 A biti:

$$i_{unez} = \overline{OO_1} + \overline{PD} = 5 + 3{,}7 = 8{,}7 \text{ A}.$$



Sl. 7.

Ponavljamo li postupak za razne vrijednosti struja tereta, rezultat je karakteristika regulacije $i_{unez}(I)$ prikazana na slici 7.
[Karakteristiku regulacije $i_{unez}(I)$ nalazimo na sl. 7.]

c) Napon generatora od 110 V pod teretom možemo ostvariti i tako da struja nezavisne uzbude i otpor regulatora u krugu poredne uzbude ostanu nepromijenjeni, ali da četkice pomaknemo iz neutralne zone suprotno smjeru vrtnje i time ojačamo glavno magnetsko polje.

Uzdužna komponenta protjecanja namota armature, ostvarena pomakom četkica iz neutralne zone, mora biti jednaka dodatnom protjecanju namota nezavisne uzbude. Uz oznake prema slici 4.7–8. i $\alpha_{el} = p\alpha_g$ možemo pisati:

$$V_č = \Theta_a \frac{\alpha_g p}{90} = 2\Delta i_{unez} w_u,$$

na temelju čega će geometrijski kut pomaka četkica iz neutralne zone biti:

$$\alpha_g = \frac{180\Delta i_{unez} w_u}{\Theta_a p} = 12{,}5°,$$

pri struji opterećenja od 100 A.
[Četkice valja pomaknuti iz neutralne zone suprotno smjeru vrtnje za 12,5 geometrijskih stupnjeva.]

16. a) [$U = 93$ V], b) [$U = 100$ V]

17. [$U = 100$ V]

18. Karakteristika praznog hoda predočena je na slici 8. Pravac otpora samouzbude određen je točkom O i točkom P_o na karakteristici praznog hoda (zadan napon praznog hoda od 220 V). Struja poredne uzbude otčitana sa slike 8. je $i_u \doteq 4$ A, a struja je armature:

$$I_a = \frac{P_2}{U} + i_u = 95 \text{ A}.$$

Pad napon u generatoru uzrokovan strujom armature je:

$$\Delta U = I_a R_u + \Delta U_č = 20 \text{ V}.$$

Protjecanje serijskog namota po polu izraženo u uzbudnoj struji iznosi:

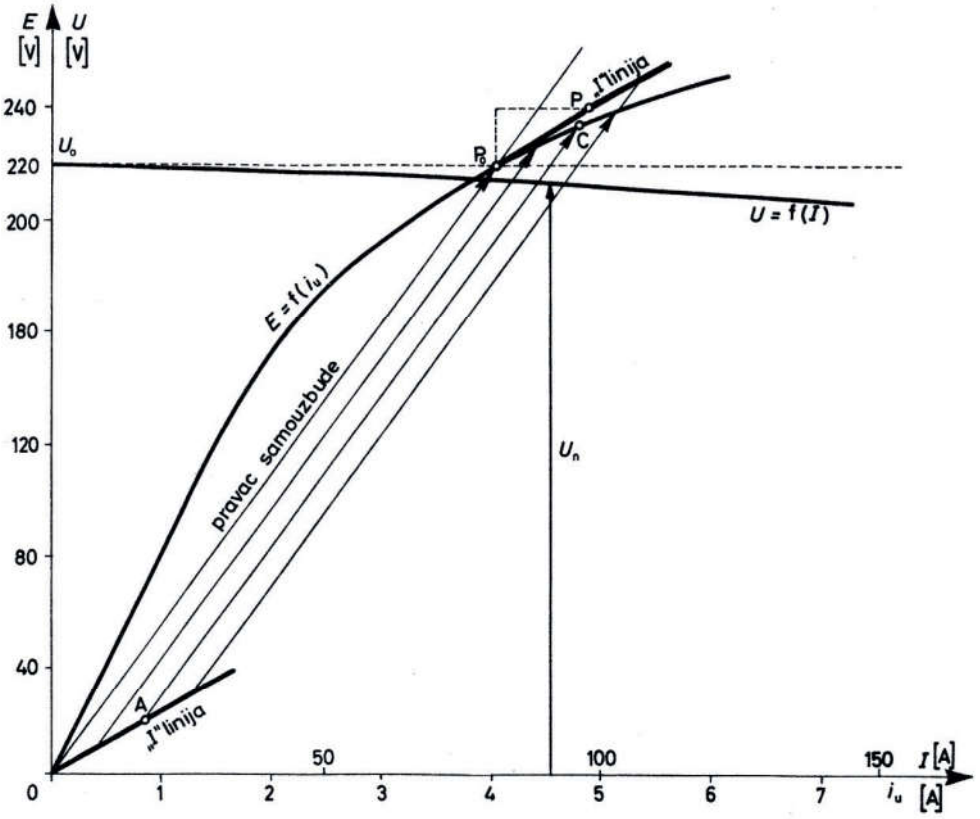
$$i_s = I_a \frac{w_{ser}}{w_u} = 1{,}66 \text{ A}.$$

S vrijednostima pada napona od 20 V, reakcijom armature od 0,8 A i ekvivalentnom strujom serijske uzbude od 1,66 A nacrtajmo »I«-liniju. Vrijednost napona $\overline{AC}$, za struju tereta od 91 A, iznosi:

$$U_{AC} = U_o \frac{\overline{AC}}{\overline{OP_o}} = 214 \text{ V}.$$

Ponavljanjem postupka za razne vrijednosti struja tereta dobivamo vanjsku karakteristiku generatora $U(I)$.

[Vanjska karakteristika $U(I)$ generatora prikazana je na sl. 8.]



Sl. 8.

19. a) Karakteristika praznog hoda nalazi se na slici 9. Struja armature za nazivno opterećenje bit će:

$$I_a = \frac{P_2}{U} = 174 \text{ A},$$

a pad napona u generatoru pri toj struji je:

$$\Delta U = I_a R_u + \Delta U_č = 17 \text{ V}.$$

Protjecanje serijskog namota po polu izraženo u uzbudnoj struji iznosi:

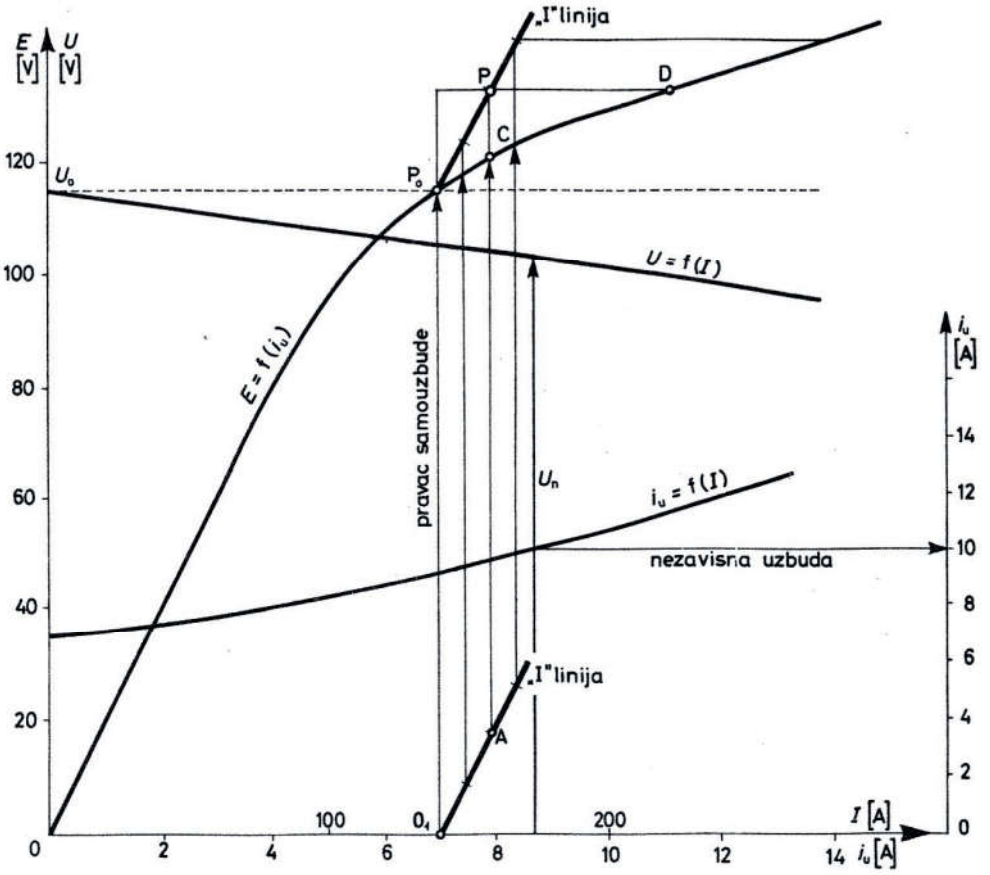
$$i_s = I_a \frac{w_{ser}}{w_u} = 2{,}44 \text{ A}.$$

S vrijednostima pada napona od 17 V, reakcijom armature od 1,5 A i ekvivalentnom strujom serijskog namota od 2,44 A nacrtajmo »I«-liniju.

Vrijednost napona $\overline{AC}$, za struju tereta od 174 A, bit će:

$$U_{\overline{AC}} = U_0 \frac{\overline{AC}}{\overline{O_1P_0}} = 103 \text{ V}.$$

[Vanjska karakteristika $U(I)$ generatora prikazana je na sl. 9.]



Sl. 9.

b) Ako pri nazivnom opterećenju želimo imati na stezaljkama napon kao u praznom hodu, moramo struju uzbude povećati za iznos $\overline{PD}$ na slici 9. Struja uzbude pri nazivnom opterećenju iznosi:

$$i_u = \overline{OO_1} + \overline{PD} = 7 + 3{,}2 = 10{,}2 \text{ A}.$$

Ponavljamo li postupak za razne vrijednosti struja tereta, rezultat je karakteristika regulacije $i_u(I)$.
[Karakteristiku regulacije $i_u(I)$ nalazimo na sl. 9.]

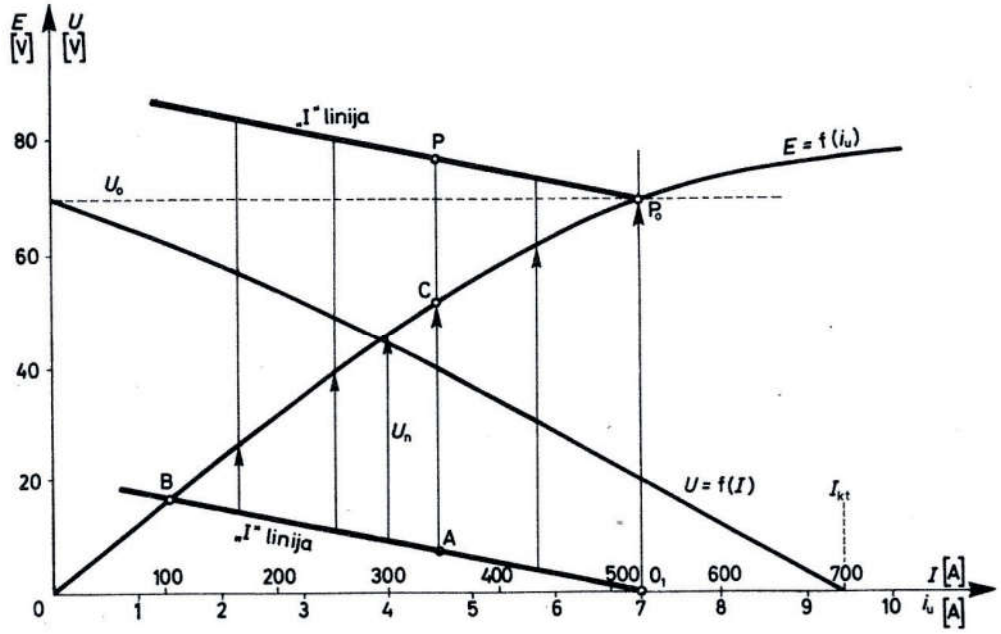
20. a) Karakteristika praznog hoda prikazana je na slici 10. Pad napona u generatoru pri struji tereta od 300 A je 7 V, a protjecanje protuserijskog namota po polu, izraženo u uzbudnoj struji, jest 1,2 A. S vrijednostima pada napona od 7 V, reakcijom armature od 1,2 A i ekvivalentnom strujom

protuserijskog namota od 1,2 A nacrtajmo »I«-liniju. Napon $\overline{AC}$ na stezaljkama generatora pri struji tereta od 300 A bit će:

$$U_{AC} = U_o \frac{\overline{AC}}{\overline{O_1P_o}} = 45 \text{ V}.$$

Ponavljanjem postupka za razne vrijednosti struja tereta izlazi vanjska karakteristika $U(I)$ generatora.
[Vanjsku karakteristiku $U(I)$ generatora vidimo na sl. 10.]

b) Trajna struja kratkog spoja odgovara nultom naponu na stezaljkama generatora, tj. određena je presjecištem vanjske karakteristike $U(I)$ i apscisne osi. Sa slike 10. otčitavamo iznos trajne struje kratkog spoja $I_{kt} = 705$ A.



Sl. 10.

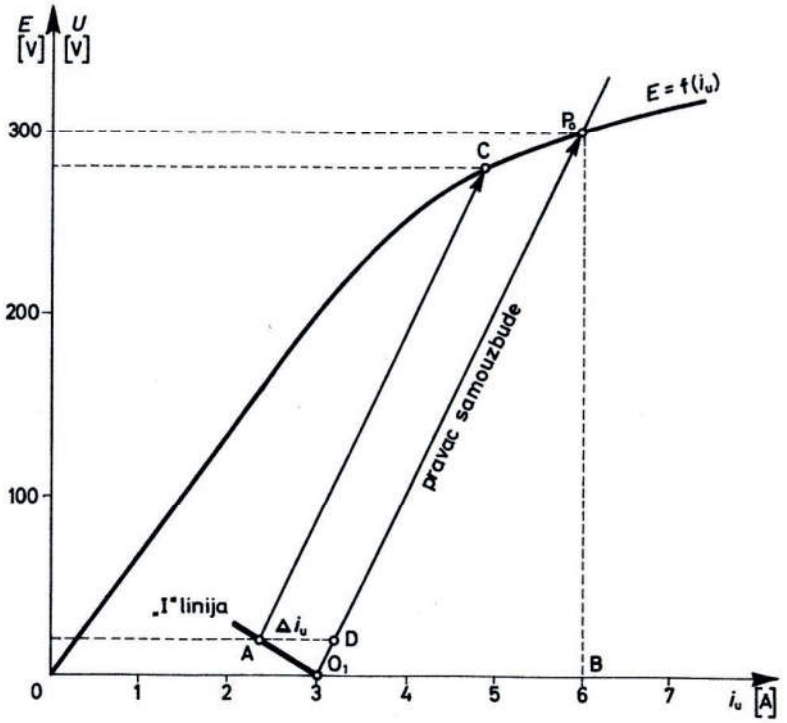
Trajnu struju kratkog spoja možemo odrediti i iz presjecišta »I«-linije s karakteristikom praznog hoda (točka B na sl. 10). Vrijednost trajne struje kratkog spoja tad je:

$$I_{kt} = I_n \frac{\overline{O_1B}}{\overline{O_1A}} = 706 \text{ A}.$$

[Trajna struja kratkog spoja iznosi 705 A.]

21. a) Međurezultati: $i_{upor} = 3$ A, $I_a = 253$ A i $\Delta U = 20$ V. Karakteristiku praznog hoda i »I«-liniju prikazuje slika 11.

[Traženi je napon 260 V.]



Sl. 11.

b) Da se postigne napon od 280 V na stezaljkama generatora pri struji tereta od 250 A (ako je $\overline{O_1P_0} \doteq 300$ V, onda je $\overline{DP_0} \doteq 280$ V), potrebno je struju uzbude jednog od namota povećati za vrijednost $\Delta i_u = \overline{AD} = 0{,}85$ A, ili ukupno protjecanje po paru polova za:

$$\Delta\Theta = 2\Delta i_u w_u = 1\,020 \text{ A}.$$

Generatoru jača glavno magnetsko polje (i povisuje se napon) kad četkice pomaknemo iz neutralne zone suprotno smjeru vrtnje, a uzdužna komponenta protjecanja armaturnog namota mora biti jednaka dodatnom protjecanju namota uzbude. Koristeći se izrazom (4.3–8) možemo pisati:

$$\Delta\Theta = V_č = 2k_\beta s A \frac{D_a}{D_k}.$$

Uz $s = \dfrac{D_k\pi}{k}$, $A = \dfrac{I_a w_a}{aD_a\pi}$ i $\dfrac{w_a}{k} = w_s$ dobivamo broj lamela pomaka četkica iz neutralne zone:

$$k_\beta = \frac{\Delta\Theta a}{2I_a w_s} = \frac{1\,020 \cdot 1}{2 \cdot 253 \cdot 1} = 2$$

[Četkice valja pomaknuti iz neutralne zone suprotno smjeru vrtnje za dvije lamele.]

22. a) Karakteristika praznog hoda prikazana je na slici 12. Za konstrukciju »I«-linije valja odrediti pad napona u motoru i rezultantno protjecanje izraženo uzbudnom strujom. Pad napona u motoru iznosi:

$$\Delta U = I_a R_u + \Delta U_č = 16 \text{ V},$$

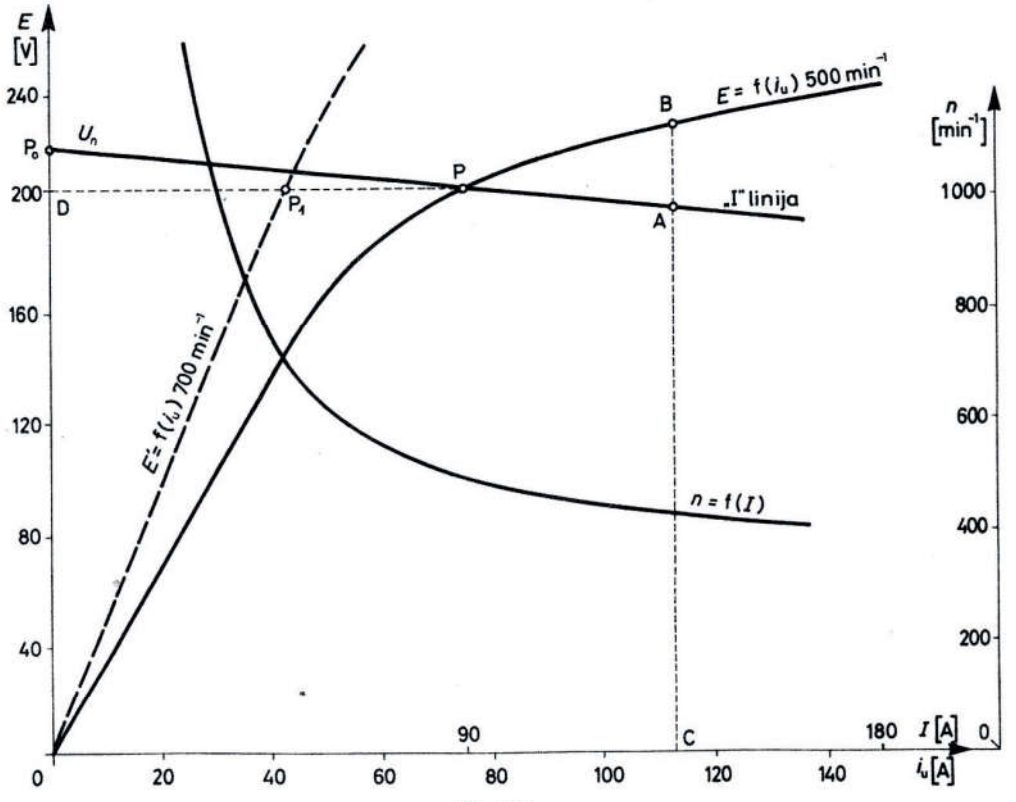
a rezultantno protjecanje izraženo uzbudnom strujom je 90 – 15 = 75 A.

Serijskome motoru je u praznom hodu beskonačna brzina vrtnje, pa se točka P_o praznog hoda nalazi na osi ordinata. S padom napona od 16 V ($\overline{P_oD}$) i rezultantnim protjecanjem izraženim u uzbudnoj struji od 75 A ($\overline{DP}$) nacrtajmo »I«-liniju.

Brzina vrtnje motora pri opterećenju strujom npr. od 135 A, uz $\overline{P_oA} = \overline{P_oP}\,\frac{135}{90}$, bit će:

$$n = n_n \frac{\overline{AC}}{\overline{BC}} = 435 \text{ min}^{-1}.$$

Ponavljamo li postupke za razne vrijednosti struje tereta, rezultat će biti karakteristika motora $n(I)$ prikazana na slici 12. Valja napomenuti da su na slici 12. dva mjerila za struju, od kojih jedno vrijedi za uzbudnu struju i karakteristiku praznog hoda, a drugo za »I«-liniju i karakteristiku $n(I)$. Tako dužina $\overline{DP}$ u mjerilu uzbudne struje iznosi 75 A, a dužina $\overline{P_oP}$ za određivanje karakteristike $n(I)$ »I«-linijom je 90 A.
[Karakteristika $n(I)$ prikazana je na sl. 12.]



Sl. 12.

b) Serijskome motoru pri nazivnom naponu i nazivnoj struji možemo povećati brzinu vrtnje smanjivši glavni magnetski tok, a to se postiže šantiranjem namota uzbude. Uz nepromijenjene vrijednosti pada napona i reakcije armature pri šantiranju, radnu točku P_1 motora za brzinu vrtnje od 700 min^{-1} dobivamo u sjecištu linije DP s karakteristikom praznog hoda $E'(i_u)$ pri brzini vrtnje od 700 min^{-1}, koju za taj primjer određujemo već poznatim postupkom.

Da bi motor pri nazivnom naponu i nazivnoj struji od 90 A u armaturnom namotu ostvario brzinu vrtnje od 700 min^{-1}, mora rezultantno protjecanje u zračnom rasporu glavnih polova biti jednako $\overline{DP_1}$. Protjecanje serijskog namota dobivamo ako povećamo rezultantno protjecanje za iznos reakcije armature. Struja serijskoga uzbudnog namota, uz $\overline{DP_1} = 43$ A, bit će $i_u = 58$ A.

Armaturnu struju označimo s I_a, a onu kroz uzbudni namot s i_u, i nju valja smanjiti šantiranjem na:

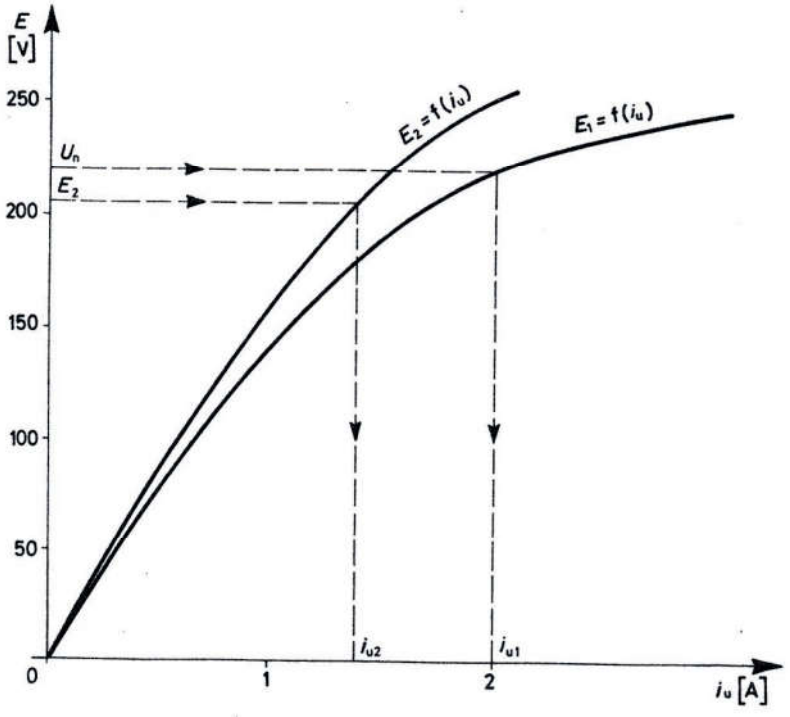
$$š = \frac{i_u}{I_a} 100 = 64{,}5\,\%.$$

[Struju namota serijske uzbude valja smanjiti šantiranjem na 64,5 %.]

23. a) Karakteristiku praznog hoda $E_1(i_u)$ za brzinu vrtnje motora od 1 150 min^{-1} nalazimo na slici 13. Struja poredne uzbude za napon od 220 V, otčitana s karakteristike praznog hoda $E_1(i_u)$ na slici 13 iznosi $i_{u1} = 2$ A, pa je otpor uzbudnog kruga:

$$R_{m1} = \frac{U_n}{i_{u1}} = 110\ \Omega.$$

Struja armature bit će $I_{a1} = I - i_{u1} = 85$ A, a inducirani napon pri toj struji je $E_1 = U_n - I_{a1}R_u = 209{,}8$ V.



Sl. 13.

Budući da je kompenziranome motoru glavni magnetski tok konstantna veličina, a brzina je vrtnje proporcionalna induciranom naponu, možemo za stanje motora u praznom hodu i pod opterećenjem pisati $n_o : U_n = n_1 : E_1$, zbog čega će brzina vrtnje motora pri opterećenju strujom od 87 A biti:

$$n_1 = n_o \frac{E_1}{U_n} = 1\,096{,}7 \text{ min}^{-1}.$$

[Brzina vrtnje motora je 1 096,7 min^{-1}.]

b) Moment tereta (ventilatora) mijenja se s kvadratom brzine vrtnje, pa za momente ventilatora M_{v1} i M_{v2} pri brzinama vrtnje n_1 i n_2 pišemo:

$$\frac{M_{v2}}{M_{v1}} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2. \tag{A}$$

Za omjer momenta motora M_{m1} i M_{m2} pri brzinama vrtnje n_1 i n_2, uz pomoć izraza (4.2–4), dobivamo:

$$\frac{M_{m2}}{M_{m1}} = \frac{\Phi_{gl2} I_{a2}}{\Phi_{gl1} I_{a1}}. \tag{B}$$

Za omjer induciranih napona E_1 i E_2 pri brzinama vrtnje n_1 i n_2, na osnovi izraza (4.1–5), vrijedi:

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\Phi_{gl2} n_2}{\Phi_{gl1} n_1}. \tag{C}$$

Budući da u statičkom stanju moraju biti jednaki momenti motora i ventilatora, izjednačenjem relacije (A) i (B) dobivamo:

$$\frac{\Phi_{gl2}}{\Phi_{gl1}} = \frac{I_{a1}}{I_{a2}} \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2.$$

Uvrstimo li to u relaciju (C), uz $E_2 = U_n - I_{a2} R_u$, možemo pisati:

$$\frac{U_n - I_{a2} R_u}{E_1} = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 \frac{I_{a1}}{I_{a2}},$$

što nakon sređivanja daje:

$$I_{a2}^2 R_u - I_{a2} U_n + I_{a1} E_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3 = 0,$$

iz čega izlazi struja armature pri brzini vrtnje n_2:

$$I_{a2} = \frac{U_n \pm \sqrt{U_n^2 - 4 R_u I_{a1} E_1 \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^3}}{2 R_u}.$$

Struja armature pri brzini vrtnje od 1 200 min^{-1} je $I_{a2} = 113{,}18$ A, a inducirani napon pri toj struji iznosi:

$$E_2 = U_n - I_{a2}R_u = 206{,}42 \text{ V}.$$

Karakteristika praznog hoda $E_2(i_u)$ pri brzini vrtnje od 1 200 min^{-1} prikazana je na slici 13. Struja poredne uzbude za inducirani napon od 206,42 V, otčitana s karakteristike praznog hoda $E_2(i_u)$ na slici 13, iznosi $i_{u2} = 1{,}39$ A.
Otpor uzbudnog kruga, pri priključku na napon mreže U_n, mora biti:

$$R_{m2} = \frac{U_n}{i_{u2}} = 158{,}3 \ \Omega,$$

a za dodatni otpor u uzbudnom krugu izlazi:

$$R_{md} = R_{m2} - R_{m1} = 158{,}3 - 110 = 48{,}3 \ \Omega.$$

[Dodatni otpor u porednom uzbudnom krugu je 48,3 Ω.]

24. a) Karakteristika praznog hoda prikazana je na slici 14. Nazivna struja motora bit će:

$$I_n = \frac{P_2}{U_n \eta} = 129{,}1 \text{ A}.$$

Struja poredne uzbude, otčitana s karakteristike praznog hoda za nazivni napon, iznosi 4 A, pa je struja armature $I_a = I_n + i_u = 125{,}1$ A, a pad napona u motoru $\Delta U = I_a R_u + \Delta U_č = 20$ V.
S padom napona od 20 V i reakcijom armature nacrtajmo »I«-liniju P_oP prikazanu na slici 14.

Brzina vrtnje pri nazivnoj struji tereta, uz oznake prema slici 14, bit će:

$$n_n = n_o \frac{\overline{PC}}{\overline{BC}} = 725 \text{ min}^{-1}.$$

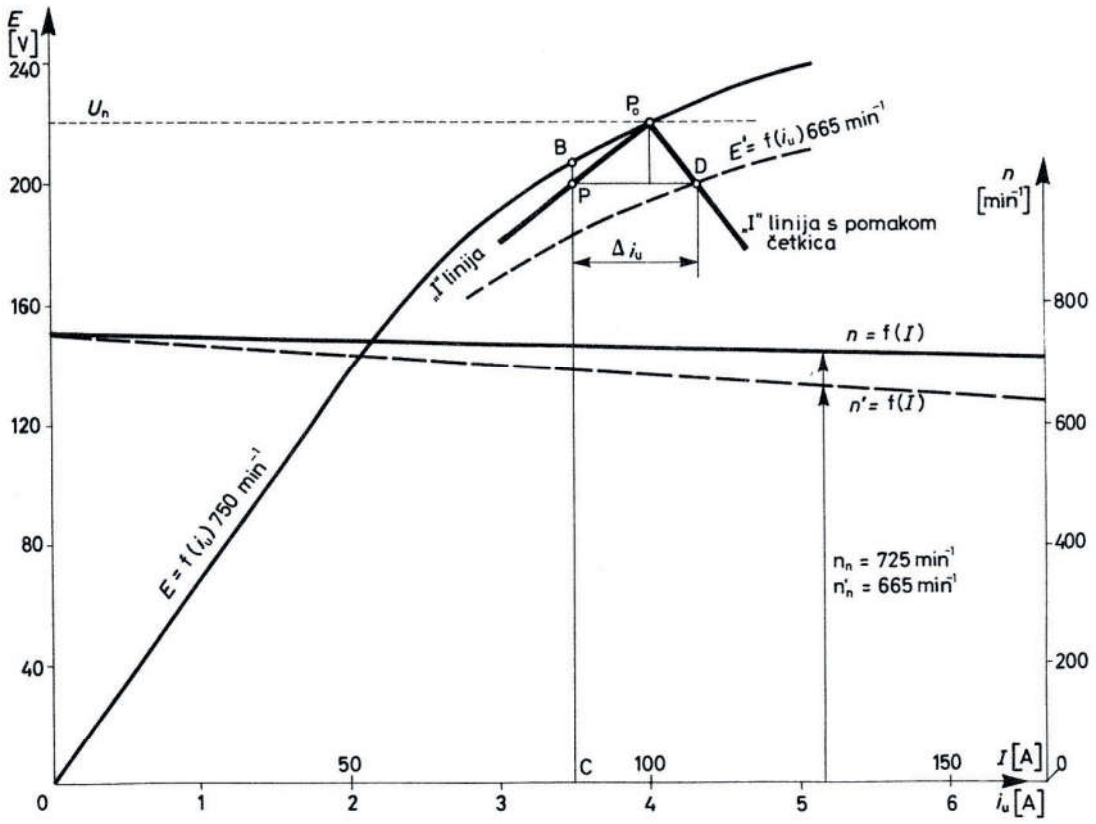
Ponavljajući postupak za razne vrijednosti struje tereta nalazimo karakteristiku $n(I)$.

[Karakteristiku $n(I)$ prikazuje slika 14.]

b) Brzinu vrtnje porednog motora pri nazivnoj struji možemo smanjiti tako da uz konstantan napon na stezaljkama povećamo glavni magnetski tok. To ćemo postići dodavanjem serijskog namota, kojemu protjecanje pomaže ono nastalo djelovanjem poredne uzbude, ili pomakom četkica u smjeru vrtnje.

Uz nepromijenjeni pad napona i reakciju armature radnu točku D dobivamo kao sjecište paralele s apscisnom osi kroz točku P i karakteristi-

ke praznog hoda $E'(i_u)$ (za brzinu vrtnje od 665 min^{-1}). Na slici 14. nova je »I«-linija P_oD, koja nastaje kad rezultantno protjecanje u krugu glavnih polova povećamo za iznos $i_u = \overline{PD} = 0{,}8$ A.



Sl. 14.

Prema zadatku povećanje rezultantnog protjecanja ostvarujemo pomakom četkica, a broj će lamela pomaka iz neutralne zone, uz upotrebu izraza (4.3–8), biti:

$$k_\beta = \frac{\Delta i_u w_u a}{I_a w_s} = 2.$$

[Četkice valja pomaknuti iz neutralne zone za dvije lamele u smjeru vrtnje.]

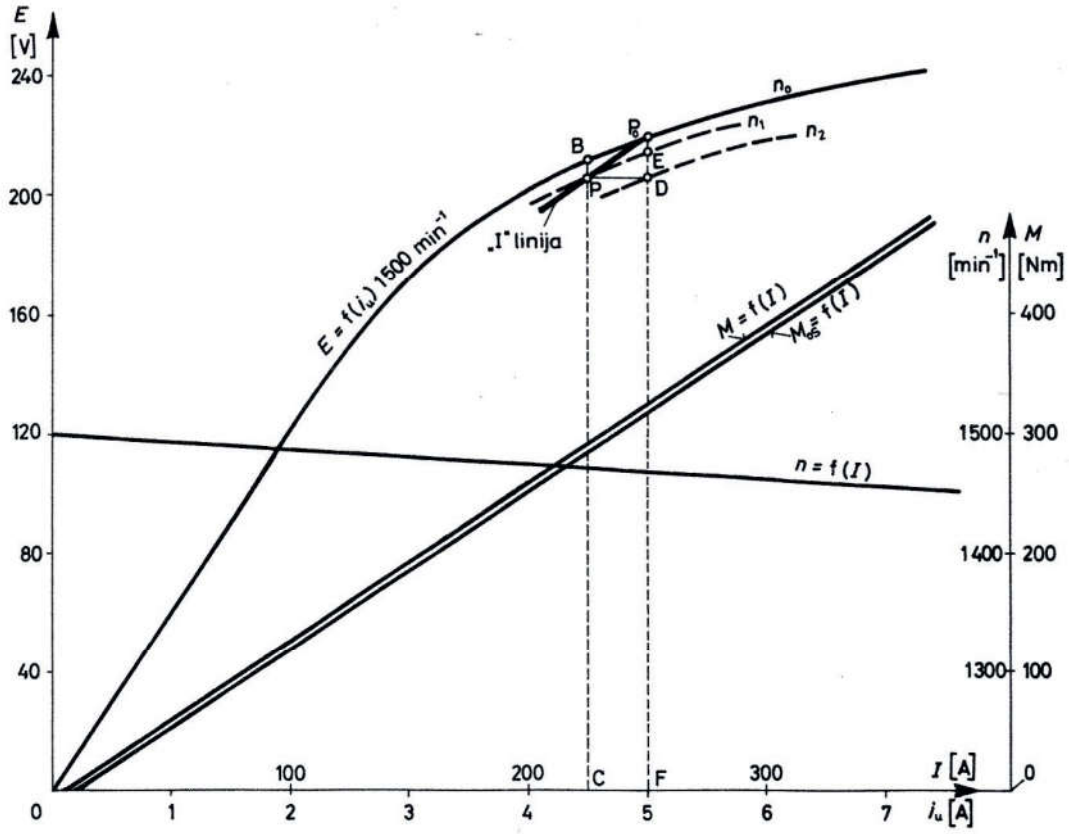
25. [Za 50 % I_n je $n = 1\,040$ min^{-1}, za 100 % I_n je $n = 830$ min^{-1}, za 150 % I_n je $n = 750$ min^{-1}.]

26. a) [Potrebno protjecanje porednoga uzbudnog namota je 1 100 A po paru polova.]

b) [$n = 805$ min^{-1}]

27. [$n_o = 1\,570$ min^{-1}]

28. a) Karakteristika praznog hoda $E(i_u)$ predočena je na slici 15. Struja poredne uzbude, otčitana s karakteristike praznog hoda za nazivni napon, iznosi 5 A, pa je struja armature 310 A. S padom napona u motoru od 14 V i reakcijom armature (izraženoj uzbudnom strujom) dobivamo parametre za konstrukciju »I«-linije i poznatim postupkom brzinu vrtnje od 1 465 min^{-1}. [Karakteristiku $n(I)$ prikazuje sl. 15.]



Sl. 15.

b) Da se odredi moment stroja u zračnom rasporu, potrebno je poznavati glavni magnetski tok pri raznim opterećenjima. U općem slučaju, promjena glavnoga magnetskog toka pri opterećenju stroja nastat će zbog djelovanja reakcije armature, serijskoga uzbudnog namota i pomaka četkica iz neutralne zone.

Razmotrimo određivanje glavnoga magnetskog toka uz pomoć »I«-linije (oznake prema sl. 15). Da je glavni magnetski tok konstantna veličina, motor bi u opterećenom stanju imao brzinu vrtnje n_2, tj.:

$$n_2 = n_0 \frac{\overline{DF}}{\overline{P_0F}}.$$

Kad se glavni magnetski tok mijenja s opterećenjem, motor u opterećenom stanju ima brzinu vrtnje:

$$n_1 = n_0 \frac{\overline{EF}}{\overline{P_0F}}.$$

Uz poznavanje brzina vrtnje n_1 i n_2, te vrijednosti glavnoga magnetskog toka Φ_{glo} u praznom hodu, možemo za glavni magnetski tok u opterećenom stanju pisati:

$$\Phi_{gl} = \Phi_{glo}\frac{n_2}{n_1} = \Phi_{glo}\frac{\overline{DF}}{\overline{EF}}. \qquad (A)$$

U zadanom primjeru broj je vodiča armaturnog namota $z = Nz' = 258$, a za jednovojni valoviti namot broj je pari paralelnih grana namota armature $a = 1$. U praznom hodu je $E = U$, pa glavni magnetski tok prema izrazu (4.1–4) iznosi:

$$\Phi_{glo} = \frac{60\,E\,a}{n_o z p} = 0{,}01705 \text{ Vs}.$$

Za glavni magnetski tok pri nazivnom opterećenju tako izlazi:

$$\Phi_{gl} = 0{,}0164 \text{ Vs}.$$

Moment u zračnom rasporu motora pri nazivnom opterećenju, koristeći se relacijom (4.2–3), iznosi:

$$M = \frac{pz}{2a\pi}\Phi_{gl} I_a = 417{,}5 \text{ Nm}.$$

Moment na osovini motora uz nazivnu struju od 315 A je:

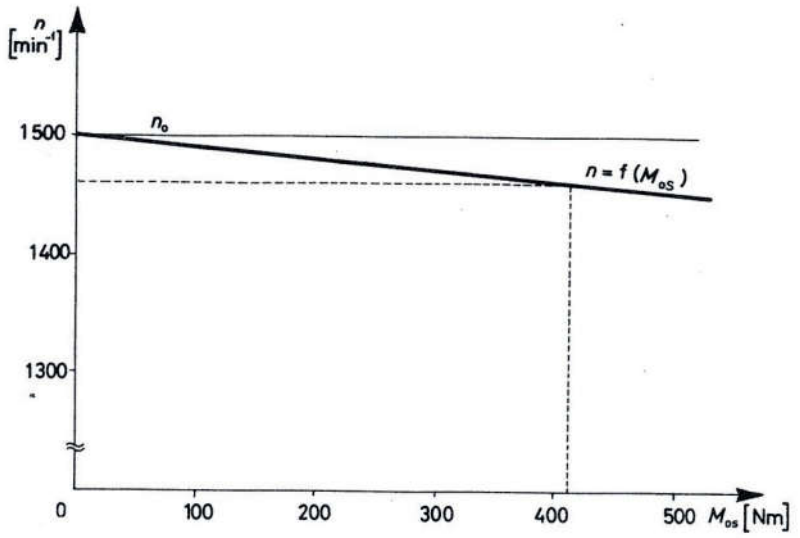
$$M_{os} = M - M_g = 410{,}5 \text{ Nm}.$$

[Ponavljanjem postupka za razne vrijednosti struja opterećenja dobivamo karakteristike $M(I)$ i $M_{os}(I)$ prikazane na sl. 15.]

c) Vanjsku karakteristiku motora $n(M_{os})$, uz poznavanje karakteristika $n(I)$ i $M_{os}(I)$, dobivamo otčitavanjem n i M_{os} za iste vrijednosti struja. Na primjer, za nazivnu struju 315 A je:

$$n = 1465 \text{ min}^{-1} \quad \text{i} \quad M_{os} = 410{,}5 \text{ Nm}.$$

[Vanjsku karakteristiku motora $n(M_{os})$ nalazimo na sl. 16.]



Sl. 16.

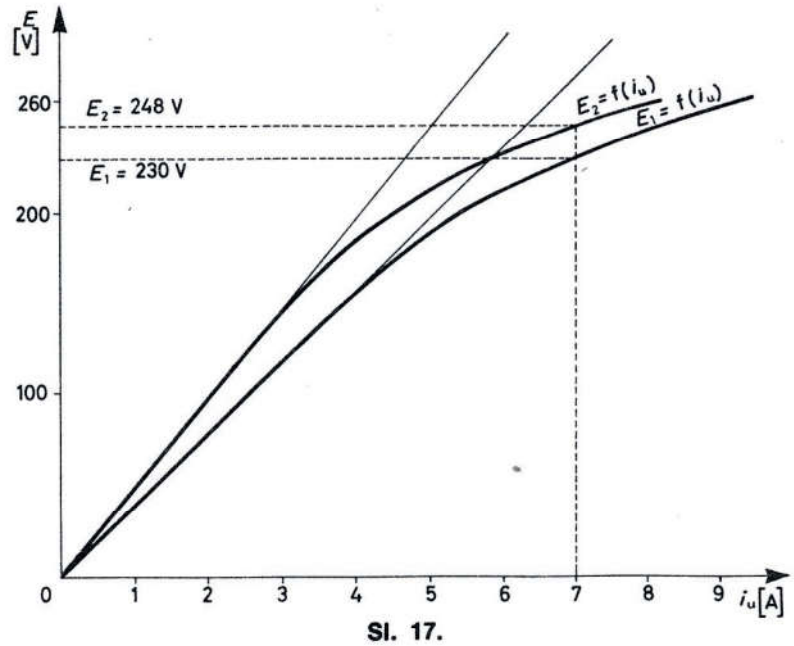
29. a) Pomakom četkica suprotno smjeru vrtnje, uzdužna komponenta protjecanja namota armature jača glavno magnetsko polje, a pri pomaku u smjeru vrtnje ona ga slabi.

Označimo generator s četkicama pomaknutima suprotno smjeru vrstnje s 1, a generator s četkicama pomaknutima u smjeru vrtnje s 2. Generator 1 pod teretom ima povećani glavni magnetski tok i, uz konstantnu brzinu vrtnje, veći inducirani napon u armaturi, pa će prema tome preuzeti i veći teret. Generator 2 pod teretom ima manji glavni magnetski tok, manji inducirani napon i preuzima manji teret. Koliki će teret preuzeti pojedini generator, ovisi o tvrdoći karakteristika $U(I)$.
[Veći će teret preuzeti generator s četkicama pomaknutima suprotno smjeru vrtnje.]

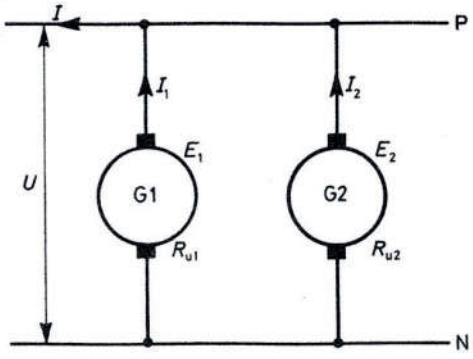
b) Pomakom četkica iz neutralne zone svitak koji komutira dolazi pod djelovanje glavnoga magnetskog polja, i to: pri pomaku četkica suprotno smjeru vrtnje kod generatora glavno uzbudno polje usporava komutaciju, a pri pomaku u smjeru vrtnje ono ubrzava komutaciju (vidi redoslijed magnetskih polariteta ovisno o smjeru vrtnje na sl. 6.3–4).

Ako su generatori s četkicama u neutralnoj zoni imali potkomutaciju, onda će teže komutirati generator s četkicama pomaknutima suprotno smjeru vrtnje jer mu je još više izražena potkomutacija.
[Teže je komutirati generator s četkicama pomaknutima suprotno smjeru vrtnje.]

30. Karakteristika praznog hoda $E_1(i_u)$ generatora G1 sa zračnim rasporom glavnih polova od 5 mm prikazana je na slici 17. Poznatim postupkom (kao u 12. zadatku) nalazimo karakteristiku praznog hoda $E_2(i_u)$ generatora G2 sa zračnim rasporom glavnih polova 4 mm. Za uzbudnu struju od 7 A inducirani naponi generatora su $E_1 = 230$ V i $E_2 = 248$ V. Shema spoja generatora s oznakama parametara prikazana je na slici 18.



Sl. 17.



Sl. 18.

a) Zbog prvoga Kirchhoffovog zakona vrijedi: $I_1 + I_2 = I$, a iz drugoga $E_1 - E_2 = I_1 R_{u1} - I_2 R_{u2}$.
Rješavanjem tih jednadžbi dobivamo vrijednosti struja opterećenja generatora G1 i G2:

$$I_1 = \frac{I R_{u2}}{R_{u1} + R_{u2}} + \frac{E_1 - E_2}{R_{u1} + R_{u2}} = 142{,}9 \text{ A},$$

$$I_2 = \frac{I R_{u1}}{R_{u1} + R_{u2}} - \frac{E_1 - E_2}{R_{u1} + R_{u2}} = 657{,}1 \text{ A}.$$

[Struja generatora s $\delta = 5$ mm iznosi 142,9 A, a onoga s $\delta = 4$ mm je 657,1 A.]

b) [Struja izjednačenja između generatora je:

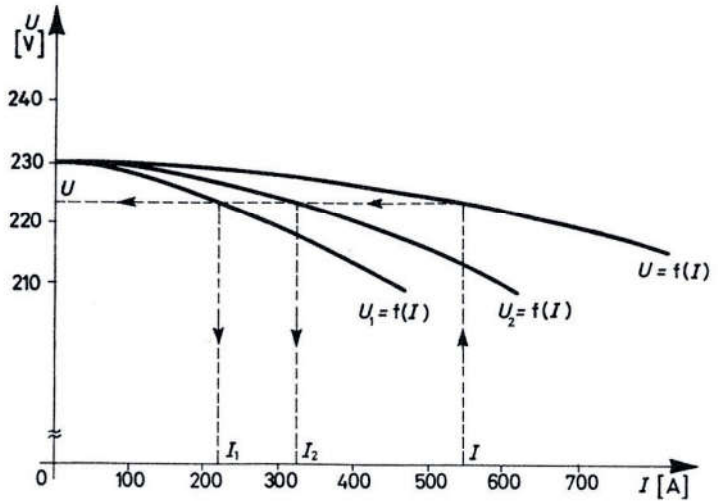
$$I_i = \frac{\Delta E}{\Sigma R} = \frac{E_2 - E_1}{R_{u1} + R_{u2}} = 257{,}1 \text{ A}.]$$

c) Napon sabirnica dobivamo iz izraza:

$$U = E_1 - I_1 R_{u1} = E_2 - I_2 R_{u2}.$$

$[E_2 = 225 \text{ V}]$

31. Zadane vanjske karakteristike generatora nalazimo na slici 19, pri čemu je $U_1(I)$ za generator od 63 kW, a $U_2(I)$ za generator od 90 kW. Iz vanjskih karakteristika $U_1(I)$ i $U_2(I)$ nacrtajmo njihovu sumarnu karakteristiku $U(I)$ (zbrajanjem struja pri istom naponu).



Sl. 19.

a) Za primjer opterećenja strujom od 550 A sa zajedničke karakteristike $U(I)$ otčitavamo napon sabirnica od 223,5 V.

[Napon sabirnica je 223,5V.]

b) Za napon sabirnica od 223,5 V s vanjskih karakteristika $U_1(I)$ i $U_2(I)$ otčitavamo struje opterećenja pojedinih generatora:

$$[I_1 = 225 \text{ A}, \; I_2 = 325 \text{ A}.]$$

32. Nazivni moment motora M1 od 40 kW iznosi:

$$M_{n1} = 9{,}55 \frac{P_{21}}{n_{n1}} = 382 \text{ Nm},$$

a motora M2 od 30 kW:

$$M_{n2} = 9{,}55 \frac{P_{22}}{n_{n2}} = 286{,}5 \text{ Nm}.$$

Serijskome motoru u magnetski nezasićenom stanju glavni je magnetski tok Φ_{gl} proporcionalan struji armature I_a, pa koristeći se izrazom (4.2–4) za moment stroja i izrazom (4.1–5) za inducirani napon, možemo pisati:

$$M = k_I \left(\frac{E}{n}\right)^2.$$

Iz omjera momenata motora pri nazivnom i bilo kojem opterećenju, uz pretpostavku $E_n = E$, dobivamo moment serijskog motora u magnetski nezasićenom stanju:

$$M = M_n \left(\frac{E}{E_n}\right)^2 \left(\frac{n_n}{n}\right)^2 = M_n \left(\frac{n_n}{n}\right)^2. \qquad \text{(A)}$$

a) Pri opterećenju ukupnim momentom M motor M1 preuzet će moment M_1, a motor M2 moment M_2, pa pišemo:

$$M = M_1 + M_2$$

ili uz pomoć izraza (A) izlazi:

$$M = M_{n1} \left(\frac{n_{n1}}{n}\right)^2 + M_{n2} \left(\frac{n_{n2}}{n}\right)^2,$$

iz čega dobivamo brzinu vrtnje:

$$n = \sqrt{\frac{M_{n1} n_{n1}^2 + M_{n2} n_{n2}^2}{M}} = 861{,}8 \text{ min}^{-1}.$$

[Brzina je vrtnje motorâ 861,8 min^{-1}.]

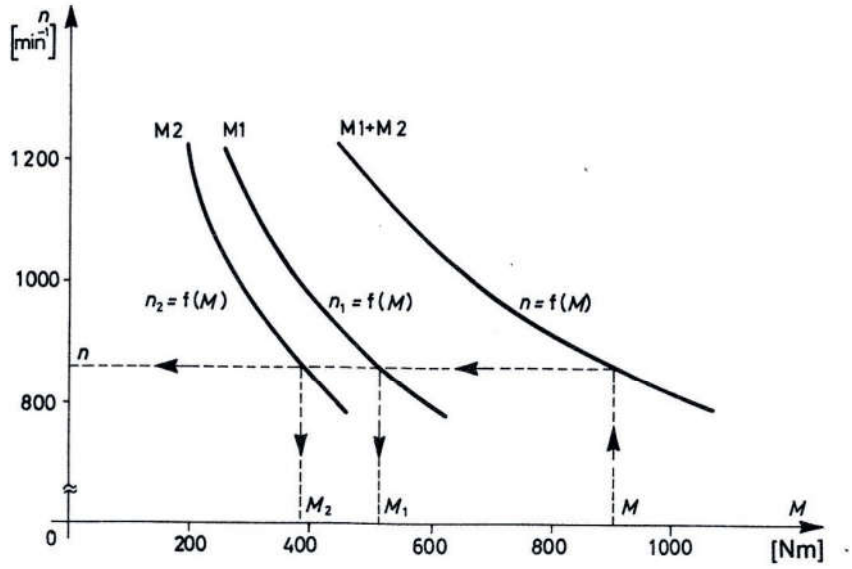
b) Upotrijebivši izraz (A) dobit ćemo moment motora M1:

$$M_1 = M_{n1} \left(\frac{n_{n1}}{n}\right)^2 = 514{,}3 \text{ Nm}$$

i moment motora M2:

$$M_2 = M_{n2} \left(\frac{n_{n2}}{n}\right)^2 = 385{,}7 \text{ Nm}.$$

Grafički prikaz rješenja zadatka nalazimo na slici 20.
[Motor M1 opterećen je momentom 514,3 Nm, a motor M2 momentom 385,7 Nm.]



Sl. 20.

33. Vanjske karakteristike $n_1(I)$ za motor od 80 kW i $n_2(I)$ za motor od 60 kW te sumarna karakteristika prikazane su na slici 21.

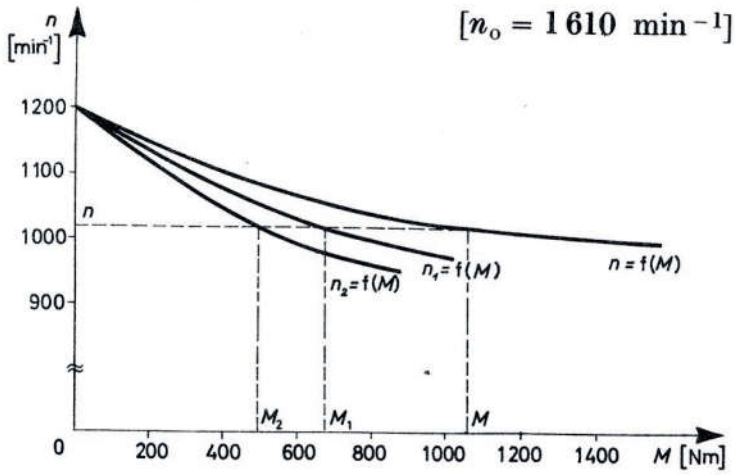
a) $[n = 1\,020\ \text{min}^{-1}]$, b) $[M_1 = 660\ \text{Nm}$ i $M_2 = 490\ \text{Nm}]$

34. Shemu spoja motorâ vidimo na slici 22, a nazivni moment motora je $M_n = 89{,}1$ Nm. Budući da su motori kompenzirani, vanjska im karakteristika ima oblik pravca.

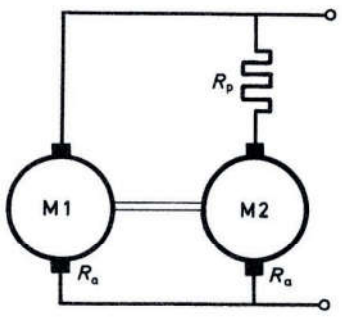
a) Brzina vrtnje motora u praznom hodu je:

$$n_o = n_n \frac{U_n}{E_n} = n_n \frac{U_n}{U_n - I_{an}R_a} = 1\,610\ \text{min}^{-1}.$$

$$[n_o = 1\,610\ \text{min}^{-1}]$$



Sl. 21.



Sl. 22.

b) Jednadžba je brzine vrtnje za motor M1:

$$n_1 = n_o - (n_o - n_n)\frac{M_1}{M_n} = 1610 - (1610-1500)\frac{M_1}{89,1} = 1610 - 1,234\ M_1.$$

Motoru M2 s ukopčanim dijelom otpora R_p pokretača brzina će vrtnje pri opterećenju nazivnim momentom biti:

$$n_p = n_o \frac{E_p}{U_n} = n_o \frac{U_n - I_{an}(R_a + R_p)}{U_n} = 1280,7\ \text{min}^{-1},$$

a jednadžba brzine vrtnje mu je:

$$n_2 = n_o - (n_o - n_p)\frac{M_2}{M_n} = 1610 - 3,695\ M_2.$$

Pri paralelnom radu motori M1 i M2 imaju jednaku brzinu vrtnje $n_1 = n_2 = n$, a tu brzinu vrtnje i raspodjelu opterećenja na pojedine motore dobivamo rješavanjem ovih jednadžbi:

$$n = 1610 - 1,234\ M_1, \qquad n = 1610 - 3,695\ M_2, \qquad M = M_1 + M_2.$$

Moment opterećenja motora M1 iznosi:

$$M_1 = 0,75\ M = 127,5\ \text{Nm},$$

a motora M2:

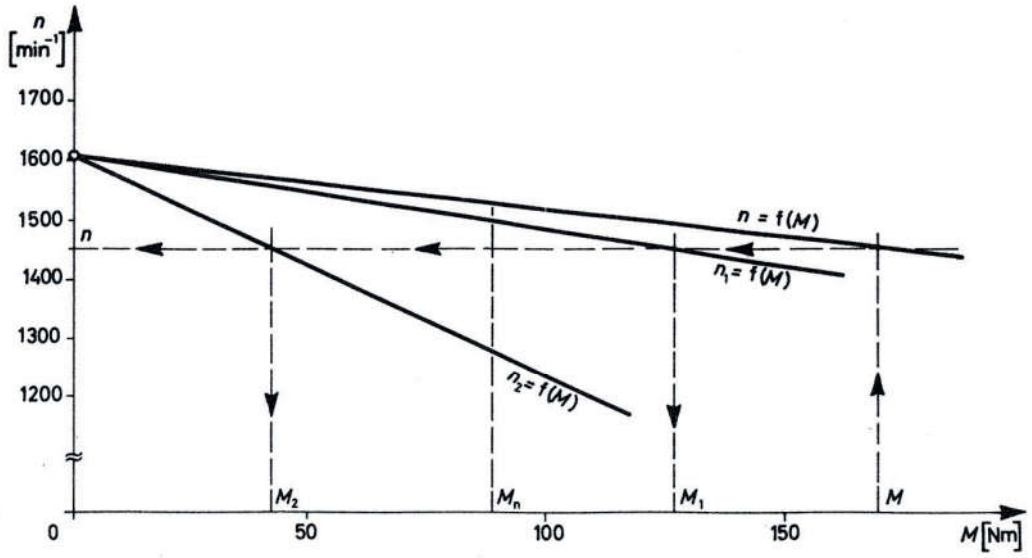
$$M_2 = 0,25\ M = 42,5\ \text{Nm}.$$

Brzina vrtnje sklopa je:

$$n = 1610 - 1,234\ M_1 = 1452,7\ \text{min}^{-1}.$$

$$[n = 1452,7\ \text{min}^{-1},\ M_1 = 127,5\ \text{Nm i}\ M_2 = 42,5\ \text{Nm}]$$

c) Vanjska karakteristika pojedinog motora je pravac određen točkama brzine vrtnje u praznom hodu i pri nazivnom momentu.
[Vanjsku karakteristiku $n_1\ (M)$ motora M1 i $n_2\ (M)$ motora M2 te sumarnu karakteristiku $n(M)$ prikazuje sl. 23, gdje je ucrtano i grafičko rješenje zadatka.]



Sl. 23.

35. a) [Brzina je vrtnje motorâ 1455 min^{-1}; moment opterećenja motora M1 je $M_1 = 1381{,}25$ Nm i motora M2 $M_2 = -81{,}25$ Nm.]

b) [Podesit će se uzbudne struje motora tako da momenti motora budu jednaki. Motoru M1 valja povećati, a motoru M2 smanjiti uzbudnu struju.]

36. a) [$n_{o1} = 1065{,}6\ \text{min}^{-1}$, $n_{o2} = 1121{,}7\ \text{min}^{-1}$, $n_{n2} = 1052{,}6\ \text{min}^{-1}$ i $M_{n2} = 1814{,}5$ Nm]

b) [$n = 1023{,}6\ \text{min}^{-1}$, $M_1 = 1223{,}2$ Nm i $M_2 = 2576{,}8$ Nm]

37. Omjer struje opterećenja i nazivne struje označimo s x, pa za snagu i gubitke pri nekome strujnom opterećenju vrijedi:

za snagu	$P_2 = xP_{2n}$;
za osnovne strujne gubitke u namotima	$P_{Cu} = x^2 P_{Cun}$;
za dodatne gubitke u armaturnom namotu	$P_{Cud} = x^2 P_{Cudn}$;
za električne gubitke na kolektoru	$P_{elč} = xP_{elčn}$;
za gubitke u praznom hodu	$P_{go} = \text{konst.}$

Korisnost motora pri strujnom opterećenju xI_n, prema izrazu (6.5–4), iznosi:

$$\eta = \frac{xP_{2n}}{xP_{2n} + P_{go} + x^2 P_{Cun} + x^2 P_{Cudn} + xP_{elčn}} \tag{A}$$

i nakon dijeljenja s x:

$$\eta = \frac{P_{2n}}{P_{2n} + \dfrac{P_{go}}{x} + (P_{Cun} + P_{Cudn})\, x + P_{elčn}} \tag{B}$$

Deriviramo li izraz (B) po x, rezultat je:

$$\frac{d\eta}{dx} = \frac{P_{go}}{x^2} + P_{Cun} + P_{Cudn},$$

a iz $\dfrac{d\eta}{dx} = 0$ izlazi strujno opterećenje x pri kojem nastaje maksimalna korisnost:

$$x = \sqrt{\frac{P_{go}}{P_{Cun} + P_{Cudn}}} = 0{,}8745.$$

Ako uvrstimo izračunate vrijednosti x u izraz (A), maksimalna korisnost bit će:

$$\eta_{max} = \frac{xP_{2n}}{xP_{2n} + P_{go} + x^2 P_{Cun} + x^2 P_{Cudn} + xP_{elčn}} = 0{,}8631.$$

[Maksimalna korisnost je 86,31 %, a nastaje pri 87,45 %-tnom strujnom opterećenju.]

38. a) Osnovni strujni gubici u armaturnom namotu i pomoćnih polova iznose pri nazivnoj struji:

$$P_{\mathrm{Cun}} = (I_{\mathrm{n}} - i_{\mathrm{u}})^2 R_{\mathrm{u}}. \qquad \text{(A)}$$

Električni gubici na kolektoru pri nazivnoj struji su:

$$P_{\mathrm{elčn}} = (I_{\mathrm{n}} - i_{\mathrm{u}}) \Delta U_{\check{\mathrm{c}}}. \qquad \text{(B)}$$

Strujni gubici uzbudnog namota P_{u}, gubici u željezu P_{Fe} i mehanički gubici P_{m}, uz struju praznog hoda I_{o} i struju uzbude i_{u}, iznose:

$$P_{\mathrm{u}} + P_{\mathrm{Fe}} + P_{\mathrm{m}} = UI_{\mathrm{o}} - (I_{\mathrm{o}} - i_{\mathrm{u}})^2 R_{\mathrm{u}} - (I_{\mathrm{o}} - i_{\mathrm{u}}) \Delta U_{\check{\mathrm{c}}}. \qquad \text{(C)}$$

Primljena je snaga motora:

$$P_1 = P_2 + P_{\mathrm{g}}.$$

Na osnovi izraza (A), (B) i (C) za gubitke, te izraza za primljenu snagu $P_{1\mathrm{n}} = UI_{\mathrm{n}}$, možemo pisati:

$UI_{\mathrm{n}} = P_{2\mathrm{n}} + (I_{\mathrm{n}} - i_{\mathrm{u}})^2 R_{\mathrm{u}} + (I_{\mathrm{n}} - i_{\mathrm{u}}) \Delta U_{\check{\mathrm{c}}} + UI_{\mathrm{o}} - (I_{\mathrm{o}} - i_{\mathrm{u}})^2 R_{\mathrm{u}} - (I_{\mathrm{o}} - i_{\mathrm{u}})$ $\Delta U_{\check{\mathrm{c}}} + P_{\mathrm{Cudn}}$, što nakon sređivanja daje:

$$R_{\mathrm{u}} I_{\mathrm{n}}^2 + (\Delta U_{\check{\mathrm{c}}} - U - 2 i_{\mathrm{u}} R_{\mathrm{u}}) I_{\mathrm{n}} + P_{2\mathrm{n}} + i_{\mathrm{u}}^2 R_{\mathrm{u}} - i_{\mathrm{u}} \Delta U_{\check{\mathrm{c}}} + UI_{\mathrm{o}} - (I_{\mathrm{o}} - i_{\mathrm{u}})^2 R_{\mathrm{u}} -$$
$$-(I_{\mathrm{o}} - i_{\mathrm{u}}) \Delta U_{\check{\mathrm{c}}} + P_{\mathrm{Cudn}} = 0. \qquad \text{(D)}$$

Struja magnetiziranja bit će:

$$i_{\mathrm{u}} = \frac{U}{R_{\mathrm{m}}} = \frac{220}{122{,}2} = 1{,}8 \text{ A}.$$

Ako uvrstimo vrijednosti parametara u izraz (D), izlazi relacija:

$$I_{\mathrm{n}}^2 - 171{,}3\ I_{\mathrm{n}} + 3513 = 0,$$

iz koje nalazimo vrijednost nazivne struje motora $I_{\mathrm{n}} = 23{,}82$ A. Korisnost je pri nazivnoj struji:

$$\eta = \frac{P_{2\mathrm{n}}}{UI_{\mathrm{n}}} = \frac{4000}{220 \cdot 23{,}82} = 0{,}7633.$$

[Nazivna je struja motora 23,82 A, a korisnost pri toj struji je 76,33 %.]

b) Korisnost pri opterećenju strujom I iznosi:

$$\eta = \frac{P_{2\mathrm{n}} \dfrac{I}{I_{\mathrm{n}}}}{P_{2\mathrm{n}} \dfrac{I}{I_{\mathrm{n}}} + (I - i_{\mathrm{u}})^2 R_{\mathrm{u}} + (I - i_{\mathrm{u}}) \Delta U_{\check{\mathrm{c}}} + UI_{\mathrm{o}} - (I_{\mathrm{o}} - i_{\mathrm{u}})^2 R_{\mathrm{u}} - (I_{\mathrm{o}} - i_{\mathrm{u}}) \Delta U_{\check{\mathrm{c}}} + P_{\mathrm{Cudn}} \left(\dfrac{I}{I_{\mathrm{n}}}\right)^2}$$

Podijelimo li brojnik i nazivnik strujom I i uvrstimo vrijednosti pojedinih parametara, dobivamo:

$$\eta = \frac{167{,}93}{165{,}25 + 1{,}37\,I + \dfrac{526{,}95}{I}}, \qquad \text{(E)}$$

Struju pri kojoj nastaje maksimalna korisnost dobivamo iz derivacije izraza (E) izjednačenoga s nulom:

$$\frac{\mathrm{d}\eta}{\mathrm{d}I} = 1{,}37 - \frac{526{,}95}{I^2} = 0,$$

tj.:

$$I = \sqrt{\frac{526{,}95}{1{,}37}} = 19{,}61 \text{ A}.$$

Maksimalnu korisnost pri struji od 19,61 A dobivamo iz izraza (E):

$$\eta_{\max} = \frac{167{,}93}{165{,}25 + 1{,}37\ I + \dfrac{526{,}95}{I}} = 0{,}7668.$$

[Maksimalna korisnost je 76,68 %, a nastaje pri struji od 19,61 A.]

39. a) Gubici namota u armaturnome strujnom krugu iznose:

$$P_{\mathrm{Cu}} = I_{\mathrm{a}}^2 R_{\mathrm{u}} = 461^2 \cdot 0{,}042 = 8\,925{,}9 \text{ W}.$$

Električni gubici na kolektoru, prema izrazu (5.2–2), jesu:

$$P_{\mathrm{elč}} = I_{\mathrm{a}} \Delta U_{\mathrm{č}} = 461 \cdot 2{,}2 = 1\,014{,}2 \text{ W}.$$

Obodna brzina kolektora iznosi 5,89 ms^{-1}, a površina svih četkica na kolektoru je 81,92 cm^2.
Mehanički gubici na kolektoru prema relaciji (5.2–1) bit će:

$$P_{\mathrm{km}} = 0{,}1 \mu p_{\check{c}} S_{\check{c}} v_{\mathrm{k}} = 0{,}1 \cdot 0{,}15 \cdot 20 \cdot 81{,}92 \cdot 5{,}89 = 144{,}7 \text{ W}.$$

Gubici u namotu nezavisne uzbude iznose:

$$P_{\mathrm{Cun}} = i_{\mathrm{n}}^2 R_{\mathrm{un}} = 10^2 \cdot 11 = 1\,100 \text{ W}.$$

Gubici u zubima željeza armature, uz frekvenciju rotora od 16,66 Hz, prema jednadžbi (6.5–7) su:

$$P_{\mathrm{Fez}} = 0{,}36\ v_{15} m_{\mathrm{z}} B_{\mathrm{zgub}}^2 f^{1{,}33} \cdot 10^{-2} = 173 \text{ W}.$$

Gubici u željezu jarma armature, bez aksijalnih kanala za hlađenje, prema izrazu (6.5–10); bit će:

$$P_{\mathrm{Fej}} = v_{15} m_{\mathrm{j}} B_{\mathrm{jr}}^2 f^{1{,}33} \left[0{,}25 + \left(\frac{0{,}4 h_{\mathrm{jr}}}{h_{\mathrm{jr}} - n_{\mathrm{r}} h_{\mathrm{r}}}\right)^2\right] 10^{-2} = 133{,}2 \text{ W}.$$

Gubici zbog trenja i ventilacije, prema izrazu (6.5–5), jesu:

$$P_m = 0{,}885\ D_a^2 k_{tr}(l_r + 2l_g)n^{1,5} = 343{,}9\ \text{W}.$$

Ukupni gubici u užem smislu obuhvaćaju sve gubitke, osim gubitaka nezavisne uzbude, a iznose:

$$P'_g = P_{Cu} + P_{elč} + P_{km} + P_{Fez} + P_{Fej} + P_m = 10\ 734{,}9\ \text{W}.$$

Korisnost motora u užem smislu prema izrazu (6.5–3) bit će:

$$\eta' = \frac{P_2}{P_2 + P'_g} = 0{,}7884.$$

Ukupni gubici u širem smislu su:

$$P_g = P'_g + P_{Cun} = 11\ 834{,}9\ \text{W},$$

a korisnost motora u širem smislu je:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_g} = 0{,}7717.$$

[Pojedinačni gubici i korisnost motora u užem i širem smislu za brzinu vrtnje od 250 min^{-1} prikazani su u tablici na sl. 24.]

Brzina vrtnje	min^{-1}	150	250	500
P_{Cu}	W	8 925,9	8 925,9	9 317,3
$P_{elč}$		1 014,2	1 014,2	1 036,2
P_{km}		86,8	144,7	289,4
P_{Fez}		87,6	173	109
P_{Fej}		67,5	133,2	84
P_m		159,8	343,9	972,7
P_9'		10 341,8	10 734,9	11 808,6
P_2		24 000	40 000	40 000
η	1	0,6988	0,7884	0,7721
P_{Cun}	W	1 100	1 100	286
P_9		11 441,8	11 834,9	12 094,6
η	1	0,6772	0,7717	0,7678

Sl. 24.

b) Da se odredi korisnost motora u širem smislu, pri podešavanju brzine vrtnje slabljenjem magnetskog toka glavnih polova, valja u gubitke nezavisne uzbude uračunati i gubitke na otporu u krugu nezavisne uzbude.

Napon nezavisne uzbude pri punome magnetskom polju je $u_n = i_n R_{un} = 110$ V. Gubici u strujnom krugu nezavisne uzbude, pri brzini vrtnje od 500 min^{-1} uz oslabljeno magnetsko polje glavnih polova, bit će:

$$P_{Cun} = u_n i_n = 286 \text{ W}.$$

[Pojedinačni gubici i korisnost motora u užem i širem smislu za brzine vrtnje od 150 i 500 min^{-1} prikazani su u tablici na sl. 24.]

40. Uvodno određujemo polni korak τ_p, korak kolektorske lamele τ_k, frekvenciju rotora f, vodljivost materijala vodiča namota armature uz 20°C $\varkappa_{hl}$, koeficijent povećanja otpora zbog zagrijavanja vodiča k_t, presjek vodiča namota armature (kataloški podatak) q_a, otpor namota armature u zagrijanom stanju R_a, struju armature I_a i osnovne gubitke u namotu armature P_{Cua}:

$\tau_p = 314$ mm, $\tau_k = 4{,}44$ mm, $f = 60$ Hz, $\varkappa_{hl} = 57 \dfrac{\text{Sm}}{\text{mm}^2}$, $k_t = 1{,}47$, $q_a = 24{,}84$ mm^2, $R_a = 0{,}01113\ \Omega$, $I_a = 1073$ A i $P_{Cua} = 12\,814$ W.

a) Brojna visina vodiča je prema izrazu (4.5–31.a):

$$\xi' = \frac{h_v}{503}\sqrt{\frac{b_{Cu2}\varkappa_{hl} f}{b_{u2}} \cdot \frac{255}{235 + \vartheta}} = \frac{11}{503}\sqrt{\frac{1{,}8 \cdot 5 \cdot 57 \cdot 60}{11{,}8}\,\frac{255}{235 + 140}} = 1{,}172.$$

Omjer σ_g prema izrazu (6.5–20) iznosi:

$$\sigma_g = \frac{D_a[b_č + (u - 1)\tau_k]}{D_k \tau_p} = 0{,}148.$$

Kritična je visina vodiča prema relaciji (6.5–26):

$$h_{kr} = 1{,}9\,\frac{h_v}{\xi'}\sqrt[3]{\frac{l_v}{l_ž m_v^2}} \cdot \sqrt[6]{\sigma_g} = 13{,}93 \text{ mm}.$$

[Kritična je visina vodiča armaturnog namota 13,93 mm.]

b) Koeficijent brojnosti vodiča iznosi prema izrazu (6.5–19):

$$k_{gub} = 0{,}0492\ m_v^2\,\frac{l_ž}{l_v} = 0{,}08178.$$

Dodatni gubici u armaturnom namotu nastali djelovanjem poprečnoga magnetskog polja bit će prema relaciji (6.5–17):

$$P_{Cudp} = \frac{k_{gub}\,\xi'^4}{0{,}13\xi'^2 + \sigma_g} P_{Cua} = 6054 \text{ W}.$$

$$[P_{Cudp} = 6054 \text{ W}]$$

c) Dodatni gubici u armaturnom namotu uzrokovani djelovanjem uzdužnoga magnetskog polja iznose prema izrazu (6.5–21):

$$P_{Cudu} = \left[\frac{h_v \varkappa_{hl} f(B'_{zd} - 1{,}6)}{4k_t \Gamma_a}\right]^2 \frac{l_ž}{l_v} P_{Cua} = 5\,116 \text{ W}.$$

$$[P_{Cudu} = 5116 \text{ W}]$$

7. PRELAZNA STANJA I UPRAVLJANJE ISTOSMJERNIM STROJEVIMA

Razmatrajući vrste istosmjernih strojeva i njihova svojstva te vanjske karakteristike, u prethodnim smo poglavljima obradili stacionarna stanja pojedinih vrsta strojeva, spominjući tek tu i tamo poneki detalj o problematici stavljanja u pogon, o prelaznim pojavama i stanjima ili slično. U ovom poglavlju obradit će se neka od prelaznih stanja istosmjerernih strojeva, prije svega *spora* prelazna stanja, kao, recimo, promjenu brzine vrtnje istosmjernih motora, probleme prilikom stavljanja u pogon i slično.

7.1. Stavljanje u pogon istosmjernih strojeva

Kao prvo od praktičkog interesa u prelaznim stanjima, nameće se pitanje kako se istosmjerni strojevi stavljaju u pogon, kako se upuštaju i priključuju na mrežu. Za istosmjerne motore i generatore to zacijelo neće biti jednak postupak. Također treba očekivati stanovite, razlike i među motorima (dakako i generatorima) različitih vrsta, odnosno spojeva uzbude. Prikažimo, dakle, ta pitanja sistematski onim redom kojim smo uvodili vrste istosmjernih strojeva u šestom poglavlju.

7.1.1. Stavljanje u pogon istosmjernih generatora

Želimo li bilo koji generator istosmjerne struje dovesti od stanja mirovanja do njegove potpune funkcije izvora istosmjerne struje (energije), moramo najprije pogonskim strojem (turbinom, dizelskim ili električkim izmjeničnim motorom) uspostaviti njegovu (obično nazivnu) brzinu vrtnje. Pri tome se poredni generatori već sami uzbude ukoliko im u uzbudnom krugu nije uključen preveliki omski otpor, ili ako im slučajno nije krug uzbude zatvoren. Nezavisni generatori uzbuđuju se priključkom uzbudnoga strujnog kruga na izvor strane uzbude, što se može učiniti i neposredno prije mehaničkog upuštanja ili poslije, kad se stroj već nalazi u vrtnji. Regulacijskim otpornikom podesi se generatoru uzbuda tako da napon na stezaljkama odgovara onome koji se u pogonu zahtijeva, i generator je spreman da preuzme teret. U pogonu pod opterećenjem mijenja se napon na stezaljkama zbog već poznatih razloga. Tad se, ako je ta promjena nepoželjna, regulacijskim otpornikom u uzbudnom krugu podešava uzbuda, tako da i pod opterećenjem na stezaljkama i u mreži vlada željeni napon. To se podešavanje izvodi rukom ili automatskim regulatorom napona kad ga ima.

Izuzetak u podešavanju napona čine kompaundirani generatori, koji su tako građeni i spojeni da pri raznim opterećenjima drže približno konstantan napon stezaljki, kako je to otprije poznato.

Serijski je generator isključen iz tih razmatranja jer on i nije mrežni generator u pravom smislu. Zbog onih rijetkih primjera kad on napaja neki posebni izvor, recimo nešto i o njegovu upuštanju. Zavrtimo li ga bez tereta, uzbudit će se on na vrlo niski napon remanencije (ako nema remanencije, neće se uzbuditi ni pod teretom!). Priključi li se tad potrošač s takvim radnim otporom da se dobije povoljan pravac samouzbude, uzbudit će se generator na napon prema vanjskoj karakteristici (vidi 6. poglavlje). Priključi li se on pod teretom (sa spojenim potrošačem), dogodit će se to isto.

7.1.2. Upuštanje istosmjernih motora

Pokretanje motora istosmjerne struje, napajanoga iz istosmjerne mreže, iz stanja mirovanja do pogonskog stanja nešto je drukčije. Velika većina motora mehanički je čvrsto spojena s pogonjenim strojem, tj. strojem koji motor pokreće, tako da je većinom već unaprijed određen karakter pokretanja: *pod teretom* ili *bez tereta* itd. Prije priključka armaturnoga strujnog kruga na mrežu potrebno je potpuno uzbuditi motor, da se ne pojavi mogućnost pobjega motora zbog slaboga glavnog magnetskog polja. Istosmjerni motor treba, dakle, da se u principu pokreće pri *punom polju*. Priključi li se nakon toga armatura uzbuđenog motora (riječ je o poredno ili nezavisno uzbuđenom motoru) na puni napon izvora (mreže) koji napaja motor, narinutom naponu suprotstavljaju se u prvom trenutku samo ukupni radni i rasipni induktivni otpori armaturnoga strujnog kruga (R_a i L_a), jer nema protuinduciranog napona E kad motor stoji. Istosmjerni poredno ili nezavisno uzbuđeni motor kreće, dakle, u kratkom spoju. Ako motor odmah ne krene u vrtnju (pretpostavimo da je zakočen), poslije izvjesnog, veoma kratkog vremena nastupi u njegovu armaturnom krugu trajna struja kratkog spoja:

$$I_k = \frac{U}{R_a}. \tag{1}$$

Ako se motor pokrene prije nego nastupi struja I_k, tj. prije nego završi brza prelazna pojava nastanka struje u armaturnome strujnom krugu, struja ne dosegne iznos I_k prema jednadžbi (1), jer se u strujnom krugu pojavi protuinducirani napon E. No, budući da je rasipni induktivitet armaturnoga strujnog kruga L_a relativno vrlo malen, pa električna prelazna pojava kratko traje, moramo pretpostavljati da će ipak nastupiti iznos I_k prema izvedenoj relaciji, tj. mora se računati sa strujom kratkog spoja. U većini primjera ta bi struja bila vrlo opasna za motor, pogotovo za kolektor, jer je mnogo puta veća od nazivne. Zato se mora poredno ili nezavisno uzbuđeni istosmjerni motor pokretati sa smanjenim naponom. Napaja li se motor iz svoga posebnog izvora (generatora ili ispravljača), može se na izvoru smanjiti napon prije ukapčanja. To je moguće u manjem broju primjera jer je u većini motor priključen na opću mrežu. Za mnogo pogonskih slučajeva potrebno je, dakle, u armaturni strujni krug uključiti predotpor R_{pred} da se smanji struja prilikom pokretanja, pa vrijedi:

$$I_p = \frac{U}{R_a + R_{pred}}. \tag{2}$$

Što je predotpor veći, to je struja u pokretanju manja. Obično su predotpori izvedeni s mnogostruko većim otporom od R_a i s više otcjepa, pa se cijeli predotpor uključuje u trenutku priključka na mrežu, a pojedini se stupnjevi isključuju kako se motor ubrzava, tj. kako mu raste protuinducirani napon E. Pojava i postupak veoma su slični upuštanju kolutnih asinhronih motora. Uključivanjem predotpora ubrzava se ionako brza prelazna pojava ukapčanja jer u strujnom krugu opada omjer iznosa induktiviteta prema radnom otporu, tj. opada vremenska konstanta armaturnog kruga $T_a = \frac{R_a}{L_a}$. Budući da je već prije istaknuto kako je induktivitet L_a malen, postaje razumljivo da se za praktički račun upuštanja s predotporima računa samo s radnim otporima u strujnom krugu. Daljnja teorija i proračun predotpora, koje nazivamo uputnicima ili pokretačima, ubraja se u probleme elektromotornog pogona [L 58].

Serijski uzbuđenome motoru nije moguće uzbuditi magnetsko polje prije priključka na mrežu, zbog zajedničkoga strujnog uzbudnog i armaturnog kruga, koji se uključuju istodobno. Tad struja kratkog spoja iznosi:

$$I_k = \frac{U}{R_u + R_a}, \tag{3}$$

pri čemu je R_u otpor uzbudnog namota. Ona je očito, usporedivši izraz s relacijom (1), manja od one nezavisno uzbuđenog motora, ali je još uvijek kudikamo prevelika. Zato se početna struja smanjuje predotporom:

$$I_p = \frac{U}{R_a + R_u + R_{pred}}, \tag{4}$$

a motor se upušta jednako kao i nezavisno uzbuđeni, pa se i za njega koristi posebnim uputnicima ili pokretačima kad se on priključuje na mrežu. Kad je priključak na posebnu mrežu, nema razlike u postupku od onog nezavisno uzbuđenog motora.

Iz razlaganja o nezavisno i serijski uzbuđenim motorima jasno je da se i kompaundirani motor upušta na jednak način.

7.1.3. Promjene opterećenja, prelaz iz motorskoga u generatorsko stanje i obrnuto

Istosmjernome motoru i generatoru s vlastitom mrežom opterećenje (struja) ovisi o potrošaču i vanjskoj karakteristici stroja. Nekim zahvatom u pogon (recimo promjenom uzbude) ne može se nešto bitno mijenjati, a takvi eventualni zahvati redovno su i štetni, a ne korisni. Generatoru na općoj mreži (s više generatora) prilike su drukčije. On se može opterećivati ili rasterećivati uz promjenu uzbude. No, kako je istosmjernih mreža sve manje, to pitanje nije danas zanimljivo. Isključimo li, dakle, taj izuzetni pogon, struja će se u istosmjernom stroju uspostaviti prema teretu, odnosno momentu tereta M_t na osovini motora, i radnom otporu potrošača R_t na stezaljkama generatora. Pri tome će (uz

konstantan teret) uvijek vladati naponska ravnoteža u armaturnom krugu (prema drugome Kirchoffovu zakonu):

$$U = E \pm I_a R_a, \tag{5}$$

gdje predznak plus vrijedi za motor, a predznak minus za generator. Jednako će tako vladati mehanička ravnoteža na osovini stroja:

$$M_m = M_t, \tag{6}$$

tj. moment motora M_m potpuno se prilagođava momentu mehaničkog tereta M_t u motorskom radu, odnosno moment opiranja generatora $(-M_m)$ jednak je momentu $(-M_t)$ što ga daje pogonski stroj (turbina, motor) u generatorskom radu. Predznaci su momenta, dakako, stvar dogovora, tj. da $+M_m$ znači moment stroja u motorskom radu kad električki stroj predaje moment pogonjenom stroju (radnom mehanizmu). Važno je pri tome da električki stroj uz konstantni teret (statičko stanje) uvijek radi u radnoj točki vanjske karakteristike koja zadovoljava uvjete jednadžbi (5) i (6). Promijeni li se teret, mijenja se (prelaznom pojavom) i radna točka stroja. Teret je neovisan o našoj volji i pojavljuje se kao nezavisna varijabla, a stroj ga slijedi ($M_m = M_t$, odnosno $I_a = I_t$). Dakle, stroj uspostavlja novo stanje na osnovi promjene tereta. Ali to se događa i zbog nekoga našeg vanjskog zahvata u sistem pogona (npr. želimo li motor u motorskom radu prevesti u generatorski, da on koči kao generator). U svakom slučaju, velika promjena tereta (ali i naš zahvat) može u principu stroj prevesti iz motorskoga u generatorski rad, ili obrnuto. Zanimljivo je da za razne vrste istosmjernih strojeva razmotrimo to pitanje. Pri promjeni motorskoga u generatorski rad mora se promijeniti predznak momenta M_m. Prema jednadžbi (4.2–4) $M_m = k_m \Phi_{gl} I_a$ to se zbiva bilo promjenom predznaka glavnog toka Φ_{gl}, bilo predznaka struje I_a. Uzmimo u razmatranje razne vrste strojeva (pri čemu neće biti riječi o svim mogućnostima operacija strojevima). Za nezavisno uzbuđeni ili poredni motor predznak glavnog toka Φ_{gl} može se izvesti postupkom promjene uzbudne struje i_u, pri čemu nju treba smanjiti na vrijednost 0 i onda je podići na vrijednost $-i_u$. Za uključeni motor (posebno slabo opterećeni) ima realnih mogućnosti da on pobjegne i ošteti se kad mu se glavni tok smanji (vidi 6. poglavlje). Zato se ta operacija ne izvodi u praksi (ili se obavlja uz prethodno isključeni stroj). Mudrije je mijenjati predznak momenta promjenom smjera struje. Pojača li se motoru (naglo) uzbuda, inducirani će napon E porasti toliko da je veći od narinutoga U i struja se mijenja od neke $+I_a$ preko 0 do neke $-I_a$, pri čemu stroj prelazi u generatorsko stanje. Naravno, takav će se pogon održati generatorskim ako stroj na koji je mehanički priključen naš motor može davati (a ne samo primati) mehanički moment M_t (odnosno $-M_t$). Ako to ne ide (radni mehanizam je pasivan), smanjivat će se brzina vrtnje n, a s njom i inducirani napon E stroja prema jednadžbi (4.1–5), sve dok ne postane manji od U kad se uspostavi novo statičko motorsko stanje s nekom novom brzinom vrtnje n i novim (pozitivnim) momentom motora M_m. Te nove vrijednosti ovise o karakteru momenta tereta M_t, o čemu će biti više riječi u proučavanju elektromotornih

pogona. Nezavisno ili poredno uzbuđeni generator dade se uvijek prevesti u motorsko stanje smanjenjem glavnog toka Φ_{gl} (uzbudne struje i_u), što će se trajno zadržati kad je riječ o generatoru u mreži, a generatoru s vlastitom mrežom (ili samo jednim potrošačem) uspostavit će se novo pogonsko generatorsko stanje uz smanjeni novi napon U. Sve rečeno vrijedi za prilike gdje smisao vrtnje stroja ostaje isti. Naime, otkopčamo li uzbudni namot s izvora uzbude i promijenimo li smjer uzbudne struje (i_u u $-i_u$) ili isključimo li armaturni namot s izvora napona i promijenimo smisao napona (U u $-U$), promijenit će se trajno smisao zadane brzine vrtnje n, i o tome će biti više riječi kad budemo razmatrali pitanja podešavanja brzine vrtnje. Nije naodmet napomenuti da istodobna promjena i smjera uzbudne struje i smisla napona armature U dovodi do stanja identičnoga onome prije promjene, dakako nakon izvjesne prelazne pojave ovisne o načinu kojim smo to izveli.

Razmotrimo serijski istosmjerni stroj. Odmah vidimo da ga ne možemo prevesti iz motorskoga u generatorski rad uz isti smisao brzine vrtnje jer bi smanjenje uzbude (moguće samo smanjenjem tereta, zbog toga što je $I_a = i_u$) sigurno uzrokovalo pobjeg i oštećenje (uništenje) stroja. Promijenimo li prekapčanjem bilo samo uzbude, bilo samo stezaljki armature Φ_{gl}, odnosno I_a, dobivamo sigurnu promjenu osnovnog (zadanog) smisla brzine vrtnje. Očito je da će upravljanje motorskim radom serijskog stroja biti mnogo složenije nego nezavisno (poredno) uzbuđenog motora, a generatorski će rad biti zanimljiv samo kao kočno stanje.

Kompaundirani stroj pokazuje izvjesne teškoće jer mu je jedan od uzbudnih namota serijski. Zato se prilikom svih operacija sličnih opisanima za nezavisno uzbuđeni stroj obično serijski uzbudni namot ili iskopča ili prekopča kad se mijenja predznak armaturne struje.

7.2. Razbuđivanje istosmjernog stroja. Osnove prelaznih pojava

Pod pojmom razbuđivanja istosmjernog stroja razumijevamo proces smanjivanja uzbudne struje do iznosa jednakoga nuli, do čega u praksi dolazi npr. pri isključivanju stroja iz rada. To se praktički izvodi uključivanjem sve većeg otpora u uzbudni strujni krug, sve dok se on potpuno otvori, tj. dok se uzbudni krug galvanski prekine. Pri tome je važno napomenuti da taj proces ne smije ići prebrzo, a pogotovo se ne smije trenutno otvoriti (prekinuti) uzbudni strujni krug zbog velikog induktiviteta L_u uzbudnog namota. Pri promjeni (smanjenju) struje inducira se u uzbudnome strujnom krugu, na njegovim stezaljkama, napon:

$$e = -w_u \frac{d\Phi}{dt} = -L_u \frac{di_u}{dt}, \tag{1}$$

pri čemu je s w_u označen broj zavoja uzbudnog namota. Φ u jednadžbi (1) sadrži u sebi ukupno magnetsko polje, tj. glavno magnetsko polje stroja i rasipno polje uzbudnog namota. Zato je L_u veliko, pa ako je još i derivacija uzbudne struje $i_u - di_u/dt$ velika zbog kratkog vremena iskapčanja, jako raste napon samoindukci-

je u uzbudnom krugu. Taj visoki napon, koji bi pri trenutnom isključenju bio čak beskonačno visok, može uništiti (probiti) izolaciju svitka uzbudnog namota ili izazvati luk na kontaktima i tako oštetiti stroj. Zato mora proces iskapčanja uzbude teći relativno polako. Međutim, u trenutku iskapčanja bilo kako male struje uzbude, iznos di_u/dt još je uvijek opasan, pa se otpornik za regulaciju uzbude u praksi izvodi tako da se u trenutku konačnog isklapanja uzbudni namot kratko spoji sam u sebe. Praktički se to izvodi tako da u trenutku kad se otvara posljednji kontakt regulacijskog otpornika koji otvara strujni krug, istodobno se zatvara jedan drugi kontakt koji uzbudni krug kratko spoji sam u sebe.

7.2.1. Osnove električkih prelaznih pojava istosmjernih strojeva

Već smo u razlaganju spominjali brze i spore prelazne pojave. Ovdje ćemo se ograničiti na električke. S druge strane, poznato nam je iz osnova elektrotehnike (L 55) da struja u istosmjernome strujnom krugu kojem smo narinuli napon ne raste skokovito, već se mijenja u skladu s vremenskom konstantom:

$$T = \frac{L}{R}, \tag{2}$$

gdje je L induktivitet, a R radni otpor promatranoga strujnog kruga. Za očekivati je da će se tako ponašati i strujni krugovi našega istosmjernog stroja, te da će u prelaznim pojavama struje u njegovim strujnim krugovima kasniti za naponom s istom zakonitošću koja vrijedi i za pasivni istosmjerni strujni krug. U tehnici proizvodnje ide se sve više u pravcu ubrzavanja procesa i uklanjanja njihovih mrtvih hodova, te i u pravcu automatizacije bilo pojedinih strojeva, bilo cijelih procesa. Tu se istosmjerni stroj sve više pojavljuje kao element takva procesa, pa se sve više počinje voditi računa i o njegovim prelaznim pojavama i njihovu trajanju. Postaje zanimljivo osim trajanja tih prelaznih pojava i pitanje njihova skraćenja, tj. pojavljuje se potreba točne obrade prelaznih stanja istosmjernih strojeva. Posljedica je toga da se u konkretnim proračunima sve više moraju uzimati u obzir i tromosti u stroju, odnosno vremenske konstante koje karakteriziraju prelaz iz jednoga pogonskog stanja u drugo. U električkom smislu u biti su dvije takve tromosti u istosmjernom stroju. Jedna je tromost uzbudnog namota karakterizirana vremenskom konstantom $T_u = L_u/R_u$, a druga je tromost glavnog ili armaturnoga strujnog kruga karakterizirana vremenskom konstantom unutrašnjeg ili armaturnog kruga stroja $T_a = L_a/R_a$. Pri tome je R_a ukupni otpor svih u seriju spojenih namota u armaturnom krugu, a L_a je rasipni induktivitet tog kruga. Induktivitet uzbudnog namota L_u je relativno velik prema otporu tog namota jer on predstavlja glavni magnetski tok stroja Φ_{gl} i rasipni magnetski tok Φ_s uzbudnog namota, dakle ukupni magnetski tok stroja. Induktivitet glavnoga strujnog kruga relativno je malen prema otporu tog kruga jer predstavlja samo rasipni magnetski tok armaturnog i kompenzacijskog namota, te namota pomoćnih polova, uz rezultantni magnetski tok nastao zbog reakcije armature i pomoćnih polova u komutacijskoj zoni. Zbog toga je vremenska konstanta

glavnoga strujnog kruga T_a obično mnogo puta manja od vremenske konstante uzbudnog kruga. Vrijedi približno:

$$T_u \doteq (5-20)\ T_a, \tag{3}$$

pa se T_a u proračunima često zanemaruje. Sami proračuni temelje se na onome što je u osnovama elektrotehnike i teorijskoj elektrotehnici rečeno o ukapčanju i iskapčanju istosmjernih strujnih krugova, pa ovdje u njih nećemo ulaziti.

Važno je upozoriti na još neke pojedinosti o dinamičkim svojstvima istosmjerih strojeva, prije svega na utjecaj zasićenja željeza u električnim krugovima. Induktivitet armaturnog kruga L_a predstavlja u biti putove rasipnoga magnetskog toka i toka u pomoćnom polu koji se gradi nezasićen. Iz tih razloga je i armaturna vremenska konstanta T_a praktički zaista konstantna veličina. Drukčije je s vremenskom konstantom uzbudnog namota T_u. Ona je konstantna pri konstantnoj uzbudnoj struji i_u, bilo kakva ova bila. Ali zna biti znatno različita pri raznim veličinama te struje. Pri niskim uzbudnim strujama, gdje je željezo magnetskog kruga stroja nezasićeno, T_u je konstantno. Za veće uzbudne struje željezo je magnetskog kruga stroja sve zasićenije kako struja raste, induktivitet uzbudnoga strujnog kruga L_u sve je manji, pa s njim i vremenska konstanta. Na slici 1. u principu je prikazano kako se zasićuje stroj s porastom uzbudne struje. Za vremensku konstantu T_u može se još pisati:

$$T_u = \frac{L_u}{R_u} = \frac{w_u \Phi}{i_u R_u} = k\,\frac{\Delta\Phi}{\Delta\Theta},$$

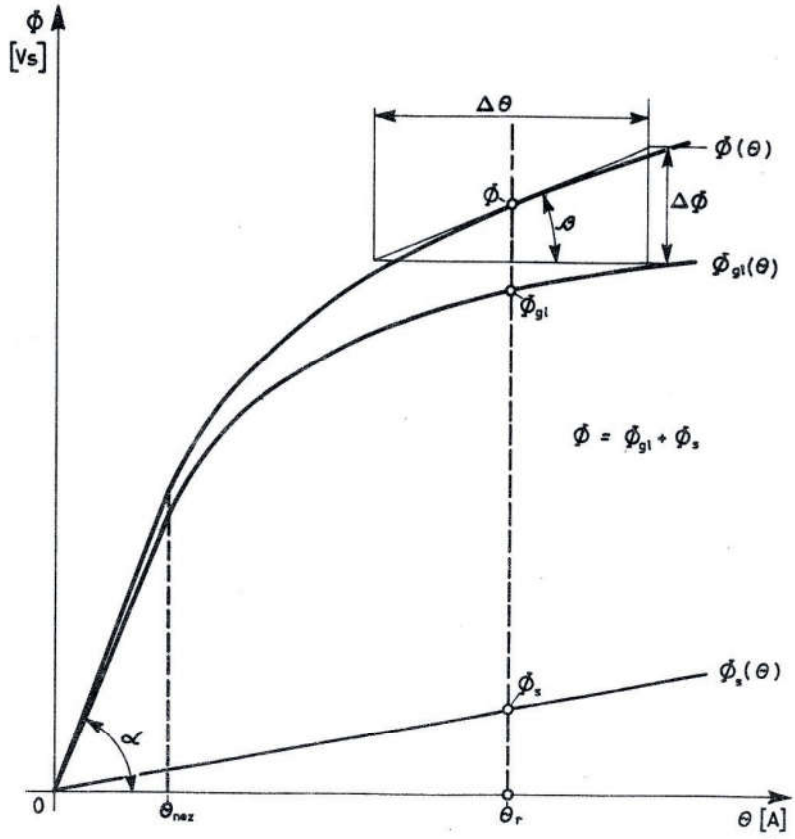
pri čemu je k konstanta proporcionalnosti, $\Delta\Phi$ promjena ukupna magnetskog toka stroja, a $\Delta\Theta$ promjena protjecanja koje izaziva promjenu toka. Uvedemo li oznaku T_{un} za vremensku konstantu uzbudnog namota stroja s nezasićenim magnetskim krugom, uz pomoć slike 1. pišemo:

$$T_u = T_{un}\,\frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}\alpha}, \tag{4}$$

pri čemu su α i β kutovi definirani slikom. Za naš primjer sa slike 1. uz radnu točku definiranu protjecanjem Θ_r vremenska konstanta T_u već je mnogostruko manja od T_{un}. Jako zasićenim strojevima ona može biti i još znatno manja. Zbog toga strojevi koji služe kao elementi upravljanja regulacijskim procesom, redovno rade kao nezasićeni (na nezasićenom dijelu karakteristike), kako se ne bi u regulacijski sistem unosili nelinearni utjecaji. Nije naodmet napomenuti da je područje omjera vremenskih konstanta uzbude T_u i armature T_a u jednadžbi (3) dano uz pretpostavku nezasićenoga magnetskog kruga stroja.

Na vremenske konstante utječe dakako i radni otpor. One se mogu smanjivati, da bi se ubrzao proces promjene struje, i dodavanjem radnog otpora u strujni krug, što se ponekad, ali uglavnom rijetko, čini. Ono na što se ovdje htjelo upozoriti je činjenica da se radni otpor strujnih krugova i uzbude i armature mijenja sa zagrijavanjem stroja u radu. Ta promjena (povećanje) različita je za razne prilike, već prema konkretnom zagrijanju, a kreće se u stvarnosti između 20

i 30 %. Za toliko se radni otpori povećavaju, a vremenske se konstante adekvatno smanjuju. Zato smo i upotrebljavali izraz da su vremena konstante *praktički* konstantne veličine tamo gdje nema utjecaja zasićenja željeza magnetskog kruga.



Sl. 1. Skica uz prikaz objašnjenja utjecaja zasićenja magnetskog kruga istosmjernog stroja na vremensku konstantu uzbudnog kruga T_u

Na kraju recimo nešto o redu veličine vremenskih konstanta konkretnih strojeva. Veličine su tih konstanta individualne za svaki stroj i ovise o mnogo činilaca. Za dobro građene strojeve može se reći da je red veličine uzbudne vremenske konstante T_u stroju snage od 1 [kW] oko 0,1 [s], stroju snage od 100 [kW] oko 0,8 [s], a stroju granične snage od 10 MW oko 5 [s]. Te su brojke samo orijentacijske, da se stekne osjećaj o redu veličine.

7.3. Podešavanje brzine vrtnje istosmjernog motora

Sposobnost podešavanja i regulacije brzine vrtnje istosmjernog motora upravo je ono svojstvo koje ga je održalo u konkurenciji s jeftinijim izmjeničnim motorima. Prema prije izvedenome osnovnom zakonu, u jednadžbama (4.1–5.b) i (4.3–1):

$$n = \frac{E}{k'_e \Phi_{gl}} = \frac{U - I_a R_a - \Delta U_č}{k'_e \Phi_{gl}}, \qquad (1)$$

pri čemu je R_a ukupni otpor u armaturnom krugu, moguća su dva osnovna načina podešavanja brzine vrtnje: podešavanje promjenom narinutog napona U, ili, kraće, *podešavanje naponom*, i podešavanje promjenom uzbude i time promjenom magnetskog polja ili, kraće, *podešavanje poljem*.

7.3.1. Podešavanje brzine vrtnje nezavisno (poredno) uzbuđenog motora

Podešavanje naponom efikasno je od brzine vrtnje motora jednake nuli do brzine vrtnje koja odgovara nazivnom naponu motora, dakako uz neku konstantnu, obično nazivnu uzbudu. Obično je to uz punu uzbudu ili puni magnetski tok motora. To je veliki opseg podešavanja. Pitamo se koliko se snage ili momenta može izvući iz motora pri takvu podešavanju. Tu ima odlučnu riječ hlađenje motora. Ako je motor hlađen strujom zraka koja ne potječe od njegova vlastitog ventilatora, pa je neovisna o brzini vrtnje, onda se u cijelom opsegu podešavanja motor dade opteretiti konstantnom strujom. Budući da za moment vrtnje motora vrijedi relacija (4.2–4):

$$M_m = k_m \Phi_{gl} I_a, \tag{2}$$

to za podešavanje naponom uz vanjsku ventilaciju može moment motora ostati konstantan u cijelom području regulacije. Za takve okolnosti snaga je motora proporcionalna brzini vrtnje, odnosno približno proporcionalna narinutom naponu. Hladi li se motor vlastitim ventilatorom, mora mu se smanjivati struja prilikom smanjivanja brzine vrtnje, da se motor ne bi pregrijao. Tad se više ne da održati konstantan moment u cijelom opsegu podešavanja, pa je uz sporiju vrtnju i moment manji. Tad, dakako, i snaga opada više nego proporcionalno smanjenju brzine vrtnje.

Podešavanje poljem izvodi se tako da se narinuti napon drži konstantnim, a polje se smanjuje smanjivanjem uzbudne struje. Opseg podešavanja poljem ne da se postići po volji velik; za motore normalne izvedbe on iznosi otprilike 1 : 2, tj. s podešavanjem brzine vrtnje može se ići do dvostrukog povećanja s obzirom na brzinu pri punom iznosu glavnoga magnetskog toka. Posebno građenim motorima postiže se veći omjer brzine vrtnje pri podešavanju poljem, i to 1 : 3, ali se više od toga gotovo redovito ne može ostvariti. Pokazat ćemo koji su tome razlozi.

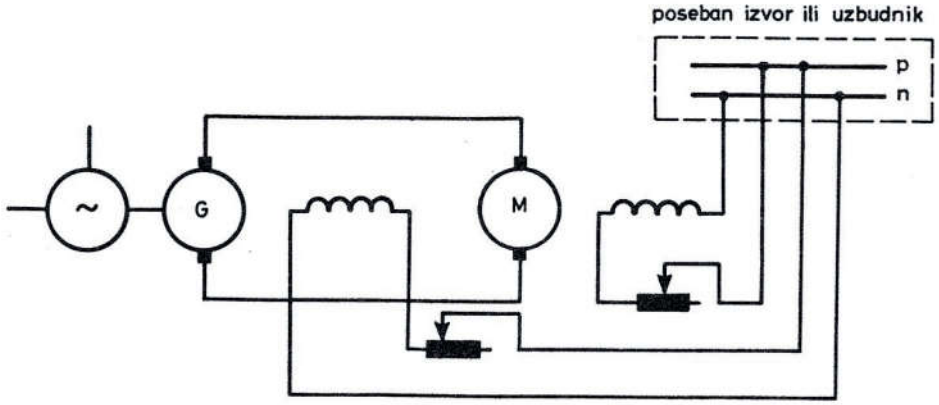
Pri vrlo malom iznosu glavnoga magnetskog polja postaje motor nestabilan, pa može lako pobjeći. Nastupaju i teškoće zbog komutacije jer se uslijed povećane brzine vrtnje skraćuje njezino trajanje. I mehanička naprezanja, uzrokovana centrifugalnim silama, rastu s kvadratom brzine vrtnje, pa imaju važnu ulogu, no većinom granicu ipak određuju stabilnost i komutacija. Za mogućnost iskorištenja motora uz podešavanje poljem važno je ovo: Podešavanje poljem obavlja se uz konstantan narinuti napon, a budući da se pri povećanju brzine vrtnje hlađenje poboljšava, bez daljnjega će se moći održati i konstantna struja, ili se ona smije čak i povećavati s porastom brzine vrtnje motora. Sve to vrijedi samo kad ne

nastupaju komutacijske teškoće. Dakle, nije problem održati konstantnu snagu pri regulaciji poljem ako to dopuštaju komutacijska naprezanja. Budući da su moment i snaga vezani poznatom relacijom:

$$P[\mathrm{W}] = M\omega, \tag{3}$$

to moment vrtnje pri podešavanju poljem uz konstantnu snagu opada, tj. mijenja se obrnuto proporcionalno brzini vrtnje. To je u skladu i sa zakonom prema jednadžbi (2), jer upravo smanjivanjem glavnog toka Φ_{gl}, s jedne strane, raste brzina vrtnje, a, s druge strane, opada moment.

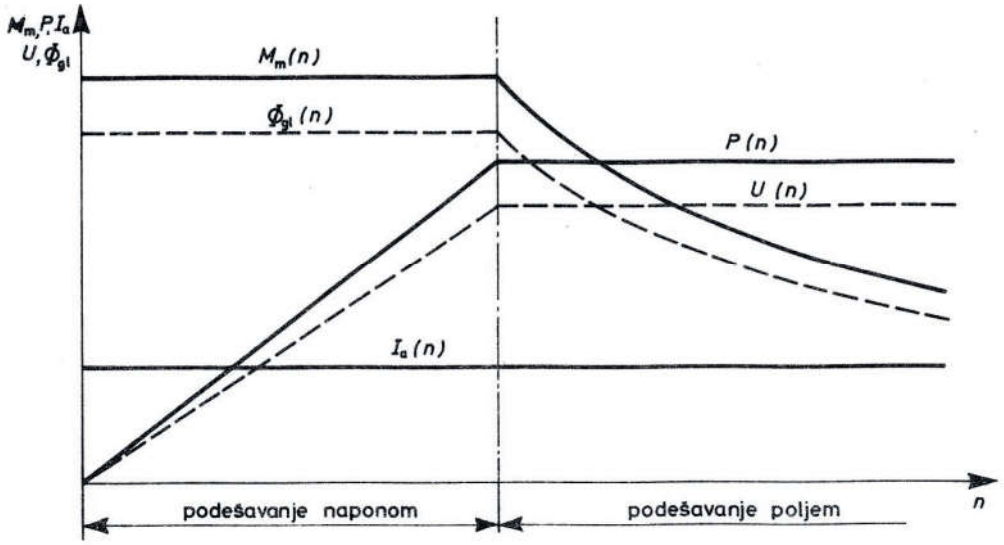
Za regulaciju brzine vrtnje istosmjernih nezavisno uzbuđenih motora prirodno je, dakle, da se konstantni moment postiže podešavanjem naponom, a konstantna snaga podešavanjem poljem. Tu je podešavanje relativno lako, ekonomično i jeftino s obzirom na cijenu stroja. Odstupanjem od toga nastaju teškoće. Želimo li npr. podešavati poljem brzinu vrtnje nekom motoru u granicama od 500 do 1500 [min^{-1}] (1:3) uz konstantni moment moramo maksimalni magnetski tok imati pri 500 [min^{-1}]. Pri 1500 [min^{-1}] treba magnetski tok oslabiti na trećinu iznosa, a da se prema izrazu (2) održi konstantni moment, morala bi struja porasti na trostruku vrijednost od one pri 500 [min^{-1}]. Tipna snaga takva motora tri puta je veća nego kad bismo isto podešavanje uz isti uvjet izveli kao podešavanje naponom, a to znači da nam je stroj prema zakonu sličnosti $3^{3/4} \doteq 2{,}3$ puta teži i skuplji.



Sl. 1. Skica Leonardova spoja

Posebno veliki opseg podešavanja ima istosmjerni nezavisno uzbuđeni motor u Leonardovu spoju, prikazanome na slici 1. Motor je jedini potrošač svoga generatora, tako da njihove armature čine zatvoreni strujni krug. Generator je mehanički pogonjen posebnim izmjeničnim (asinhronim ili sinhronim) motorom (iz trofazne mreže). Uzbuda i generatora i motora priključena je odvojeno na isti nezavisni izvor, posebnu mrežu, ili na mali istosmjerni (kompaundirani) uzbudnik, koji je postavljen na istu osovinu s generatorom. Obje uzbude mogu se podešavati promjenljivim otpornicima. Regulira li se uzbuda generatora uz konstantnu uzbudu motora, mijenja se napon na motoru, tj. motor se podešava naponom.

Podešava li se uzbuda motora uz konstantnu uzbudu generatora, mijenja se magnetski tok motora uz nepromijenjeni napon, dakle motor se podešava poljem. Na slici 2. nacrtane su promjene veličina U, Φ_{gl}, I_a, M_m i P u cijelom opsegu podešavanja motora u Leonardovu spoju. Tim se spojem do maksimuma iskorištava regulacijska sposobnost istosmjernoga poredneg i nezavisnog motora.



Sl. 2. Dijagram promjena veličina napona U, glavnoga magnetskog polja Φ_{gl}, momenta motora M_m, struje armature I_a i snage motora P, sve ovisno o brzini vrtnje n pri podešavanju brzine vrtnje istosmjernoga nezavisno uzbuđenog motora Leonardovim agregatom

U principu Leonardov agregat izvodi se u više raznih verzija, no to za načelne mogućnosti podešavanja istosmjernoga nezavisno uzbuđenog motora nema posebnog značenja. Danas napajanje motora iz Leonardova agregata pomalo nestaje iz prakse. Zamijenilo ga je napajanje (i upravljanje naponom) izravno iz izmjenične mreže preko ispravljačkih mostova. To su obično višefazni punoupravljivi ili poluupravljivi mostovi elementi (ventili) kojih su silicijeve diode i tiristori, a u najnovije vrijeme i tranzistori snage. Takvo upravljanje ima znatnih ekonomskih prednosti, pretvaračko-upravljački most je jeftiniji od Leonardova agregata, a i utrošak električne energije znatno je manji zbog mnogo bolje korisnosti η upravljačkog mosta nego Leonardova agregata. No napajanje i upravljanje pomoću ispravljačkih mostova postavlja nove zahtjeve pred sam motor, pa to valja temeljito obraditi. Cijelo jedanaesto poglavlje bit će posvećeno napajanju motora uz pomoć ispravljačkih spojeva, pa zato ovdje nećemo dalje ulaziti u ta pitanja.

Za upravljanje i (automatsku) regulaciju istosmjernog motora posebno je važna brzina upravljanja, tj. koliko je potrebno vremena da se počevši od jednog stanja (brzine vrtnje) uspostavi novo, željeno stanje (brzina vrtnje). Uz neke ostale utjecaje, u koje ovdje nećemo ulaziti, vrlo je važno kojom se brzinom uspostavlja nova struja u strujnom krugu kojim upravljamo. Tu ima nesumnjivu prednost upravljanje naponom pred upravljanjem poljem, zbog bitno manje

električke vremenske konstante armaturnoga strujnog kruga prema vremenskoj konstanti uzbudnog kruga – vidi jednadžbu (7.2–3). Upravljanju poljem prednost je samo u tome što je snaga potrebna za upravljanje (upravljačka aparatura) manja.

7.3.2. Podešavanje brzine vrtnje serijski uzbuđenog motora

I za serijski motor vrijede u cijelosti jednadžbe (1), (2) i (3). No njime se ne može upravljati odvojeno naponom, a odvojeno poljem; bolje rečeno, ne može se upravljati poljem uopće. Tome je razlog što su mu struja uzbude i struja armature uvijek iste, $I_a = i_u$. Zbog toga mijenjajući napon U istodobno mijenjamo i armaturnu struju i glavni magnetski tok, tako da tim upravljanjem dobivamo porodicu karakteristika $M(n)$ sličnih jedna drugoj, dakako serijskog karaktera. Zbog toga se serijskome motoru uopće rijetko podešava brzina vrtnje na način kakav je bio pri nezavisno uzbuđenome motoru. Napajanje preko ispravljača je često, no više zbog pokretanja niskim naponom (umjesto pokretača) nego zbog upravljanja. A posebni spojevi kojima se ipak, npr. u vuči, upravlja serijskim istosmjernim motorima pitanja su elektromotornog pogona.

7.3.3. Podešavanje brzine vrtnje kompaundiranog motora

Kompaundiranim motorom, posebno onim s malim udjelom serijske uzbude, može se upravljati, tj. podešavati mu brzinu vrtnje, slično kao nezavisno uzbuđenome. Upravlja se naponom uz istodobnu promjenu i serijske uzbude, a poljem mijenjajući samo nezavisnu uzbudu. Karakteristike imaju određenu sličnost onima nezavisno uzbuđenog motora, prema slici 2. No kako se upravljanje brzinom vrtnje i podešavanje veličina $M_m(n)$ i $P(n)$ vrlo dobro obavlja na nezavisno uzbuđenome motoru, to se za podešavanje brzine vrtnje u većem opsegu kompaundni motor ne upotrebljava, već se redovno uzima nezavisno uzbuđeni motor.

7.3.4. Osnove složenih prelaznih pojava istosmjernih strojeva

Može se pokazati da promjena bilo koje fizikalne veličine istosmjernog stroja zahtijeva promjenu svih ostalih. Ovdje nećemo ulaziti u kompleksnost tog pitanja, već ćemo samo utvrditi neke osnovne činjenice. Na sličan način kojim se induktivitet (gradnja magnetskog polja) opire promjeni struja u strujnim krugovima istosmjernog stroja, opire se promjeni brzine vrtnje motora moment inercije J, i to ukupni moment inercije i motora i stroja (radnog mehanizma) koji pogoni. To dovodi do složene elektromehaničke interakcije među električkim i mehaničkim veličinama konkretnoga elektromotornog pogona, pa zato ovdje i nećemo ulaziti dublje u to pitanje. Važno je samo uvidjeti povezanost veličina. Činjenica je da se, recimo, pri povišenju napona istosmjernom stroju (želimo upravljajući naponom povećati brzinu vrtnje) promjeni brzine vrtnje ne opire

samo kašnjenje struje armature za naponom, tj. kašnjenje formiranja povećanog momenta motora, već i inercija cijelog pogona koja izaziva kašnjenje brzine vrtnje za formiranim momentom motora. Kašnjenje brzine vrtnje uzrokuje kašnjenje povećanoga induciranog napona u motoru i – već je jasno da je pojava vrlo složena, pa ćemo je obraditi u elektromotornim pogonima.

7.3.5. Reverziranje istosmjernih motora

Istosmjerni motori u nekim pogonima uvijek rade s jednim smislom vrtnje, a u nekima je potrebno da se tokom rada smisao vrtnje jednom ili više puta mijenja. Ovdje nije važno ulaziti u sve detalje tog pitanja, već samo u načelni postupak kojim se mijenja smisao brzine vrtnje u toku rada raznih vrsta istosmjernih motora. Smisao brzine vrtnje mijenja se onda kad moment motora promijeni predznak. Prema jednadžbi (2) predznak se momentu može promijeniti bilo promjenom smisla (predznaka) armaturne struje I_a, bilo promjenom smisla (predznaka) glavnoga magnetskog polja Φ_{gl}, tj. uzbudne struje i_u. Prikazat ćemo postupak za razne vrste motora.

Nezavisno uzbuđeni motor. Može se upotrijebiti, u načelu, ili promjena smisla uzbudne struje ili armaturne struje, prespajanjem odgovarajućih stezaljki na suprotan polaritet. Ali to se mora izvesti postepeno da se ne pojave prenaponi, posebno u prespajanju stezaljki uzbude (vidi odjeljak 7.2), ili prejaki udarci struje koji bi oštetili kolektor, posebno u prespajanju stezaljki armaturnog namota. Prednost ima prespajanje armaturnog namota, i to iz dva razloga. Zbog manje vremenske konstante brže se uspostavlja novo stanje. Drugi se razlog vidi iz toka same operacije. Kad se isključi (najednom ili postepeno putem prekapčanja otpornika) armaturni krug, u motoru *ostaje glavno magnetsko polje*, i motor se zaustavlja (koči ga radni mehanizam) jer nestaje struja armature, pa prema jednadžbi (2) i moment motora. Zatim se prespojeni armaturni namot (s predotporima) uključi na mrežu tako da nastaje moment suprotan prvobitnome. On dovršava kočenje, ako motor već prije toga nije stao, i postepeno ubrzava motor u smjeru suprotnome prijašnjemu. Cijela se operacija izvodi ili ručno na posebnoj aparaturi, kontroleru, ili automatski gdje se odgovarajućom opremom (vremenskim relejima ili drugim elementima) upravlja fazama reverziranja.

Serijski uzbuđeni motor. Budući da su armaturni i uzbudni strujni krug stroja zajednički, najprije se mora motor isključiti s mreže i tad izvesti prespajanje ili jednoga ili drugog namota na suprotan polaritet, a onda ga nanovo spojiti na mrežu. Pri tome je gotovo nemoguće izbjeći udarce struje i prenapone. Od raznih varijanti koje se dadu upotrijebiti najpovoljnija je ova: U istom trenutku kad se otkopčaju stezaljke armature od mreže i uzbudni namot od armaturnoga, priključi se uzbudni namot, preko otpornika kojem je iznos otpora približno jednak otporu armaturnog namota, na mrežu, i to s dotadašnjim smislom struje. Tako se praktički sačuva glavno magnetsko polje nepromijenjenim, motor počinje kočiti. Tad se preko otpornika priključi armaturni namot na suprotan polaritet, a istodobno se uzbudni namot uključi sa suprotnim polaritetom u armaturni krug.

To se izvede tako da se armaturni namot sa suprotnim polaritetom i otpornicima jednostavno uključi kao cjelina u uzbudni krug kojim teče struja. Proces kočenja, zaustavljanja i ubrzanja teče na jednak način kao u primjeru nezavisno uzbuđenog motora, a slična je dakako i aparatura kojom se izvodi cijela operacija.

Kompaundirani motor. Prespojimo li kompaundiranome motoru samo stezaljke nezavisno (poredno) uzbuđenog namota na suprotan polaritet, ili samo stezaljke armaturnog namota (s kojim je serijski uzbudni u istome strujnom krugu), dobivamo pri suprotnom smislu vrtnje protukompaundirani motor. Zato moramo prespojiti na suprotan polaritet ili samo odvojeni armaturni namot ili oba uzbudna namota nakon što se rasklopi glavni strujni krug. Dakle, postupak je sličan kao u primjeru serijskog motora, prespajaju li se oba uzbudna namota. No prednost ima prespajanje samo armaturnog kruga. Kad se armaturni strujni krug (sa serijskim uzbudnim namotom) isključi s mreže (i uključe otpornici), ostaje uključen poredni (nezavisni) uzbudni namot, i tako u motoru ostaje dio glavnoga magnetskog polja. Za vrijeme dok se motor zaustavlja i struja armature mu padne na nisku vrijednost, prespoje se stezaljke armaturnog namota na suprotan polaritet. I stezaljke serijskog namota prespoje se unutar glavnoga strujnog kruga na suprotan polaritet, tako da serijskoj uzbudi ostane isti smisao kao prije prespajanja. Tad se glavni krug, preko otpornika, priključi na mrežu i ubrzanje motora u novom smjeru obavlja se postepenim isključivanjem dijelova otpornika. Proces, a i potrebna aparatura slični su kao u prethodnim primjerima.

7.4. Istosmjerni stroj kao pojačalo

Moderni regulirani elektromotorni pogoni uz ostala svojstva zahtijevaju još i brzo uspostavljanje stanja koje iz bilo kojih razloga nije u ravnoteži, tj. poželjno im je najčešće kratko trajanje prelaznih stanja. Zadano (željeno) stanje uspostavlja se na općenito poznati način. Najprije se mjeri razlika postojećeg stanja (određene fizikalne veličine) prema željenome, pa se zatim obavlja zahvat ovisno o iznosu postojeće razlike. Pri tome se konačno teži poništenju razlike postojećeg i željenog iznosa fizikalne veličine, odnosno smanjenju te razlike na iznos dopuštenog odstupanja (statička točnost). Da se skrati vrijeme dovođenja pogona u željeno stanje, taj se zahvat redovno obavlja preko pojačala. Ima više vrsta pojačala, među kojima su i strojna pojačala. Iako je razvoj elektronike, posebno poluvodičke tehnike, potisnuo donekle upotrebu strojnih pojačala, još ima dosta područja gdje se ona održavaju iz raznih razloga (neosjetljivost na zračenje i slično).

Kao i svako pojačalo, ima i strojno dva osnovna karakteristična pokazatelja kojima se ocjenjuju svojstva pojačala. To su:

a) Faktor pojačanja K, tj. odnos izlazne F_{izl} i ulazne veličine F_{ul}:

$$K = \frac{F_{izl}}{F_{ul}}. \tag{1}$$

b) Brzina kojom se zahvat odvija, kojom se izlaz odaziva zahvatu na ulazu (odziv). Promjeni iznosa fizikalnih veličina suprotstavljaju se razne tromosti (inercije) u sistemu koje usporavaju brzinu odvijanja promjene izlazne veličine. Za svako pojačalo postavljaju se zahtjevi u vezi s brzinom reagiranja sistema. Općenito se može za cijeli opseg rada pojačala prikazati to svojstvo kao:

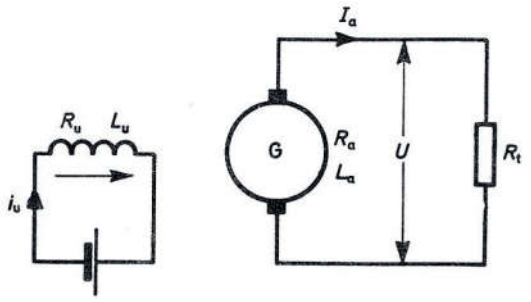
$$K(t) = \frac{F_{\text{izl}}(t)}{F_{\text{ul}}(t)}, \tag{2}$$

tj. kao vremenska ovisnost faktora pojačanja o odnosu izlazne i ulazne veličine kao funkcijâ vremena, što nam donekle opisuje i to drugo svojstvo pojačala.

Već je i najjednostavniji nezavisno uzbuđeni generator sam po sebi pojačalo nekih fizikalnih veličina. On npr. može pojačavati napon, tj. dati znatno veći napon na stezaljkama armature (izlazu) od onoga na stezaljkama uzbude (ulazu). Jednako tako može umnogostručiti i snagu, ako se promatraju isti ulaz (uzbuda) i izlaz (armatura). Prema tome on će poslužiti i kao *pojačalo napona* s faktorom pojačanja K_u i kao *pojačalo snage* s faktorom pojačanja K_p. To i jesu namjene strojnih pojačala, od kojih je njihova upotreba kao pojačala snage mnogo češća.

7.4.1. Nezavisno uzbuđeni generator kao pojačalo

Najjednostavniji spoj takva formalnog pojačala (služi nam samo za uvod u materiju) prikazuje slika 1.



Sl. 1. Skica elemenata nezavisno uzbuđenoga generatora kao pojačala napona

Za *naponsko pojačanje* vrijedi:

$$K_u = \frac{U}{i_u R_u}. \tag{3}$$

Budući da u armaturnom krugu vrijedi:

$$I_a = \frac{E}{R_a + R_t}, \tag{4}$$

i, dalje:

$$U = E - I_a R_a = E\left(1 - \frac{R_a}{R_a + R_t}\right) = E\,\frac{R_t}{R_a + R_t}, \tag{5}$$

na osnovi toga bit će faktor naponskog pojačanja:

$$K_u = \frac{ER_t}{i_u R_u (R_a + R_t)}.$$

Upotrijebljene oznake u relacijama (3), (4) i (5) jasne su sa slike, pri čemu je R_t otpor tereta u armaturnome strujnom krugu. Strojna pojačala gotovo uvijek rade u nezasićenom području magnetiziranja (samo izuzetno u zasićenome) stroja pa je inducirani napon armature proporcionalan protjecanju uzbude, dakle $E = ci_u w_1$, s čime za faktor pojačanja izlazi:

$$K_u = \frac{cR_t w_1}{R_u (R_a + R_t)}. \tag{6}$$

U toj jednadžbi c je faktor proporcionalnosti induciranog napona i uzbude, a w_1 je broj zavoja uzbudnog namota. Za općeniti stroj teži taj faktor svojoj maksimalnoj vrijednosti kad je otpor armature što je moguće manji. Kad R_a (teorijski) teži prema nuli, nastupa (teorijski) maksimalni faktor naponskog pojačanja $\left(\text{zbog } \frac{R_t}{R_a + R_t} \longrightarrow 1\right)$:

$$K_{u\max} = \frac{cw_1}{R_u} = \frac{E}{i_u R_u}, \tag{7}$$

što se, dakako, vidi i iz jednadžbe (3).

Odmah se nameće i zaključak da se s porastom stroja povećava i faktor naponskog pojačanja, jer pri porastu dimenzija stroja po zakonima sličnosti brojnik relacije (3), odnosno (7) raste s kvadratom linearne dimenzije, a njihov nazivnik samo linearno. Znači, veći strojevi pri jednakoj brzini vrtnje kao manji imat će i veći naponski faktor pojačanja.

Za *faktor pojačanja snage* proizlazi iz malo prije napisane definicije:

$$K_p = \frac{U I_a}{i_u^2 R_u} = \frac{I_a^2 R_t}{i_u^2 R_u}. \tag{8}$$

Sa strujom iz jednadžbe (4) i za nezasićeni stroj (proporcionalnost uzbude i induciranog napona) dobiva se:

$$K_p = \frac{c^2 i_u^2 R_t w_1^2}{i_u^2 R_u (R_t + R_a)^2} = \frac{c^2 R_t w_1^2}{R_u (R_t + R_a)^2}, \tag{9}$$

Odmah se zaključuje na sličan način kao za naponsko pojačanje da se i faktor pojačanja snage povećava s porastom veličine stroja. Iz iskustva znamo da je snaga uzbude približno od 0,5 do 5% snage istosmjernog stroja (0,5% kod vrlo velikih, 5% kod vrlo malih), što daje faktor pojačanja od 20–200, manje kod malih, više kod većih strojeva. Budući da su pojačala obično manji strojevi, to je i pojačanje u običnog stroja dosta skromno. Najveći faktor pojačanja snage nekog stroja, ovisno o teretu, ustanovljava se deriviranjem faktora pojačanja snage iz jednadžbe (9) po teretu i izjednačenjem s nulom, dakle:

$$\frac{dK_p}{dR_t} = \frac{w_1^2 c^2}{R_u} \frac{(R_t + R_a)^2 - 2R_t(R_t + R_a)}{(R_t + R_a)^4} = 0.$$

Budući da stroju u radu (osim u praznom hodu, a tad zapravo nije u radu) nazivnik $(R_t + R_a)^4$ ne može biti beskonačno velik (jer je tad izlazna snaga sigurno jednaka nuli), rješenje se dobiva iz brojnika izraza izjednačenoga s nulom. Odatle je uvjet za postizanje maksimalnog pojačanja snage:

$$R_a = R_t. \tag{10}$$

Dakle, najveći će faktor pojačanja snage, uvrstimo li jednadžbu (10) u (9), biti:

$$K_{pmax} = \frac{c^2 R_a w_1^2}{R_u(R_a + R_a)^2} = \frac{c^2 w_1^2}{4R_u R_a}. \tag{11}$$

Usporedimo li npr. pogon normalnog stroja s pogonom u uvjetima maksimalnog pojačanja, onda je područje maksimalnog pojačanja potpuno neprihvatljivo za pogon jer je s gledišta normalnog pogona potpuno neekonomično.

Izrazi za faktore pojačanja snage i napona pokazuju da su uvjeti pojačanja (maksimalnog) jednaki kao i u drugih elektronskih i sličnih pojačala.

Dakako, obični nezavisni uzbuđeni generator ne služi kao pojačalo iako je to, zbog svojih svojstava, sam po sebi. Za pojačalo je taj stroj, naime, isuviše trom (veliki induktivitet), ali smo to ipak razložili jer se baš na njemu vrlo jasno vide svojstva istosmjernog stroja kao pojačala.

7.4.2. Uzbudnici kao pojačala

Nezavisno uzbuđeni generator upotrijebljen kao uzbudnik uvijek je manji stroj. Obično se normalno gradi, rijetko od posebnog materijala i posebnom tehnologijom. Iako je za njega svojstvo pojačanja snage već važno, faktor pojačanja snage mu je malen, 30–50. Za veća pojačanja poznat je spoj dvaju (nezavisnih) uzbudnika u seriju, tj. pomoćnog i glavnog uzbudnika (što prikazuje i sl. 2). Taj u osnovi već kaskadni spoj ima za cilj upravo povećanje faktora pojačanja snage. Razmotrimo njegovo svojstvo pojačanja u tom jednostavnom spoju. Faktor pojačanja snage je:

$$K_p = \frac{U_g I_{ag}}{i_{u1}^2 R_{u1}}$$

i prema jednadžbi (9):

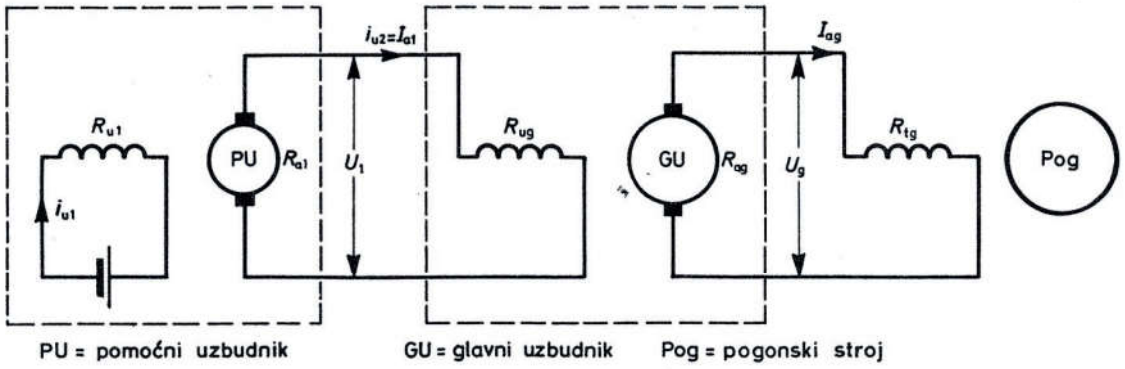
$$K_p = \frac{E_g^2 R_{tg}}{i_{u1}^2 R_{u1}(R_{ag} + R_{tg})^2}.$$

Za nezasićene strojeve vrijedi proporcionalnost induciranih napona i uzbudnih struja, pa će inducirani napon glavnog uzbudnika biti:

$$E_g = c_g i_{u2} = c_g I_{a1} = c_g \frac{E_1}{R_{a1} + R_{ug}} = \frac{c_g c_1 i_{u1}}{R_{a1} + R_{ug}},$$

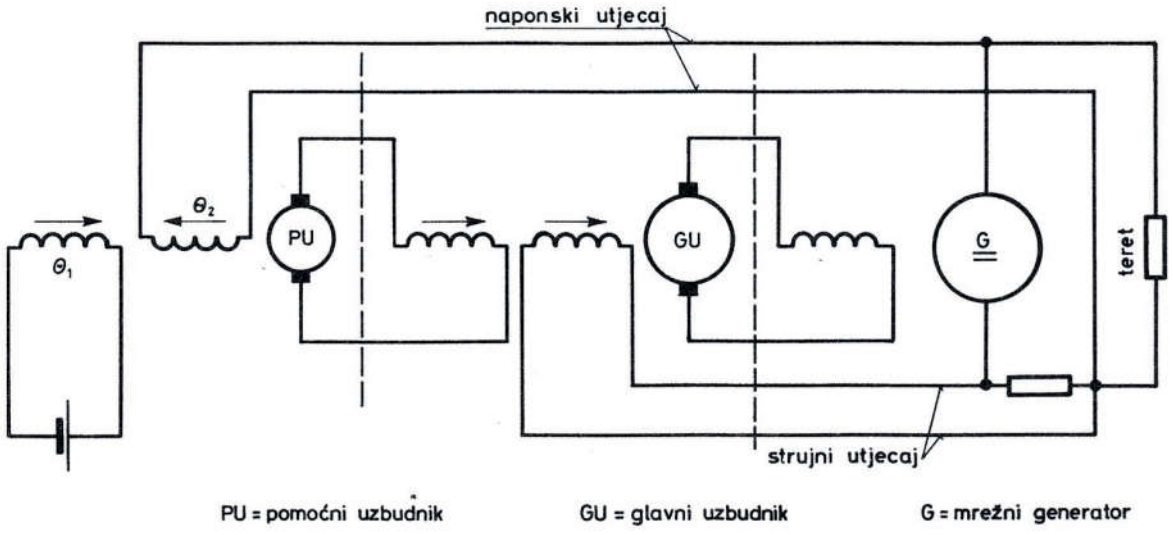
pri čemu je c_g faktor proporcionalnosti, a ostale oznake su razumljive sa slike 2. S time je faktor pojačanja:

$$K_p = \frac{c_g^2 c_1^2 R_{tg}}{R_{ul}(R_{al} + R_{ug})^2 (R_{ag} + R_{tg})^2} . \tag{12}$$



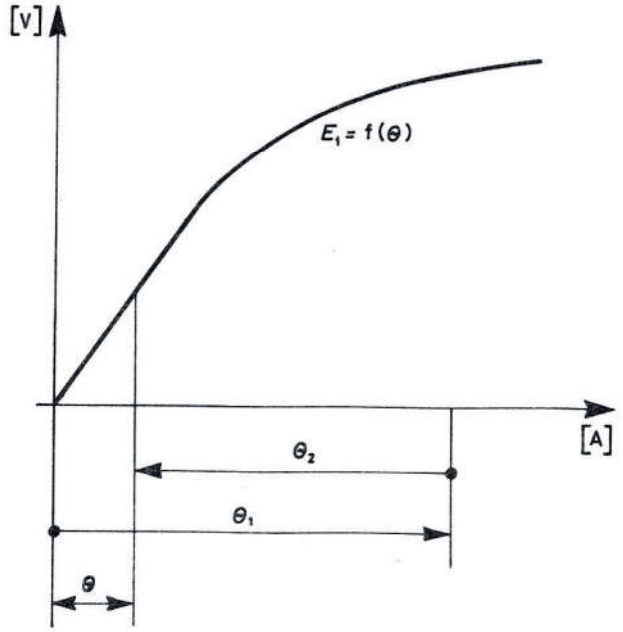
Sl. 2. Kaskadni spoj (spoj u seriju) dvaju nezavisno uzbuđenih uzbudnika

To je približno, po strukturi izraza, povećani produkt dvaju faktora pojačanja snage, i to jednoga manjeg i jednoga većeg stroja, pa se faktor pojačanja može ocijeniti s $K_p \doteq 2\,000-3\,000$. Obično je takav spoj uzbude zamršeniji od onoga na slici 2. Takvim se mnogobrojnim kompliciranijim spojevima uzbudnika često koristi i u regulacijske svrhe ili za postizanje određenih karakteristika izlaznih veličina. Tad ima svaki od uzbudnika i po nekoliko uzbudnih namota na koje djeluju razne *upravljačke* veličine kao spojevi povratnih djelovanja (povratne veze). Tako dolazimo do pojma *upravljačkih namota* uzbudnika ili, uopće, strojnih pojačala. Jedan primjer prikazuje slika 3. Na njoj je načelni spoj dvaju uzbudnika



Sl. 3. Osnovni spoj dvaju uzbudnika s upravljačkim namotima za održavanje približno konstantnog napona istosmjernoga generatora, pomoćni i glavni uzbudnik kao nezavisno uzbuđeni generatori

istosmjernoga generatora s upravljačkim namotima za održavanje približno konstantnog napona generatora. Povratna strujna veza djeluje na upravljački (uzbudni) namot glavnog uzbudnika povećavajući mu uzbudu prilikom porasta struje (tereta) u glavnome armaturnom krugu. Naponska povratna veza djeluje na upravljački namot pomoćnog uzbudnika. Protjecanje tog namota proporcionalno je naponu u glavnome armaturnom krugu, a po smislu je suprotno protjecanju osnovne uzbude pomoćnog uzbudnika. To osim djelovanja koje teži konstantnosti napona generatora dovodi i do forsiranja u prelaznim pojavama (ubrzava željenu promjenu napona). Forsirajuće djelovanje jasno je iz ovoga: Slika 4. prikazuje

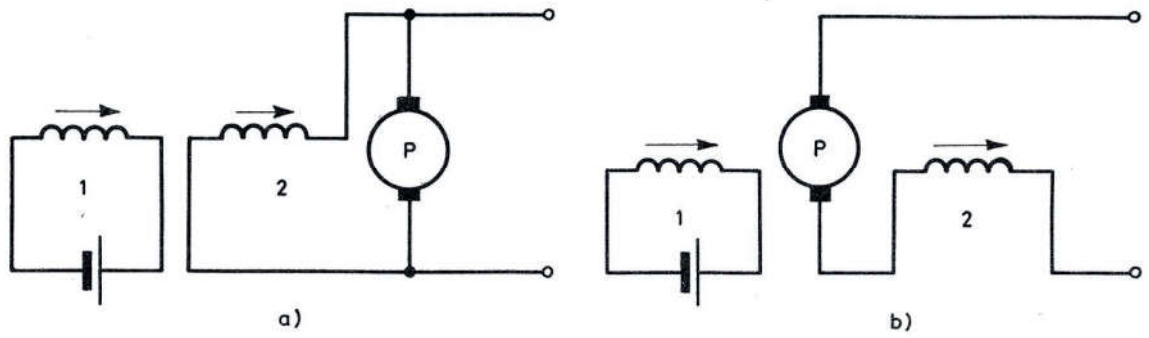


Sl. 4. Karakteristika uzbude prema osnovnom spoju na slici 3, za prikaz mogućnosti forsiranja promjene uzbudnog napona

kako se ukupna uzbuda Θ pomoćnog uzbudnika u nazivnom stanju postiže na osnovi razlike dvaju velikih protjecanja: Θ_1, nastaloga od osnovne nezavisne uzbude, i Θ_2, uzrokovanoga upravljačkom protuuzbudom povratnoga naponskog djelovanja. Pri stavljanju agregata u pogon (pod napon) ne djeluje protuuzbuda jer napon u glavnom krugu kasni zbog svih induktiviteta između ulaza pomoćnog uzbudnika i izlaza generatora. Tako je porast napona forsiran za sve vrijeme dok se ne formira napon na izlazu generatora. Dakako da u takvu spoju treba pomoćni uzbudnik znatno više prostora za uzbudne namote, a vjerojatno i posebnu gradnju. No to sve nije skupo jer je to mali stroj, a dovodi do velikog faktora pojačanja (za pojačanja primjerena strojnim pojačalima), pa su i upravljačke snage male, tj. zapravo se upravlja promjenom velikih snaga podešavajući sasvim male. Razvijeno je i poznato mnogo takvih spojeva osnova kojih su dva uzbudnika u serijskom (kaskadnom) spoju.

7.4.3. Pojačala sa samouzbudom

Strojno pojačalo sa samouzbudom ostvaruje se na dva osnovna načina, kako to prikazuje slika 5, i to s poprednim samouzbudnim namotom (naponska samouzbuda) ili sa serijskim samouzbudnim namotom (strujna samouzbuda). U samom djelovanju (kao pojačalo) nema bitnih razlika među tim spojevima. Kao pojačalo sa samouzbudom poslužit će obični istosmjerni stroj (dakako s dva odgovarajuća uzbudna namota) građen tako da bude nezasićen u području rada.



Sl. 5. Strojno pojačalo sa samouzbudom: a) pojačalo s naponskom samouzbudom, b) pojačalo sa strujnom samouzbudom; 1 – oznaka nezavisnoga uzbudnog kruga, 2 – oznaka samouzbudnog kruga

Često se on gradi s paketom (aktivnim željezom) od specijalnog čelika, zbog težnje za što užom petljom histereze. Na slici 6. prikazan je dijagram izlaza (inducirani napon E) ovisno o uzbudi (ukupnom protjecanju) pojačala sa samouzbudom. Pridijelimo li veličinama nezavisne uzbude indeks 1, a veličinama samouzbude indeks 2, vrijedi za izlazni inducirani napon pojačala E_p:

$$E_p = c\Theta = c(\Theta_1 + \Theta_2), \tag{13}$$

gdje je c faktor proporcionalnosti uzbudnog protjecanja i induciranog napona, $c = \mathrm{tg}\alpha$, tj. tangens kuta sa slike 6. S iste se slike vidi da je inducirani napon pojačala jednak i:

$$E_p = \Theta_2 \mathrm{tg}\beta = k\Theta_2, \tag{14}$$

gdje je β kut pravca samouzbude. Očit je uvjet samouzbude u nezasićenom stanju da nagib pravca samouzbude bude veći od strmine linearnog dijela karakteristike praznog hoda $E(\Theta)$:

$$\beta > \alpha, \text{ odnosno } k > c.$$

Izrazi li se protjecanje samouzbude iz jednadžbe (14) $\Theta_2 = \frac{E_p}{k}$ i uvrsti u izraz (13), dobivamo:

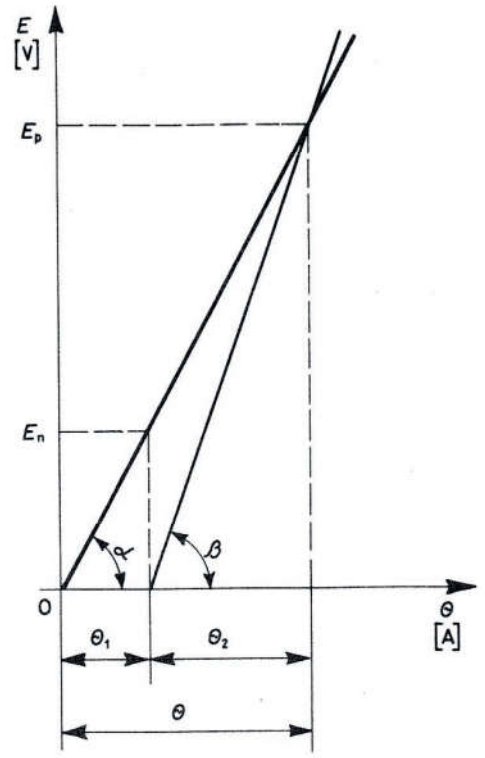
$$E_p = c(\Theta_1 + \frac{E_p}{k}),$$

i dalje:

$$E_p(1 - \frac{c}{k}) = c\Theta_1, \text{ pa je } E_p = \frac{c\Theta_1}{\frac{k-c}{k}} = \frac{kc}{k-c}\,\Theta_1 = \frac{k}{k-c}\,c\Theta_1.$$

Produkt $c\Theta_1$ zapravo je napon koji bi se inducirao samo od nezavisnog protjecanja Θ_1, dakle napon E_n na slici 6. Zato vrijedi:

$$E_p = \frac{k}{k-c}\,E_n. \tag{15}$$



Sl. 6. Dijagram induciranog napona armature pojačala sa samouzbudom prema skici na slici 5.a

Očito je da se djelovanjem samouzbude povisio izlazni napon s E_n na E_p, tj. umnožio se faktorom $\frac{k}{k-c}$. Toliko se očito mora povećati i faktor naponskog pojačanja. To se i formalno može utvrditi:

a) bez samouzbude

$$K_{un} = \frac{E_n}{i_{ul}R_{ul}} = \frac{ci_{ul}w_1}{i_{ul}R_{ul}} = c\,\frac{w_1}{R_{ul}};$$

b) s samouzbudom

$$K_u = \frac{E_p}{i_{ul}R_{ul}} = \frac{kc}{k-c}\;\frac{i_{ul}w_1}{i_{ul}R_{ul}} = \frac{kc}{k-c}\;\frac{w_1}{R_{ul}}. \tag{16}$$

Porast faktora pojačanja bit će:

$$\frac{K_u}{K_{un}} = \frac{kcw_1}{(k-c)R_{ul}}\;\frac{R_{ul}}{cw_1} = \frac{k}{k-c}.$$

Samouzbudom se dade znatno povećati faktor pojačanja istosmjernog stroja. Za što veći faktor pojačanja važno je da faktor samouzbude k bude što veći, a razlika faktora samouzbude i faktora strujne karakteristike što manja, dakle da $(k - c)$ teži što manjem broju, odnosno da c teži prema k, ali da ga nikad ne dostigne. Oboje upućuje na to da se želi što strmiji nagib i karakteristika magnetiziranja (praznog hoda) i pravca samouzbude. To je u praksi ograničeno kvalitetom željeza (histereza!) i potrebom za stabilnošću. Naime, poželjna što manja razlika $(k - c)$ zna ako je premalena dovesti i do sloma napona zbog *prekrivanja* pravaca samouzbude i donje (izlazne) grane karakteristike praznog hoda. Dobrim omjerom nezavisnog i samouzbudnog dijela protjecanja ipak se u malim strojnim pojačalima sa samouzbudom postiže faktor pojačanja napona do približno 1 000. Mogu se iz tog razmatranja vidjeti i ostali uvjeti za ekonomičnu gradnju pojačala sa samouzbudom. Da bude što veća strmina krivulje praznog hoda $E(\Theta)$ uz određeno Θ, treba birati što veću brzinu vrtnje i što manji broj pari polova stroja, tj. što veći magnetski tok ulančen pojedinim uzbudnim svitkom. To vrijedi za sva strojna pojačala.

Za *faktor pojačanja snage* pojačala sa samouzbudom bit će:

$$K_p = \frac{E_p I_a}{i_{ul}^2 R_{ul}} = \frac{E_p^2}{i_{ul}^2 R_{ul}(R_a + R_t)} = \frac{k^2 c^2 i_{ul}^2 w_1^2}{(k - c)^2 i_{ul}^2 R_{ul}(R_a + R_t)},$$

$$K_p = \frac{k^2 c^2 w_1^2}{(k - c)^2 R_{ul}(R_a + R_t)}. \tag{17}$$

Budući da je kod pojačala snage stvarni teret (izlazna snaga) znatno veći od gubitaka, to je otpor armature pojačala R_a obično neznatni dio otpora tereta R_t. Očito je da zagrijavanje otpora, npr. R_{ul}, više utječe na rezultat od iznosa R_a, zato se R_a može i zanemariti:

$$K_p \doteq \frac{k^2 c^2 w_1^2}{(k - c)^2 R_{ul} R_t}. \tag{17a}$$

Za faktor pojačanja snage vrijedi slična ovisnost o nagibima karakteristike praznog hoda i pravca samouzbude (vidi sl. 6). Dakle, povoljno je što veći k i što manja razlika $k - c$, sve dok osigurava stabilan pogon.

Za ocjenu vrijednosti pojačala važan je i faktor dobrote pojačala, koji kombinirano obuhvaća i veličinu pojačanja i brzinu kojom se odvija promjena izlazne veličine. To je omjer faktora pojačanja (maksimalnog) i vremenske konstante. Na primjer, za normalni istosmjerni nezavisno uzbuđeni stroj prema slici 1. faktor dobrote f_u za naponski odziv iznosi:

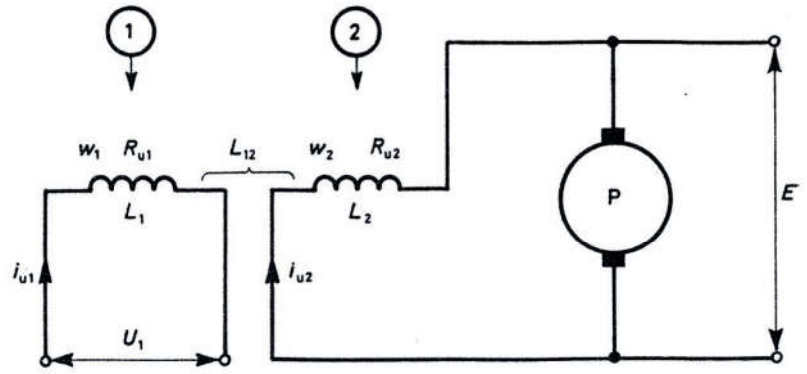
$$f_u = \frac{K_{umax}}{T}.$$

Pri tome je K_{umax} maksimalni faktor naponskog pojačanja iz jednadžbe (7), a T vremenska konstanta uzbudnog kruga, tj. omjer induktiviteta L_u i otpora R_u uzbudnog namota. Dobivamo:

$$f_u = \frac{cw_1}{R_u T} = \frac{cw_1}{R_u} \frac{R_u}{L_u} = \frac{cw_1}{L_u} = \frac{E}{i_u L_u}. \tag{18}$$

Za određivanje faktora dobrote pojačala sa samouzbudom prema slici 5.a poznat je naponski faktor pojačanja, prema jednadžbi (16), ali treba odrediti vremensku konstantu dvaju uzbudnih namota. Zato pretpostavimo da se pojačalo sa samouzbudom prema slici 7. s odgovarajućim oznakama nalazi u prelaznoj pojavi. Za nazivni uzbudni krug vrijedi:

$$U_1 = i_{u1}R_{u1} + L_1\frac{\mathrm{d}i_{u1}}{\mathrm{d}t} + L_{12}\frac{\mathrm{d}i_{u2}}{\mathrm{d}t} \,. \tag{19}$$



Sl. 7. Shema spoja pojačala sa samouzbudom uz oznaku svih elemenata koji utječu na rad u prelaznoj pojavi (radni otpori, induktivni otpori, struje i brojevi zavoja uzbudnih namota)

Za samouzbudni krug bit će:

$$E = c(i_{u1}w_1 + i_{u2}w_2) = i_{u2}R_{u2} + L_2\frac{\mathrm{d}i_{u2}}{\mathrm{d}t} + L_{12}\frac{\mathrm{d}i_{u1}}{\mathrm{d}t} \,. \tag{20}$$

Pomnožimo li relaciju (19) s $\frac{w_1}{R_{u1}}$, a relaciju (20) s $\frac{w_2}{R_{u2}}$, izlazi:

$$\frac{U_1}{R_{u1}}w_1 = i_{u1}w_1 + \frac{L_1}{R_{u1}}w_1\frac{\mathrm{d}i_{u1}}{\mathrm{d}t} + \frac{L_{12}}{R_{u1}}w_1\frac{\mathrm{d}i_{u2}}{\mathrm{d}t} \,, \tag{21}$$

$$\frac{E}{R_{u2}}w_2 = i_{u2}w_2 + \frac{L_2}{R_{u2}}w_2\frac{\mathrm{d}i_{u2}}{\mathrm{d}t} + \frac{L_{12}}{R_{u2}}w_2\frac{\mathrm{d}i_{u1}}{\mathrm{d}t} \,. \tag{22}$$

Omjeri induktiviteta i otpora u relacijama (21) i (22) očito su vremenske konstante uzbudnih krugova 1 i 2 sa slike 7:

$$T_1 = \frac{L_1}{R_{u1}} \,, \qquad T_2 = \frac{L_2}{R_{u2}} \,.$$

Dalje, možemo pretpostaviti da je rasipanje polja među uzbudnim namotima minimalno (ili da je magnetsko vezivanje tih namota savršeno) jer su motani na istoj jezgri. Zato je dopušteno to rasipanje zanemariti ($\sigma = 0$) pa za induktivitete vrijedi:

$$L_{12} = \sqrt{L_1L_2} = \frac{w_1}{w_2}L_2 = \frac{w_2}{w_1}L_1; \qquad L_1 = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 L_2.$$

Na osnovi toga se koeficijenti u jednadžbama (21) i (22) dadu prikazati ovako:

$$\frac{L_{12}}{R_{u1}} w_1 = \frac{w_2}{w_1} \frac{L_1}{R_{u1}} w_1 = w_2 T_1; \qquad \frac{L_{12}}{R_{u2}} W_2 = \frac{w_1}{w_2} \frac{L_2}{R_{u2}} w_2 = w_1 T_2.$$

Još odredimo koeficijent nagiba pravca samouzbude. Po definiciji je on omjer induciranog napona i samouzbudnog protjecanja:

$$k = \frac{E_p}{\Theta_2} = \frac{i_{u2} R_{u2}}{i_{u2} w_2} = \frac{R_{u2}}{w_2},$$

a to je recipročna vrijednost koeficijenata lijeve strane jednadžbe (22).
Sad sve te zamjene koeficijenata uvrstimo u jednadžbe (21) i (22):

$$\frac{U_1}{R_{u1}} w_1 = i_{u1} w_1 + T_1 w_1 \frac{\mathrm{d}i_{u1}}{\mathrm{d}t} + T_1 w_2 \frac{\mathrm{d}i_{u2}}{\mathrm{d}t},$$

$$\frac{E}{k} = i_{u2} w_2 + T_2 w_2 \frac{\mathrm{d}i_{u2}}{\mathrm{d}t} + T_2 w_1 \frac{\mathrm{d}i_{u1}}{\mathrm{d}t}.$$

Zbrojimo te dvije jednadžbe:

$$\frac{U_1}{R_{u1}} w_1 + \frac{E}{k} = \Theta_1 + \Theta_2 + (T_1 + T_2) w_1 \frac{\mathrm{d}i_{u1}}{\mathrm{d}t} + (T_1 + T_2) w_2 \frac{\mathrm{d}i_{u2}}{\mathrm{d}t}.$$

To se može pisati i kao:

$$\frac{U_1}{R_{u1}} w_1 + \frac{E}{k} = \Theta_1 + \Theta_2 + (T_1 + T_2) \left(\frac{\mathrm{d}\Theta_1}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}\Theta_2}{\mathrm{d}t} \right) = \Theta + (T_1 + T_2) \frac{\mathrm{d}\Theta}{\mathrm{d}t}.$$

Zamijenimo li protjecanje induciranim naponom:

$$\frac{U_1}{R_{u1}} w_1 = I_{u1} w_1 = \frac{E}{c} - \frac{E}{k} + (T_1 + T_2) \frac{1}{c} \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} = \Theta_{1kon},$$

pri čemu je Θ_{1kon} protjecanje nezavisnog namota na kraju prelažne pojave.
Pomnožimo li taj posljednji izraz s $\frac{ck}{k-c}$, dobivamo:

$$\Theta_{1kon} \frac{ck}{k-c} = E + \frac{k}{k-c} (T_1 + T_2) \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}.$$

Lijeva je strana očito konačni inducirani napon E_p. Ako supstituiramo:

$$\frac{k}{k-c} (T_1 + T_2) = T_p, \tag{23}$$

izlazi diferencijalna jednadžba za inducirani napon:

$$E_p = E + T_p \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t},$$

s općim rješenjem:

$$\mathrm{e}^{-\frac{t}{T_p}} = A(E_p - E). \tag{24}$$

Konstantu integracije A nalazimo iz izraza za trenutak ukapčanja nezavisne uzbude. Za $t = 0$ i $E = 0$, a $A = 1/E_p$. S time za naš slučaj ukapčanja izlazi:

$$E = E_p \left(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{T_p}} \right). \tag{25}$$

T_p prema izrazu (23) je, dakle, vremenska konstanta uzbude pojačala sa samouzbudom. Za faktor dobrote možemo uz pomoć jednadžbi (16) i (23) pisati:

$$f_{up} = \frac{K_{up}}{T_p} = \frac{\dfrac{kc}{k-c}\,\dfrac{w_1}{R_{u1}}}{\dfrac{k}{k-c}\,(T_1 + T_2)} = \frac{cw_1}{R_{u1}(T_1 + T_2)}. \tag{26}$$

Usporedimo li izraz (18) za običan istosmjerni stroj i izraz (26) za pojačalo sa samouzbudom, uočavamo da su jednake građe. Dalje, ako je riječ o strojevima jednake veličine i građe, s jednakim težinama bakra uzbude (uz jednaku gustoću struje obaju uzbudnih namota pojačala, što je normalno), onda su ta dva faktora dobrote i numerički jednaka jer im je jednak omjer zavoja uzbude i otpora uzbude, a i vremenske konstante.

Jasno se vidi iz dosadašnjeg razmatranja da pojačalo sa samouzbudom, iako mu je neusporedivo veći faktor pojačanja od običnog generatora, ipak ima jednak faktor dobrote. To je očito zbog toga što mu je brzina odziva neusporedivo manja nego običnom stroju, a vidi se iz omjera vremenskih konstanta:

$$\frac{(T_1 + T_2)\,\dfrac{k}{k-c}}{T} \doteq \frac{k}{k-c}.$$

Povećanje vremenske konstante pojačala sa samouzbudom približno je jednako porastu faktora pojačanja, a za jednake je strojeve potpuno jednako. Dobitak na pojačanju izjednačuje se, s gledišta faktora dobrote, s gubitkom zbog povećane tromosti. Taj se rezultat, veće pojačanje uz sporiji odziv, može smatrati karakterističnim i za sve slične spojeve. Ipak je i pojačalo sa samouzbudom znatan dobitak u pogonskim okolnostima gdje brzina odziva nije važna (sporiji procesi), jer se može iskoristiti njegov veliki faktor pojačanja za upravljanje malim snagama.

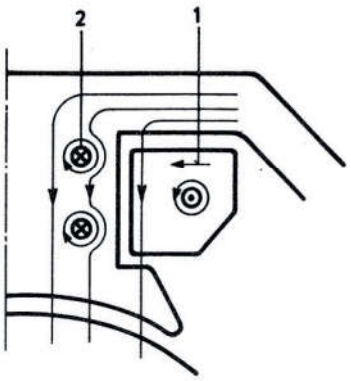
7.5. Komutacija u prelaznom stanju stroja

U odjeljku 4.5. upoznali smo se s problematikom komutacije u statičkom stanju stroja gdje su napon, struja armature, magnetski tok glavnih i pomoćnih polova, te brzina vrtnje bili konstantne veličine, pa je iščezavao utjecaj vrtložnih struja u magnetskom krugu. Zbog toga su inducirani napon e_{pp} uzrokovan magnetskim tokom pomoćnih polova i inducirani napon samoindukcije e_s svitka u komutaciji bili u fazi sa strujom pomoćnih polova, odnosno sa strujom armature.

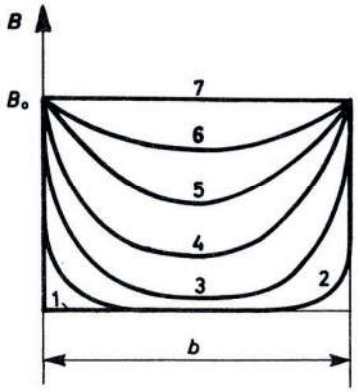
U prelaznom stanju, ovisno o vrsti istosmjernog stroja i karakteru prelazne pojave, promjenljive su veličine napon, struja, magnetski tok glavnih i pomoćnih polova, te brzine vrtnje pa se ne može zanemariti utjecaj vrtložnih struja u magnetskom krugu. Inducirani napon e_{pp} uzrokovan magnetskim tokom pomoćnih polova u svitku koji komutira nije u fazi sa strujom pomoćnih polova. U svitku koji komutira pojavljuje se još i napon transformacije e_t kad se u prelaznom stanju mijenja magnetski tok glavnih polova. Za razmatranje komutacije u prelaznom stanju potrebno je poznavati vremensku promjenu struje armaturnog kruga, brzine vrtnje, te magnetskog toka glavnih i pomoćnih polova uzevši u obzir i utjecaj vrtložnih struja u magnetskom krugu.

7.5.1. Vrtložne struje u magnetskom krugu

Uspostavljanjem protjecanja u svitku uzbude magnetski tok prodire u jezgru pola i u njoj stvara inducirani napon, i kao posljedicu vrtložne struje. Protjecanje vrtložnih struja suprotno je osnovnom protjecanju uzbude i nastoji izbaciti magnetski tok iz jezgre, kao što je prikazano na slici 1. Slika 2. predočuje vremensko nastajanje magnetske indukcije u jezgri širine b za razna vremena od 1 do 7, pri čemu se vrijeme 7 odnosi na uspostavljeno statičko stanje s vrijednosti indukcije B_0.



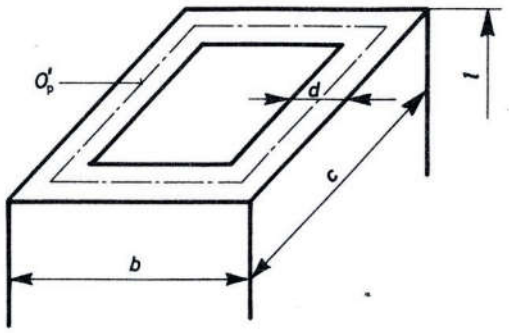
Sl. 1. Vrtložne struje u magnetskom krugu: 1 – smjer gibanja magnetskog toka, 2 – smjer vrtložnih struja



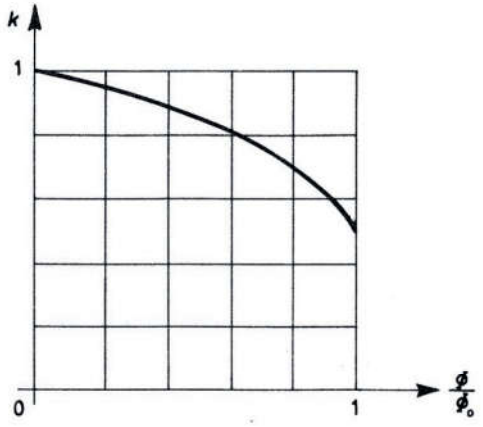
Sl. 2. Vremensko nastajanje magnetske indukcije u jezgri

Magnetski tok, koji je nakon nekog vremena (npr. od 1 do 7 na sl. 2) prodro u jezgru, jednak je prostornom integralu stvarne raspodjele indukcije u jezgri u tom vremenu. Radi jednostavnijeg razmatranja [L 16] pretpostavimo da magnetski tok prodire u jezgru s konstantnom indukcijom B_0 (statičkog stanja), koja uz dubinu prodiranja d daje jednak magnetski tok kao i stvarna raspodjela indukcije. Magnetski tok u jezgri nakon nekog vremena, uz dubinu prodiranja d, iznosi:

$$\Phi = B_0 dO'_p, \tag{1}$$



Sl. 3. Objašnjenje uz određivanje magnetskog toka



Sl. 4. Koeficijent k $(\frac{\Phi}{\Phi_0})$ za određivanje magnetskog toka

pri čemu je O'_p srednji opseg presjeka prema slici 3, kojim prolazi magnetski tok. Srednji opseg O'_p možemo izraziti pomoću vanjskog opsega O_p jezgre i koeficijenta, k, tj.:

$$O'_p = kO_p.$$

Tu je koeficijent k ovisan o dubini prodiranja magnetskog toka, a uz oznake na slici 3. iznosi:

$$k = \frac{2(b - d + c - d)}{2(b + c)}.$$

Izraz (1) za magnetski tok tad glasi:

$$\Phi = B_0 dk O_p, \tag{2}$$

a vrijednosti koeficijenta k ovisno o omjeru trenutne vrijednosti magnetskog toka Φ i magnetskog toka Φ_0 u statičkom stanju prikazane su na slici 4.

Električni je otpor kruga vrtložne struje:

$$R_v = \frac{\rho k O_p}{d l},$$

pa uvrštenjem vrijednosti d iz izraza (2) dobivamo:

$$R_v = \frac{\rho B_0 k^2 O_p^2}{e \Phi}. \tag{3}$$

Vrtložna je struja:

$$i'_v = \frac{e}{R_v} = \frac{-\frac{d\Phi}{dt}}{R_v} = \frac{\dot{\Phi} l}{\rho B_0 k^2 O_p^2} \frac{d\Phi}{dt}. \tag{4}$$

Koeficijent ulančenja magnetskog toka s vrtložnom strujom, uz konstantnu indukciju B_0 u promatranom dijelu jezgre, iznosi 0,5, a ekvivalentna će vrtložna struja ulančena s cijelim magnetskim tokom biti:

$$i''_v = \frac{0{,}5 \Phi l}{\rho B_0 k^2 O_p^2} \frac{d\Phi}{dt}. \tag{5}$$

Pretpostavimo li umjesto vremenski ovisnog koeficijenta k vremenski neovisnu srednju vrijednost k_s, izraz je za vrtložnu struju (jedan zavoj), odnosno protjecanje vrtložne struje magnetskog kruga:

$$\Theta_v = \gamma \Phi \frac{d\Phi}{dt}, \tag{6}$$

pri čemu je:

$$\gamma = \frac{0{,}5}{k_s^2} \sqrt{\frac{l}{O_p^2 \rho B_0}}.$$

Vrtložne struje u magnetskom krugu istosmjernog stroja nastaju uglavnom u jezgri glavnog i pomoćnog pola, te u jarmu statora, dok se u limu armature mogu zanemariti.

Za protjecanje vrtložnih struja po polu u magnetskom krugu glavnih polova, uz upotrebu izraza (6), možemo pisati:

$$\Theta_v = \frac{0{,}5\,\sigma_g^2}{k_s^2}\left[\frac{h_{gp}}{(2b_{gp}+2l_{gp})^2\rho_1 B_{gp}}\Phi_{gl}\frac{d\Phi_{gl}}{dt} + \frac{L_{js}}{(2h_{js}+2l_{js})^2\rho_2 B_{js}}\,0{,}5\,\Phi_{gl}\frac{0{,}5\,d\Phi_{gl}}{dt}\right],$$

a nakon sređivanja dobivamo:

$$\Theta_v = \frac{0{,}5\,\sigma_g^2}{k_s^2}\left[\frac{L_{js}}{4(b_{gp}+l_{gp})\,\rho_1 B_{gp}} + \frac{L_{js}}{16(h_{js}+l_{js})\rho_2 B_{js}}\right]\Phi_{gl}\frac{d\Phi_{gl}}{dt}\ [\mathrm{A}], \qquad (7)$$

ili u skraćenom obliku:

$$\Theta_v = \gamma_{gp}\Phi_{gl}\frac{d\Phi_{gl}}{dt}.$$

U relaciji (7) Φ_{gl} je glavni magnetski tok, σ_g koeficijent rasipanja, h_{gp} visina, b_{gp} širina i l_{gp} je dužina jezgre glavnog pola. B_{js} je indukcija u jarmu statora, a B_{gp} u jezgri glavnog pola, obje pri statičkom stanju. Dalje, L_{js} je geometrijska dužina, h_{js} visina i l_{js} dužina jarma statora koja vodi magnetski tok, mjerena aksijalno. Specifični električni otpori željeznih dijelova su ρ_1 za jezgru pola, koji uz lamelirani neizolirani zakovani pol iznosi cca $0{,}42\cdot 10^{-6}[\Omega\,\mathrm{m}]$, i ρ_2 za jaram statora, koji je, uz gradnju od valjanog čelika, cca $0{,}14\cdot 10^{-6}$ $[\Omega\,\mathrm{m}]$.

Protjecanje vrtložnih struja po polu u magnetskom krugu pomoćnih polova, uz upotrebu izraza (6), iznosi:

$$\Theta_{vpp} = \frac{0{,}5\,\sigma_{pp}^2}{k_s^2}\left[\frac{h_{pp}}{4(b_{pp}+l_{pp})\rho_1 B_{pp}} + \frac{L_{js}}{16(h_{js}+l_{js})\rho_2 B_{jspp}}\right]\Phi_{\delta pp}\frac{d\Phi_{\delta pp}}{dt}\ [\mathrm{A}], \qquad (8)$$

ili u skraćenom obliku:

$$\Theta_{vpp} = \gamma_{pp}\Phi_{\delta pp}\frac{d\Phi_{\delta pp}}{dt},$$

pri čemu je Φ_{pp} magnetski tok u zračnom rasporu, σ_{pp} koeficijent rasipanja, h_{pp} visina, b_{pp} širina i l_{pp} je dužina jezgre pomoćnog pola. Dalje je ρ_1 specifični električki otpor jezgre pomoćnog pola, B_{pp} indukcija u jezgri pomoćnog pola, a B_{jspp} je u jarmu statora pri statičkom stanju. Ona se određuje iz sume magnetskih tokova glavnih i pomoćnih polova.

7.5.2. Prelazna stanja

Mnogobrojne vrste istosmjernih strojeva nastale raznim vrstama uzbude, sve moguće kombinacije opterećenja i napajanja, sve varijacije raznih tromosti koje imaju odlučnu ulogu u tretmanu prelaznih stanja, uzrokuju mnoštvo problema i primjera koji se rješavaju na razne načine. Budući da u kratkom prikazu nije moguće obuhvatiti sve te probleme i primjere, a za nas je mnogo važnija metoda kojom se pristupa rješavanju takvih zadataka i teškoće što se pojavljuju u komutaciji, to ćemo ovdje razmotriti prelazno stanje i komutaciju u tom stanju na primjeru istosmjernoga serijskog motora. Serijski je motor veoma pogodan za razmatranje komutacije u prelaznom stanju jer mu se mijenjaju praktički sve veličine koje određuju komutacijsko stanje. Razmotrimo primjer ponovnog uspostavljanja napona na serijskom motoru relativno velikog momenta inercije, i to nakon razgrađivanja magnetskog toka glavnih polova. S obzirom na relativno veliki moment

inercije, možemo brzinu vrtnje za trajanja prelaznog stanja smatrati konstantnom. Na taj način u razmatranje uzimamo samo električko prelazno stanje, a ne i mehaničko.

U prelaznom stanju uspostavlja se magnetski tok glavnih polova, i u magnetskom krugu glavnih polova nastaju vrtložne struje, koje svojim protjecanjem djeluju na osnovno protjecanje stvoreno uzbudnim namotom. Kako se magnetski tok mijenja u skladu s električkom vremenskom konstantom, mora biti rezultirajuće protjecanje po polu:

$$\Theta_\mu = \Theta_u - \Theta_v \quad [A], \tag{9}$$

pri čemu je Θ_u protjecanje uzbudnog namota po polu [A], a Θ_v protjecanje vrtložnih struja po polu [A].

Budući da struja magnetiziranja mora zadovoljiti zakon protjecanja, to se uvrštenjem izraza (7) u relaciju (9) dobiva izraz za trenutnu vrijednost struje serijskog motora:

$$i = i_\mu + i_v = i_\mu + \frac{\gamma_{gp}}{w_{ser}} \Phi_{gl} \frac{d\Phi_{gl}}{dt} \quad [A], \tag{10}$$

gdje je w_{ser} broj zavoja namota serijske uzbude po polu.

Jednadžba naponske ravnoteže u prelaznom stanju motora glasi:

$$U = E + iR + L\frac{di}{dt}, \tag{11}$$

pa je E inducirani napon rotacije u namotu armature, koji prema izrazu (4.1–4) iznosi:

$$E = \frac{p\Phi_{gl}nz}{a\,60} = c_e\Phi_{gl}, \tag{12}$$

R je ukupni radni otpor armaturnoga strujnog kruga i $L\frac{di}{dt}$ induktivni pad napona u armaturnome strujnom krugu [V], a sastoji se od induktivnog pada napona E_u na serijskome uzbudnom namotu, E_{pp} na namotu pomoćnih polova i E_a na namotu armature.

Uz pretpostavku konstantnog induktiviteta, induktivni je pad napona:

$$L\frac{di}{dt} = E_u + E_{pp} + E_a = E_u\left(1 + \frac{E_{pp} + E_a}{E_u}\right) \doteq 2p\sigma_g w_{ser} \frac{d\Phi_{gl}}{dt}(1 + k_n), \tag{13}$$

pri čemu je k_n omjer induktivnih padova napona $\frac{E_{pp} + E_a}{E_u}$ koji se kreće u granicama od 0,3 do 0,4 za nekompenzirane strojeve i iznosi cca 0,1 za kompenzirane strojeve.

Uvrstimo li izraze (12) i (13) u relaciju (11), rezultat je jednadžba naponske ravnoteže:

$$iR + c_e\Phi_{gl} + 2p\sigma_g w_{ser} \frac{d\Phi_{gl}}{dt}(1 + k_n) = U. \tag{14}$$

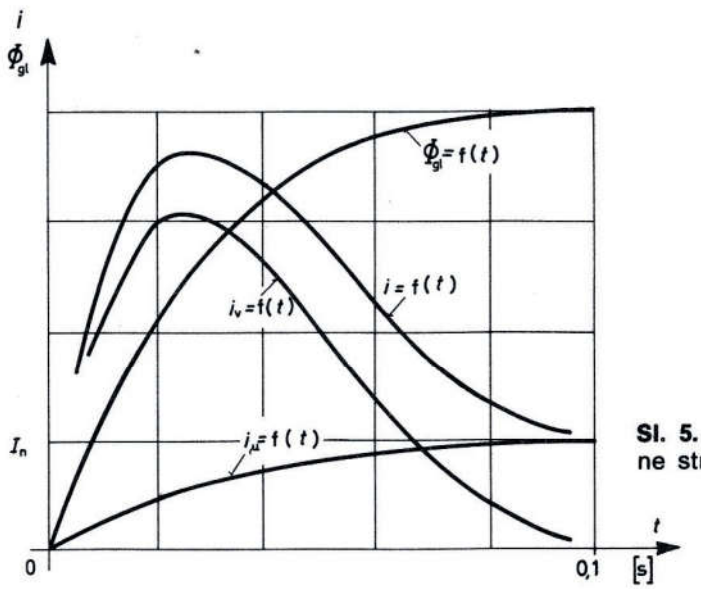
Ako uvrstimo izraz (10) u jednadžbu (14), dobivamo vremensku promjenu magnetskog toka glavnih polova:

$$\frac{d\Phi_{gl}}{dt} = \frac{U - iR - c_e\Phi_{gl}}{\frac{\gamma_{gp}R}{w_{ser}}\Phi_{gl} + 2p\sigma_g w_{ser}(1 + k_n)} \quad [V]. \tag{15}$$

Uz pomoć jednadžbi (7), (10), (15) i karakteristike magnetiziranja $\Phi_{gl}(i_\mu)$ možemo metodom pokušavanja odrediti $\Phi_{gl}(t)$, $i_\mu(t)$, $i_v(t)$ i $i(t)$ na ovaj način:

Zadajemo nekoliko vrijednosti magnetskog toka Φ_{gl} i s karakteristike magnetiziranja (nekompenziranom stroju valja pretpostaviti $i(t)$ i u karakteristiku magnetiziranja uključiti reakciju armature) otčitavamo struju magnetiziranja i_μ. Prema izrazu (15) za svaku zadanu vrijednost magnetskog toka određujemo vrijednost $\frac{d\Phi_{gl}}{dt}$ i dobivamo $\Phi_{gl}(t)$, odnosno $i_\mu(t)$, Prema relaciji (7) nalazimo protjecanje vrtložnih struja Θ_v i uz izraz $i_v = \frac{\Theta_v}{w_{ser}}$ vrtložnu struju (reduciranu na namot uzbude) $i_v(t)$. Na osnovi struje magnetiziranja $i_\mu(t)$ i vrtložne struje $i_v(t)$, uz upotrebu izraza (10), dobivamo ukupnu struju $i(t)$. Ako izračunata vrijednost ukupne struje i nekompenziranom stroju nije jednaka pretpostavljenoj ukupnoj struji pri određivanju reakcije armature, valja ponoviti postupak.

Na slici 5. prikazane su krivulje $\Phi_{gl}(t)$, $i_\mu(t)$, $i_v(t)$ i $i(t)$ za serijski vučni motor od 140 kW i 770 min^{-1} [L 16] pri ponovnom ukapčanju (nakon kratkotrajnog prekida) nazivnog napona uz nazivnu brzinu vrtnje.



Sl. 5. Prelazno stanje serijskog motora, veličine struja i glavnoga magnetskog toka

U većini primjera istosmjernoga serijskog motora dade se zanemariti pad napona na radnim otporima namota. Tad se oblik jednadžbe (14) napona u prelaznom stanju pojednostavnjuje i glasi:

$$c_e\Phi_{gl} + 2p\sigma_g w_{ser}\frac{d\Phi_{gl}}{dt}(1 + k_n) = U. \tag{16}$$

Rješenjem jednadžbe (16) ustanovljujemo ovisnost magnetskog toka o vremenu:

$$\Phi_{gl} = \Phi_{gls}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \text{ [Vs]}, \tag{17}$$

pri čemu je Φ_{gls} magnetski tok zračnog raspora glavnog pola u statičkom stanju, a T je vremenska konstanta, iznos koje je:

$$T = \frac{2p\sigma_g w_{ser}(1 + k_n)}{c_e} \text{ [s]}. \tag{18}$$

Iz relacije (17) izlazi da brzina porasta magnetskog toka glavnih polova motora sa serijskom uzbudom pri ponovnom ukapčanju napona ne ovisi o vrtložnim strujama u

magnetskom krugu. Brzina porasta magnetskog toka povezana je s parametrima namota, a utjecaj vrtložnih struja u tom procesu odražava se tako da motor iz mreže uz struju magnetiziranja uzima još dodatnu struju kojom se kompenzira djelovanje demagnetiziranja uzrokovano vrtložnim strujama. U primjeru idealno lameliranoga magnetskog kruga motora, dakle kruga bez pojave vrtložnih struja, struja uzeta iz mreže bila bi jednaka struji magnetiziranja.

Određivanje vremenske ovisnosti parametara u prelaznim stanjima drugih vrsta istosmjernih strojeva prikazano je u literaturi [L 34 i 58].

7.5.3. Komutacija u prelaznom stanju

Općenito u svitku koji komutira nastaje napon samoindukcije e_s, napon e_{pp} induciran magnetskim tokom pomoćnih polova i napon transformacije e_t. Razmatranje komutacije u prelaznom stanju nastavljamo u primjeru serijskog motora iz prethodnog odjeljka.

U odjeljku 7.5.2. izračunali smo vremensku promjenu struje armature $i(t)$ i magnetskog toka glavnih polova $\Phi_{gl}(t)$.

Vremensku ovisnost napona samoindukcije $e_s(t)$ određujemo na osnovi poznavanja $i(t)$, pomoću izraza (4.5–14).

Vremensku ovisnost napona transformacije $e_t(t)$ nalazimo na osnovi poznavanja $\Phi_{gl}(t)$, uz upotrebu izraza:

$$e_t = - w_s \frac{d\Phi_{gl}}{dt} \quad [V],$$

pri čemu je w_s broj zavoja strana svitaka u komutaciji [1].

Da se ustanovi vremenska ovisnost induciranog napona $e_{pp}(t)$, o magnetskom toku pomoćnih polova, potrebno je znati vremensku promjenu magnetskog toka $\Phi_{\delta pp}$ u zračnom rasporu pomoćnih polova. U prelaznom stanju imamo promjenu struje armaturnoga strujnog kruga, promjenu magnetskog toka pomoćnih polova i u magnetskom krugu pomoćnih polova (jaram statora i jezgra pomoćnog pola) nastaju vrtložne struje, koje svojim protjecanjem djeluju na osnovno protjecanje stvoreno namotom pomoćnih polova.

Magnetski tok u zračnom rasporu pomoćnog pola iznosi:

$$\Phi_{\delta pp} = \frac{\Theta_{pp} + \Theta_{ko} - \Theta_a - V_{pp} - V_{jpp} - \Theta_{vpp}}{R_{\delta m}} \quad [Vs], \tag{19}$$

pri čemu su Θ_{pp}, Θ_{ko} i Θ_a protjecanja namota pomoćnog pola, kompenzacije i armature u simetrali pomoćnog pola i to po jednom polu.

Dalje, V_{pp} je magnetski napon jezgre pomoćnog pola, a V_{jpp} jarma statora po polu i mogu se zanemariti za nezasićeni magnetski krug. Θ_{vpp} je protjecanje vrtložnih struja u magnetskom krugu pomoćnih polova po polu, a s $R_{\delta m}$ je označen magnetski otpor ekvivalentnoga zračnog raspora u magnetskom krugu pomoćnih polova po polu.

Protjecanje vrtložnih struja magnetskog kruga pomoćnih polova, ako zanemarimo vrtložne struje u paketu limova armature, određeno je relacijom (8), a magnetski otpor ekvivalentnoga zračnog raspora pomoćnih polova uz podijeljeni zračni raspor pomoćnih polova prema slici 4.5–13. iznosi:

$$R_{\delta m} = \frac{1}{\mu_o} \left[\frac{\delta_{pp} k_{c3}}{l_{pp}(b_{\delta pp} + 2{,}5\,\delta_{pp})} + \frac{\delta_j \sigma_{pp}}{l_{pp}(b_{pp} + 2{,}5\,\delta_j)} \right] \left[\frac{A}{Vs}\right], \tag{20}$$

pri čemu je μ_0 permeabilitet zraka (vakuuma), δ_{pp} zračni raspor pomoćnog pola kod armature, δ_j zračni raspor pomoćnog pola kod jarma statora, k_{c3} Carterov koeficijent za zračni raspor pomoćnog pola, a $b_{\delta pp}$ je širina papuče pomoćnog pola.

Za relaciju (19), zanemarimo li magnetski napon jezgre pomoćnog pola V_{pp} i jarma statora V_{jpp}, možemo pisati:

$$\Phi_{\delta pp} = \frac{\Theta_{pp} + \Theta_{ko} - \Theta_a}{R_{\delta m}} - \frac{\Theta_{vpp}}{R_{\delta m}}$$

i, dalje:

$$\Phi_{\delta pp} = \Phi_{\delta ppi} - \frac{\Theta_{vpp}}{R_{\delta m}}, \tag{21}$$

pri čemu je $\Phi_{\delta ppi}$ magnetski tok u zračnom rasporu pomoćnog pola u statičkom stanju uz struju i u armaturnom krugu.

Ako uvrstimo izraz (8) u relaciju (21), izlazi:

$$\frac{d\Phi_{\delta pp}}{dt} = \frac{R_{\delta m}}{\gamma_{pp}} \left(\frac{\Phi_{\delta ppi}}{\Phi_{\delta pp}} - 1 \right). \tag{22}$$

Vremensku ovisnost induciranog napona e_{pp} dobivamo na ovaj način: Zadajemo vrijednost dt i s krivulje $i(t)$ (vidi sl. 5) otčitavamo vrijednost struje i. S karakteristike magnetiziranja kruga pomoćnih polova $\Phi_{\delta pp}(i)$ za struju i otčitavamo vrijednost $\Phi_{\delta ppi}$. Integriranjem relacije (22) za zadani vremenski interval izlazi $\Phi_{\delta pp}$. Uzastopnim integriranjem relacije (22) dobivamo $\Phi_{\delta pp}(t)$ i, dalje, $B_{\delta pp}(t)$. Pomoću izraza (4,4–10) izlazi $e_{pp}(t)$.

Vidi se iz provedenih razmatranja za konstantnu brzinu vrtnje da je vrijednost napona samoindukcije $e_s(t)$ proporcionalna struji armature $i(t)$, da je vrijednost induciranog napona $e_{pp}(t)$ proporcionalna magnetskom toku $\Phi_{\delta pp}(t)$ u zračnom rasporu pomoćnog pola i da vrijednost induciranog napona $e_{pp}(t)$ u prelaznom stanju nije proporcionalna struji namota pomoćnih polova $i(t)$, kao što je to bilo u statičkom stanju. Jednako tako se vidi da je napon transformacije $e_t(t)$ proporcionalan $\frac{d\Phi_{gl}}{dt}$ i neovisan o brzini vrtnje, te da mijenja smjer djelovanja s obzirom na $e_s(t)$ i $e_{pp}(t)$ ovisno o tome izgrađuje li se ili razgrađuje magnetski tok glavnih polova.

Pri prelaznom stanju u svitku koji komutira, zbog različitih vrijednosti induciranih napona $e_s(t)$ i $e_{pp}(t)$ te pojave napona transformacije $e_t(t)$, nastaje nekompenzirani napon $\Delta e(t)$. Određuje se relacijom:

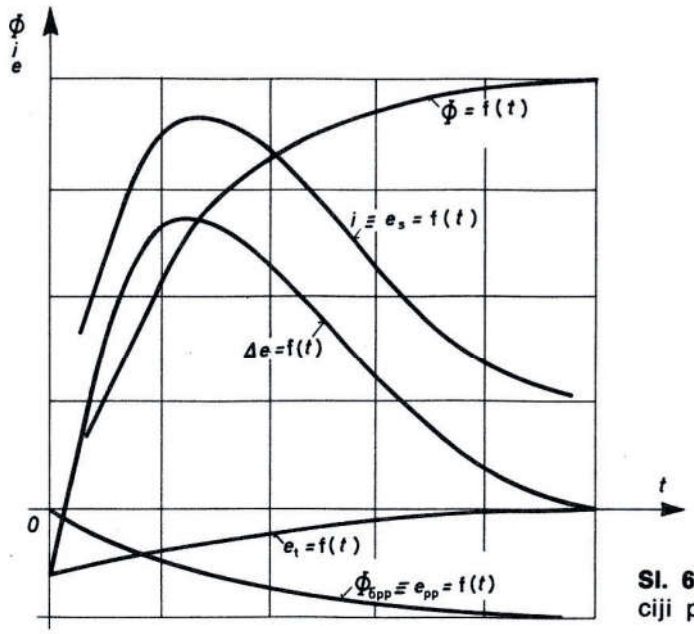
$$\Delta \bar{e}(t) = \bar{e}_s(t) + \bar{e}_{pp}(t) + \bar{e}_t(t). \tag{23}$$

Na slici 6. prikazana je ovisnost $i(t) \equiv e_s(t)$, $\Phi_{\delta pp}(t) \equiv e_{pp}(t)$, $\Phi_{gl}(t)$, $e_t(t)$ i $\Delta e(t)$ za serijski motor pri ponovnom ukapčanju na nazivni napon uz konstantnu brzinu vrtnje.

Posljedica nekompenziranog napona Δe pri prelaznom stanju stroja je iskrenje četkica, koje ne smije prekoračiti propisima dopuštene vrijednosti. Nekompenzirani napon Δe može se smanjiti ako smanjimo utjecaj vrtložnih struja na magnetski tok pomoćnih polova, a to se postiže na dva načina:

a) Izvedbom jezgre pomoćnih polova i jarma statora od neizoliranoga magnetskog lima, pri čemu se povećavaju specifični električni otpori ρ_1 i ρ_2, prema izrazu (8), približno tri puta, pa se protjecanje vrtložnih struja smanjuje približno na trećinu. Lameliranjem

samo jezgre pomoćnih polova, uz masivan jaram statora, neznatno se smanjuje nekompenzirani napon Δe. Najveće smanjenje nekompenziranog napona ostvaruje se izvedbom jezgri pomoćnih polova i jarma statora od izoliranoga magnetskog lima.



Sl. 6. Nekompenzirani napon svitka u komutaciji pri prelaznom stanju serijskoga motora

b) Izvedbom drugoga zračnog raspora δ_j između jezgre pomoćnog pola i jarma statora uz povećanje protjecanja namota pomoćnih polova, pri čemu se povećava magnetski otpor $R_{\delta m}$ zračnog raspora prema izrazu (20) i smanjuje se utjecaj člana $\frac{\Theta_{vpp}}{R_{\delta m}}$ u relaciji (21). Drugi zračni raspor ostvaruje se pomoću podloge (izolacijskog umetka), pa je za strojeve s brzim vremenskim promjenama struje armature potrebno obratiti posebnu pažnju na izvedbu podloge, kako u njoj ne bi nastale vrtložne struje. Izvedbe podloge opisane su u odjeljku 4.5.2. Zaključuje se na temelju provedenog izlaganja da je (s obzirom na komutaciju) u prelaznim stanjima najpovoljniji stroj s lamelirano-izoliranim pomoćnim polovima i jarmom statora uz podijeljeni zračni raspor pomoćnih polova, a najnepovoljniji je stroj s masivnim pomoćnim polovima i masivnim jarmom statora uz nepodijeljeni zračni raspor pomoćnih polova.

Razmotrimo još osnovnu razliku u prelaznom stanju serijskog i nezavisno uzbuđenog stroja. Nezavinso uzbuđenom stroju magnetski je tok glavnih polova konstantan, pa u svitku koji komutira nema napona transformacije e_t, a nastaju samo napon samoindukcije e_s i napon e_{pp} induciran magnetskim tokom u zračnom rasporu pomoćnih polova. Za razmatrano prelazno stanje stroja s nezavisnom uzbudom, uzevši u obzir nastanak vrtložnih struja u magnetskom krugu pomoćnih polova, potrebno je odrediti vremensku ovisnost struje armaturnoga strujnog kruga $i(t)$ i magnetskog toka u zračnom rasporu pomoćnih polova $\Phi_{\delta pp}(t)$. Iz toga dalje nalazimo vremensku ovisnost napona samoindukcije $e_s(t)$ i napona $e_{pp}(t)$ stvorenoga magnetskim tokom u zračnom rasporu pomoćnih polova. Nekompenzirani napon $\Delta e(t)$ može se izračunati pomoću izraza (23).

Već smo spomenuli da se u prelaznom stanju, zbog nastanka nekompenziranog napona Δe, pojavljuju nepovoljni uvjeti komutacije posljedica kojih je iskrenje četkica. U prelaznim stanjima dopušta se određeno manje iskrenje četkica, jer je kratkotrajno, no ono ipak ne smije oštetiti kolektor. Dopuštena jačina iskrenja ovisi o učestalosti prelaznih

stanja, pa će tako stroju s čestim prelaznim stanjima biti poželjno manje iskrenje nego onome kojem je prelazno stanje rijetka ili slučajna pojava. Dopuštene vrijednosti nekompenziranog napona Δe, ovisno o vrsti stroja (serijski, kompaundirani, nezavisni), njegovoj opremi i tehnološkoj izvedbi (nekompenzirani, kompenzirani, masivni ili lamelirani magnetski krug pomoćnih polova), nalaze se u području od 1 do 1,5 puta dopuštene vrijednosti napona samoindukcije e_s u trajnom radu bez iskrenja četkica. Određivanje nekompenziranog napona Δe, kao kriterija komutacijskog naprezanja stroja u prelaznim stanjima, dugotrajan je postupak i zahtijeva poznavanje raznih konstrukcijsko-proračunskih podataka o stroju. Zato je nekompenzirani napon Δe, kao kriterij, veoma neprikladan za širi krug korisnika strojeva.

Upotreba istosmjernih strojeva za regulirane elektromotorne pogone raznih karakteristika zahtijeva jednostavnu, makar i približnu, metodu određivanja komutacijskih naprezanja u prelaznim stanjima. Pri tome se, kao kriterij komutacijskog naprezanja stroja u prelaznim stanjima, upotrebljava vremenska promjena struje armaturnoga strujnog kruga $\frac{di}{dt}$.

Dopuštena vrijednost vremenske promjene struje armaturnoga strujnog kruga prema empirijskoj relaciji je:

$$\frac{d(\frac{i}{I_n})}{dt} \leq C\frac{I_n n_{Amax}}{\Delta I\, n} \quad [Ins^{-1}] \tag{24}$$

ili:

$$\frac{di}{dt} \leq C\frac{I_n n_{Amax}}{\Delta I\, n} \quad [As^{-1}].$$

Pri tom je I_n nazivna struja, C konstanta ovisna o izvedbi stroja $[s^{-1}]$ (odabire se prema tablici na sl. 7), ΔI vršna vrijednost struje u prelaznom stanju, n brzina vrtnje pri kojoj se razmatra vremenska promjena struje i n_{Amax} je maksimalna brzina vrtnje, pri kojoj se, uz nazivnu indukciju u zračnom rasporu glavnih polova, ostvaruje dopušteni napon između kolektorskih lamela. U tablici na slici 7. svrstane su vrijednosti konstante C ovisno o izvedbi magnetskog kruga pomoćnih polova, a odnose se na istosmjerne strojeve srednjih

Izvedba magnetskog kruga pomoćnih polova	C
	s^{-1}
masivna	15–20
lamelirana – neizolirana, polovi učvršćeni vijcima, česta prelazna stanja	200–250
lamelirana – neizolirana, polovi učvršćeni vijcima, prelazna stanja slučajna pojava	400–500
izvedba statora lamelirana – izolirana iz lima u jednom komadu	praktički neograničena

Sl. 7. Konstanta C za određivanje dopuštene vrijednosti $\frac{di}{dt}$ u prelaznim stanjima

snaga. Kad proračunom određenoga reguliranog elektromotornog pogona u prelaznom stanju dobijemo veće vrijednosti vremenske promjene struje $\frac{di}{dt}$ od dopuštenih prema izrazu (24), potrebno je prigušiti vremensku promjenu struje $\frac{di}{dt}$. Ako to, zbog namjene radnog mehanizma, nije moguće, valja uzeti istosmjerni stroj drukčije konstrukcijske izvedbe, s povoljnijim komutacijskim svojstvima u prelaznim stanjima.

7.6. Zadaci i problemi

7.6.1. Zadaci

1. Četveropolni istosmjerni poredni generator ima karakteristiku magnetiziranja:

Φ_{gl} [Vs]	0,0175	0,0335	0,044	0,0485	0,052	0,054
Θ [A po polu]	1000	2000	3000	4000	5000	6000

Namot je armature petljast jednovojan s jednim zavojem između kolektorskih lamela. Kolektor ima 162 lamele, a namot poredne uzbude 1094 zavoja po polu. Generator se pogoni asinhronim motorom sinhrone brzine vrtnje 1500 min^{-1}.

Potrebno je odrediti minimalnu vrijednost ukupnog otpora porednoga uzbudnog strujnog kruga pri kojoj se generator neće uzbuditi u zaletu.

2. Četveropolni istosmjerni nezavisno uzbuđeni motor sa 185 kW, 420 V, 470 A i 1500 min^{-1} ima na armaturi 54 utora sa šest vodiča po utoru. Namot je armature petljast jednovojan, a otpor namota armature, pomoćnih polova, kompenzacije i ekvivalentni prelazni otpor na četkicama iznosi 0,0179 Ω. Odredite vrijednost predotpora u armaturnome strujnom krugu ako motor u trenutku pokretanja (pri mirovanju) mora razviti moment od 2 kNm.

3. Četveropolni istosmjerni nezavisno uzbuđeni generator ima karakteristiku magnetiziranja:

Φ_{gl} [Vs]	0,0175	0,0335	0,044	0,0485	0,052	0,054
Θ [A po polu]	1000	2000	3000	4000	5000	6000

Namot je armature petljast jednovojan s ukupno 324 vodiča. Namot nezavisne uzbude ima otpor od 24 Ω u pogonski toplom stanju, a na svakom polu su 494 zavoja. Koeficijent je rasipanja glavnih polova u nezasićenom stanju 1,12. Valja odrediti električku vremensku konstantu uzbudnog namota ovisno o naponu na stezaljkama stroja u primjeru praznog hoda pri brzini vrtnje od 1500 min^{-1}.

4. Istosmjerni nezavisno uzbuđeni generator ima otpor namota armaturnoga strujnog kruga od 0,018 Ω i karakteristiku praznog hoda, uz protjecanje uzbudnog namota po polu, $E = 0{,}11\Theta$. Namot uzbude ima 500 zavoja, a otpor mu je 25 Ω. Na stezaljke generatora priključen je radni otpor od 0,5 Ω.

   Potrebno je odrediti faktore pojačanja:
   a) napona;
   b) snage.

5. Istosmjernome generatoru s nezavisnom i porednom uzbudom otpor namota armaturnoga strujnog kruga je 0,018 Ω i karakteristika praznog hoda, uz protjecanje uzbude po polu je $E = 0{,}11\,\Theta$. Namot nezavisne uzbude ima 500 zavoja, a otpor mu je 100 Ω. Omjer protjecanja nezavisne i poredne uzbude iznosi $\frac{1}{3}$, a na stezaljke generatora priključen je radni otpor od 0,5 Ω. Valja naći faktore pojačanja:
   a) napona;
   b) snage.

6. Četveropolni istosmjerni nezavisno uzbuđeni motor od 50 kW, 220 V, 252 A i 1 000 min^{-1} ima na kolektoru 117 lamela, a magnetski krug pomoćnih polova masivne je izvedbe. Dopuštena srednja vrijednost napona između kolektorskih lamela iznosi 16 V.

   Pri opterećenju dvostrukom nazivnom strujom valja ustanoviti:
   a) dopuštenu vremensku promjenu struje armaturnoga strujnog kruga;
   b) izvedbu magnetskog kruga pomoćnih polova ako je zahtjevana vremenska promjena struje armaturnoga strujnog kruga 6 000 As^{-1}.

7.6.2. Rješenja

1. Uvodno određujemo namotu armature broj vodiča $z = 2kw_s = 324$ i broj pari paralelnih grana $a = p = 2$.
   Generator se neće uzbuditi u zaletu kad mu je ukupni otpor porednoga uzbudnog kruga veći od kritičnog otpora samouzbude za brzinu vrtnje od 1 500 min^{-1}. Na slici 1. nalazi se karakteristika magnetiziranja $\Phi_{gl}(\Theta)$. Za po volji odabranu točku A na nezasićenom dijelu karakteristike magnetiziranja bit će glavni magnetski tok $\Phi_{gl} = 0{,}0175$ Vs i pripadno protjecanje porednoga uzbudnog namota $\Theta = 1\,000$ A po polu. Inducirani napon, pri brzini vrtnje od 1 500 min^{-1}, iznosi prema izrazu (4.1–4):

$$E = \frac{p\Phi_{gl}nz}{a60} = 141{,}75 \text{ V},$$

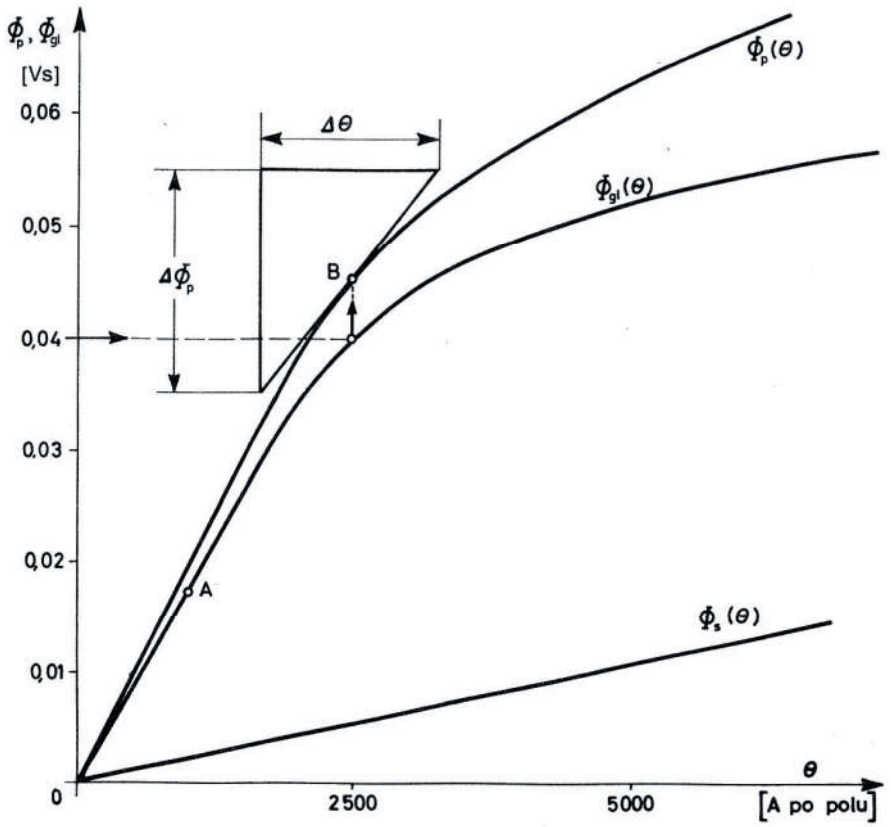
a struja poredne uzbude je:

$$i_u = \frac{\Theta}{w_u} = 0{,}914 \text{ A}.$$

Kritični otpor samouzbude iznosi:

$$R_{mk} = \frac{E}{i_u} = \frac{141{,}75}{0{,}914} = 155{,}1\ \Omega.$$

[Generator se neće uzbuditi kad je ukupni otpor porednoga uzbudnog kruga veći od 155,1 Ω.]



Sl. 1.

2. Uz broj vodiča namota armature $z = Nz' = 324$ i broj pari paralelnih grana $a = p = 2$ inducirani je napon pri nazivnom opterećenju motora:

$$E = U - I_a R_u = 420 - 470 \cdot 0{,}0179 = 411{,}6\ \text{V}.$$

Magnetski tok glavnih polova prema izrazu (4.1–4) je:

$$\Phi_{gl} = \frac{60aE}{pnz} = \frac{60 \cdot 2 \cdot 411{,}6}{2 \cdot 1\,500 \cdot 324} = 0{,}0508\ \text{Vs}.$$

Iz relacije (4.2–3) za razvijeni moment motora dobivamo vrijednost struje armature u trenutku pokretanja:

$$I_p = \frac{2a\pi M_p}{pz\Phi_{gl}} = \frac{2 \cdot 2\pi \cdot 2\,000}{2 \cdot 324 \cdot 0{,}0508} = 763{,}5\ \text{A}.$$

U mirovanju nema induciranog napona, pa je:

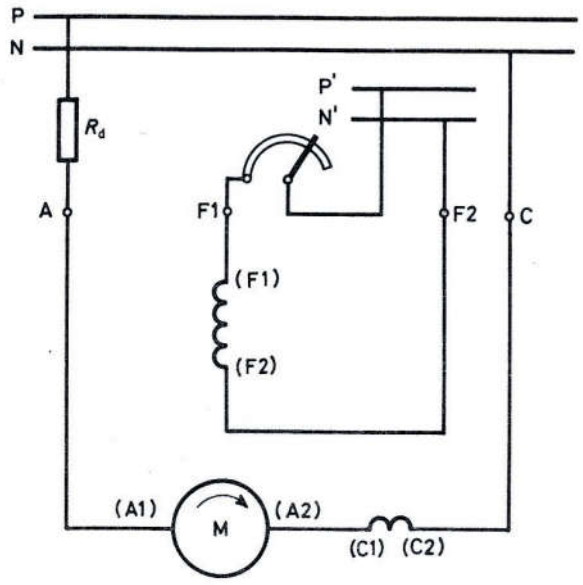
$$I_p = \frac{U}{R_u + R_d},$$

odakle je vrijednost predotpora u armaturnome strujnom krugu:

$$R_d = \frac{U - I_p R_u}{I_p} = 0{,}5322\ \Omega.$$

Shema spoja motora i predotpora u primjeru desnog smjera vrtnje prikazana je na slici 2.

[$R_d = 0{,}532\ \Omega$]



Sl. 2.

3. Električka vremenska konstanta uzbudnog namota (ne strujnog kruga) u nezasićenome magnetskom krugu (vidi rješenje 10 zadatka u odjeljku 4.7.2.) je:

$$T_u = \frac{2pw_u\Phi_p}{i_u R_m}, \qquad \text{(A)}$$

pri čemu je w_u broj zavoja namota uzbude po polu [1], Φ_p magnetski tok u jezgri glavnog pola [Vs] i R_m je otpor namota uzbude [Ω].

Uvrštenjem $\Theta = i_u w_u$ u izraz (A) dobivamo:

$$T_u = \frac{2pw_u^2\Phi_p}{\Theta R_m}. \qquad \text{(B)}$$

Budući da se električka vremenska konstanta uzbudnog namota mijenja sa zasićenjem magnetskog kruga glavnih polova, za relaciju (B) možemo pisati:

$$T_u = \frac{2pw_u^2}{R_m} \quad \frac{\Delta\Phi_p}{\Delta\Theta}.$$

Karakteristika magnetiziranja $\Phi_{gl}(\Theta)$ prikazana je na slici 1, kao i ukupni magnetski tok u jezgri pola. U točki B, koja odgovara vrijednosti glavnoga magnetskog toka 0,04 Vs, nacrtana je tangenta i za promjenu magnetskog toka $\Delta\Phi_p = 0{,}02$ Vs otčitana je vrijednost promjene protjecanja po paru polova $\Delta\Theta = 1\,600$ A. Inducirani napon za glavni magnetski tok $\Phi_{gl} = 0{,}04$ Vs prema izrazu (4.1–4) iznosi:

$$E = \frac{p\Phi_{gl}nz}{a60} = 324 \text{ V},$$

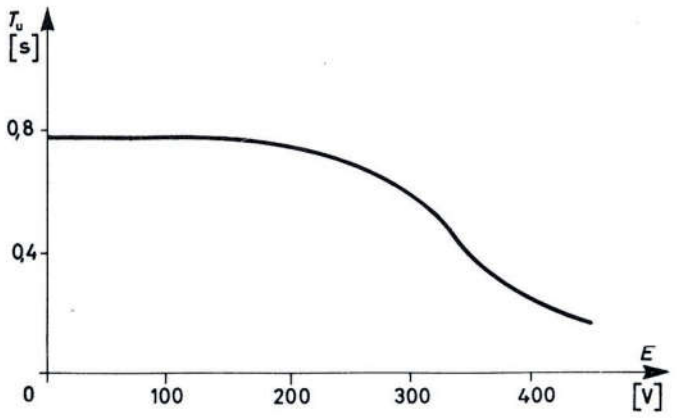
a električka vremenska konstanta pri tom naponu je:

$$T_u = \frac{2pw_u^2}{R_m} \quad \frac{\Delta\Phi_p}{\Delta\Theta} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 494^2}{24} \quad \frac{0{,}02}{1\,600} = 0{,}51 \text{ s}.$$

Ponavljanjem postupka za razne vrijednosti glavnoga magnetskog toka dobivamo vrijednosti električke vremenske konstante i induciranog napona, kako je to prikazano u tablici na slici 3. Na slici 4. predočena je ovisnost električke vremenske konstante uzbudnog namota o naponu na stezaljkama stroja u praznom hodu pri brzini vrtnje od 1 500 min^{-1}.
[Ovisnost T_u (E) prikazana je na sl. 4.]

Φ_{gl}	Vs	0	0,02	0,03	0,04	0,045	0,05	0,055
$\Delta\Phi_p$	Vs	0,02						
$\Delta\Theta$	A	1050	1050	1150	1600	2550	3550	4700
E	V	0	162	243	324	364,5	405	445,5
T_u	s	⌣0,78		⌣0,71	⌣0,51	⌣0,32	⌣0,23	⌣0,17

Sl. 3.



Sl. 4.

4. a) [Faktor pojačanja napona je 2,123.]
b) [Faktor pojačanja snage iznosi 225,5.]

5. a) [Faktor pojačanja napona je 2,2.]
b) [Faktor pojačanja snage iznosi 934,4.]

6. a) Srednja vrijednost napona između lamela kolektora prema izrazu (5.4–27) bit će pri nazivnom naponu:

$$e_{kn} = \frac{2pU_n}{k} = \frac{4\,220}{117} = 7{,}52 \text{ V}.$$

Maksimalna brzina vrtnje pri kojoj se ostvaruje dopuštena srednja vrijednost napona između kolektorskih lamela je:

$$n_{Amax} = n_n \frac{e_k}{e_{kn}} = 1\,000 \frac{16}{7{,}52} = 2\,127{,}3 \text{ min}^{-1}.$$

Dopuštena vrijednost vremenske promjene struje armaturnoga strujnog kruga prema relaciji (7.5–24), uz $C = 20 \text{ s}^{-1}$ (vidi sl. 7.5–7), iznosi:

$$\frac{\mathrm{d}\left(\frac{i}{I_n}\right)}{\mathrm{d}t} = C\frac{I_n}{\Delta I}\frac{n_{Amax}}{n} = 20\,\frac{1}{2}\,\frac{2\,127{,}3}{1\,000} = 21{,}273\ I_n\text{s}^{-1}$$

ili:

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = 21{,}273 \cdot 252 = 5\,360{,}8 \text{ As}^{-1}.$$

[Dopuštena je vrijednost $\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = 5\,360{,}8 \text{ As}^{-1}$.]

b) [Magnetski krug pomoćnih polova mora biti lameliran (smije biti i neizoliran) i polovi učvršćeni vijcima.]

8. SPECIJALNI ISTOSMJERNI STROJEVI

Specijalnim istosmjernim strojevima ne smatramo one kojih je namjena specijalna ili zahtijeva posebno konstrukcijsko oblikovanje i opremu bez diranja u osnovne fizikalne slike. To su normalni istosmjerni strojevi sa specijalnom izvedbom, kao npr. valjaonički motori, vučni motori, dizalični motori, brodski istosmjerni generatori itd. Pod nazivom *specijalni istosmjerni* stroj mislimo uvijek da se nešto fizikalno mijenja prema normalnim strojevima, o kojima je dosad bilo riječi. Takvih strojeva, koji su izvedeni iz normalnoga istosmjernog stroja, ima mnogo vrsta. Ovdje nije mjesto da se detaljno ulazi u tehničku problematiku takvih strojeva. U ovom poglavlju ćemo za najvažnije od tih specijalnih vrsta dati osnovnu fizikalnu sliku, na osnovi koje se može steći najosnovnije razumijevanje djelovanja takva stroja. Na temelju takve predodžbe moći će se ulaziti u daljnju, prije svega tehničku problematiku konstruiranja, gradnje i upotrebe takvih strojeva uz pomoć odgovarajuće literature.

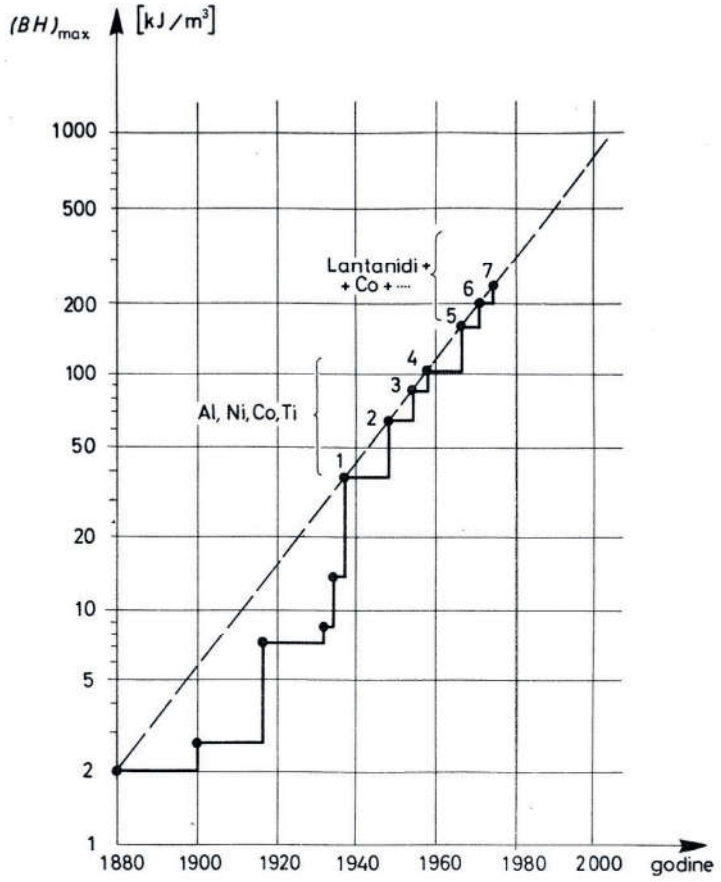
8.1. Istosmjerni stroj s permanentnim magnetima

Istosmjernom stroju s permanentnim magnetima magnetsko se polje ne stvara strujom u uzbudnom namotu, elektromagnetom, već permanentnim magnetima (trajnim magnetima) ugrađenima u magnetski krug stroja, obično u polove stroja.

Princip mogućnosti uzbuđivanja istosmjernog stroja permanentnim magnetima poznat je barem toliko dugo koliko i sam istosmjerni stroj. Pa ipak, donedavno nismo nalazili takve strojeve u industrijskoj upotrebi, o njima se obično nije pisalo u udžbenicima. Nešto malo strojeva s permanentnim magnetima, obično vrlo male snage, pojavljivalo se u električnim mjernim i sličnim napravama (tahogeneratori, izvršni članovi upravljačkih aparatura i slično). Pravi je razlog takvu stanju u tome što permanentni magnet dugo godina, gotovo cijelo stoljeće, nije mogao prikupiti u jedinici volumena ni maleni dio one magnetske energije koja se dade skupiti elektromagnetom. Zbog toga bi strojevi s permanentnim magnetima, da su se gradili, bili mnogo veći, teži i skuplji od strojeva s klasičnom uzbudom pa im prema tome i ekonomski nekonkurentni.

Tehnički i tehnološki razvoj permanentnih magneta je koncem pedesetih godina doveo do novih vrsta permanentnih magneta s magnetskom (maksimalnom) energijom od 30 do 100 kJ/m^3. To je omogućivalo pomisao na izgradnju istosmjernih strojeva s permanentnim magnetima koji bi mogli biti konkurentni klasičnim istosmjernim strojevima. Na slici 1. prikazan je vremenski razvoj permanentnih magneta u toku posljednjih sto godina. Pojedina otkrića novih vrsta permanentnih magneta označena su točkama. Značajnu skupinu (točke 1, 2, 3 i 4) čine magneti na bazi slitina željeza s aluminijem, niklom, kobaltom i titanom ili bakrom, često nazvanu ALNICO-magnetima. Novije vrste permanentnih

magneta sa znatno većom mogućnosti koncentracije energije u jedinici volumena osnivaju se na slitinama željeza s kobaltom i rijetkim zemljama, lantanidima (točke 5, 6 i 7 na sl. 1), od kojih su najčešće kombinacije sa samarijem (uobičajio se naziv RECOMA-magneti). S njima se postiže i dvostruka koncentracija energije u volumenu (vidi sl. 1). Teško je reći što će još donijeti razvoj i je li u današnje doba



Sl. 1. Razvoj maksimalne energije $(BH)_{max}$ tokom ovog stoljeća. Crtkana linija prikazuje eksponencijalni razvoj, što posebno odgovara realnosti od 1940. Točke 1, 2, 3 i 4 odgovaraju slitinama A1-Ni-Co-Ti, a 5, 6 i 7 slitinama kobalta i lantanida (rijetkih zemalja).

već dostignuto zasićenje. No teorijska spoznaja da npr. čisto željezo ima gornju granicu koncentracije energije (kad bi se uspjeli jednako usmjeriti svi momenti atoma) negdje oko 800 kJ/m³, ohrabruje pomisao da će budućnost donijeti još jače permanentne magnete.

U osnovi već svojstva boljih vrsta ALNICO-magneta stvaraju tehničku mogućnost konkurentnosti istosmjernog motora s permanentnim magnetima klasičnome, dakako samo u nekim namjenama i za samo neke vrste strojeva. Ali, neke specifičnosti permanentnih magneta uzrokovale su određena oklijevanja pristupu gradnje istosmjernih strojeva s permanentnim magnetima. Tako je svojstvo nekih magneta s slitinama Al-Ni-Co-Ti da se izuzetno teško obrađuju (mehanički), a neki se uopće i ne daju obrađivati, što sve vodi izradi (lijevanju)

magneta u konačnom obliku. Zbog toga raste, s veličinom magneta, cijena po kilogramu, i to tako naglo da se nije isplatilo graditi strojeve veće snage. Osim toga bila je potrebna određena visina (dužina) magneta da se izgradi konkurentski sposoban stroj klasičnome. Zato je trebalo drukčije dimenzionirati (zasnivati) takav stroj, u principu s višim polovima od klasičnih, što je zahtijevalo stroj manjeg promjera armature, a zbog toga duljeg paketa armature itd. Magneti s rijetkim zemljama, zbog svoje mogućnosti znatno veće koncentracije magnetske energije u jedinici volumena, ne stvaraju takve teškoće, ali su jako nepovoljna njihova loša mehanička svojstva. Oni nemaju gotovo nikakve žilavosti, sipki su, pa je izuzetno teško riješiti konstrukcijske i tehnološke teškoće gradnje na zadovoljavajući način. No razvoj je s vremenom riješio neke od problema, pa su se koncem šezdesetih godina pojavile prve serije istosmjernih strojeva s permanentnim magnetima koji su bili konkurentni klasičnim strojevima, ali samo za neke specijalne namjene [L 37 i 49]. Današnja je situacija takva da su industrijski istosmjerni strojevi s permanentnim magnetima tipa ALNICO (snage do oko 1 000 kW) tehnička realnost, ali im je područje upotrebe, zbog visokih nabavnih cijena, još uvijek jako suženo na neke posebne pogone (kotrljače, alatni strojevi, valjaonički pogoni i slično), a istosmjerni se strojevi s permanentnim magnetima na bazi slitina rijetkih zemalja nalaze još uvijek u fazi razvoja, i tek se očekuju u industrijskoj upotrebi. Istosmjerni strojevi s permanentnim magnetima danas su tehnička i industrijska realnost i sigurno će proširiti područje upotrebe, ali samo ondje gdje će zadovoljavati njihove karakteristike. Uvijek će oni ostati ograničeni na svoju u principu poredbu (nezavisnu) karakteristiku, te na pogone koji ne zahtijevaju regulaciju poljem, jer im je uzbuda uvijek praktički konstantna.

8.1.1. Teorija istosmjernog stroja s permanentnim magnetima

Recimo uvodno nekoliko riječi o magnetizmu u nekome materijalu. Zbog kretanja elektrona u materijalu općenito nastaju magnetska polja kojima je smjer ovisan o smjeru vrtnje elektrona. Svakome od tih elementarnih magnetskih polja može se dodijeliti njegov dipolni moment $\overline{m}$. U nemagnetskom materijalu takav je raspored dipolnih momenata da je njihova gustoća (broj momenata $\overline{m}$ u jedinici volumena) zanemarivo mala ili je jednaka nuli:

$$\lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta \overline{m}}{\Delta V} = \frac{\mathrm{d}\overline{m}}{\mathrm{d}V} = 0.$$

Specifična gustoća dipola naziva se magnetiziranje i označava se s $\overline{M}$:

$$\overline{M} = \lim_{\Delta V \to 0} \frac{\Delta \overline{m}}{\Delta V} = \frac{\mathrm{d}\overline{m}}{\mathrm{d}V}, \tag{1}$$

pa kad je $\overline{M} = 0$, riječ je o takvoj raspodjeli dipolnih momenata pri kojoj se njihovo djelovanje uzajamno poništava. Djeluje li na materijal u nekom prostoru (vanjsko) magnetsko polje, orijentiraju se pojedini dipoli u smjeru vanjskoga

magnetskog polja. Za veliku grupu materijala vlada direktna proporcionalnost magnetiziranja $\overline{M}$ i vanjskog polja $\overline{H}$:

$$\overline{M} = x_m \overline{H}, \tag{2}$$

pri čemu se x_m naziva magnetskom susceptibilnosti. Ukupna magnetska indukcija u materijalu je tad:

$$\overline{B} = \mu_0(\overline{H} + \overline{M}), \tag{3}$$

što nakon uvođenja (2) u (3) daje:

$$\overline{B} = \mu_0(\overline{H} + x_m\overline{H}) = \mu_0(1 + x_m)\overline{H}$$

i, konačno:

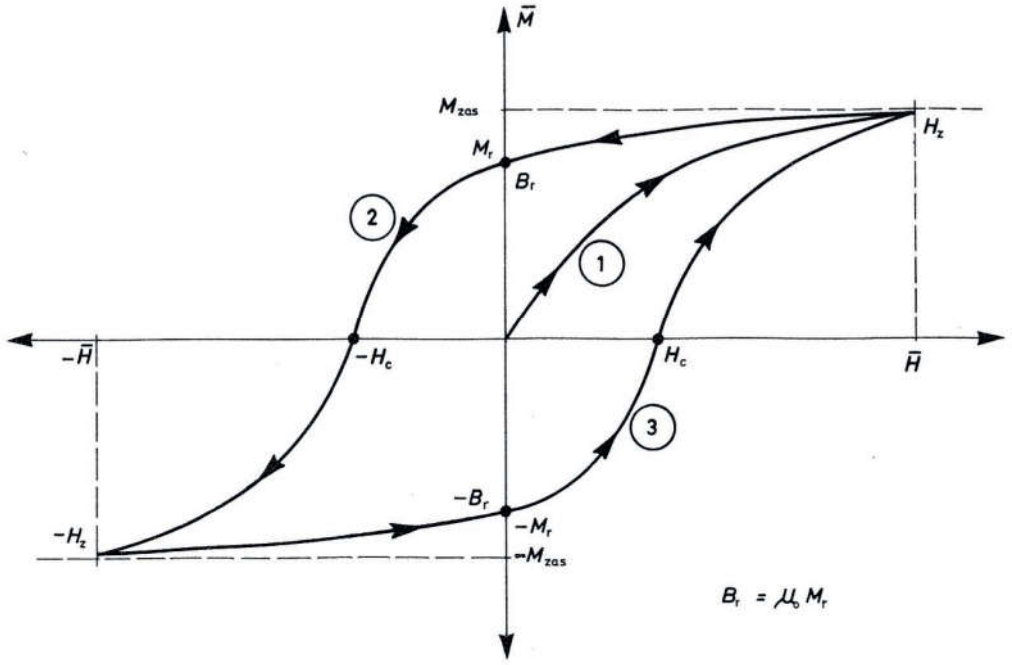
$$\overline{B} = \mu_0\mu_r\overline{H}. \tag{4}$$

U izvedenim relacijama μ_0 je apsolutna permeabilnost vakuuma, a μ_r je relativna permeabilnost određenoga promatranog materijala. I upravo je ta relativna permeabilnost pogodna za klasifikaciju materijala s obzirom na magnetska svojstva:

- materijali s $\mu_r < 1$ su dijamagnetski materijali;
- materijali s $\mu_r > 1$ su paramagnetski materijali;
- materijali s $\mu_r >> 1$ su feromagnetski materijali.

U daljem razmatranju nećemo se koristiti dijamagnetskim i paramagnetskim materijalima, jer su permanentni magneti od feromagnetskih materijala. Međutim, nisu svi feromagnetski materijali ujedno i permanentni (trajni) magneti. To su samo takozvani tvrdi feromagnetski materijali, za razliku od mekih, koji nisu trajni magneti. Objasnimo definiciju: Djelujemo li magnetskim poljem na neki feromagnetski materijal, i to tako da jakost magnetskog polja $\overline{H}$ raste, izazivat ćemo u materijalu magnetiziranje $\overline{M}$ koje će također rasti (vidi sl. 2, krivulju 1, koju nazivamo krivuljom prvog magnetiziranja). S porastom snage polja rast magnetiziranja $\overline{M}$ sve je manji i približavamo se zasićenju, što predočuje vrijednost M_{zas} na slici 2, tj. točki gdje bi se (teorijski) svi potencijalni magnetski dipoli orijentirali u smislu polja $\overline{H}$. Ako tad počnemo smanjivati snagu polja H od H_z sve do snage polja $-H_z$ (u suprotnom smjeru), vrijednost magnetiziranja M ponaša se po krivulji 2 na slici 2, i postiže uz snagu polja $-H_z$, vrijednost blizu $-M_{zas}$. Ako nanovo okrenemo smisao promjene polja (od $-H_z$ prema $+H_z$), magnetiziranje će davati vrijednosti prema krivulji 3 na slici 2. Krivulja 2 (krivulja demagnetiziranja) i krivulja 3 (krivulja ponovnog magnetiziranja) zatvaraju uvijek istu petlju, ali samo kad se vrijednost magnetskog polja mijenja između konstantnih i jednakih vrijednosti H_z i $-H_z$. Na slici 2. su još markantne točke M_r – točka remanencije, i H_c – točka koercitivnosti ili koercitivna sila. Za točku M_r (na krivulji demagnetiziranja) vrijedi prema relaciji

(3) $B_r = \mu_0 M_r$, jer je $H = 0$, tj. vrijednost magnetiziranja M_r u tom stanju proporcionalna je indukciji u materijalu. B_r je remanentna magnetska indukcija uzrokovana prošlim stanjem zbog djelovanja magnetskog polja H_z. Prema tome je točka M_r na slici 2. u nekome drugom mjerilu i točka B_r. Feromagnetski materijal



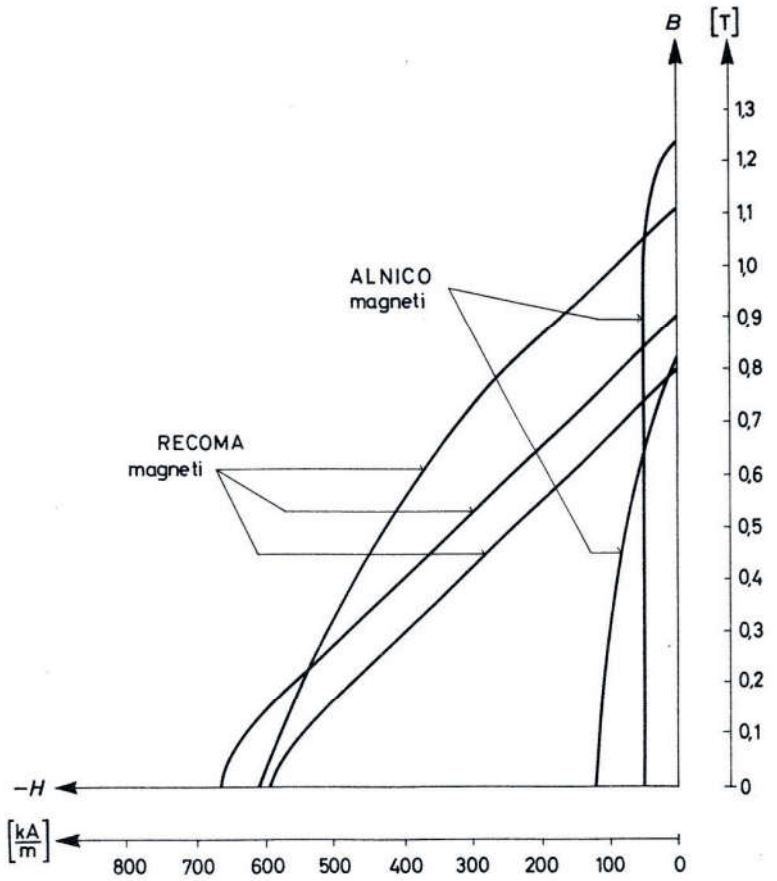
Sl. 2. Ovisnost magnetiziranja o snazi magnetskog polja H: 1 označava krivulju prvog magnetiziranja, 2 krivulju demagnetiziranja, a 3 krivulju ponovnog magnetiziranja. Slična je i ovisnost $B(H)$ – petlja histereze.

zovemo mekim kad mu je vrijednost koercitivne sile H_c mala ili nikakva, a tvrdim kad je H_c veliko. Permanentni su magneti, dakle, sazdani od materijala s velikom koercitivnom silom H_c, sa širokom petljom histereze.

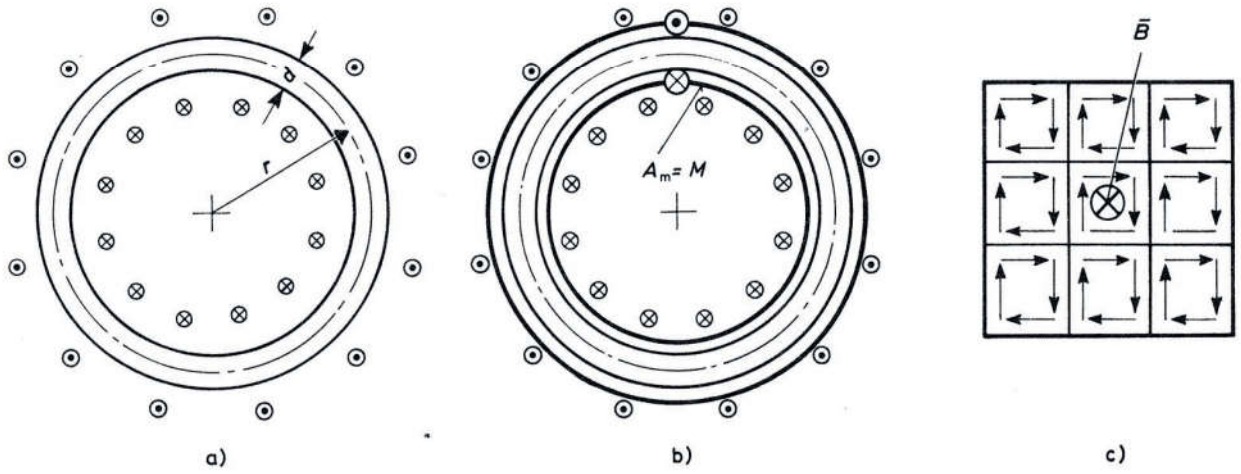
U praksi se mnogo češće upotrebljava ovisnost $B(H)$ umjesto $M(H)$ koja je izražena slikom 2. Nas, naime, zanima vrijednost indukcije B u magnetskom krugu neke naprave s permanentnim magnetima mnogo više od vrijednosti magnetiziranja M. I to nas u principu zanima vrijednost $B(H)$ u drugom kvadrantu. Budući da je ovisnost $B(H)$ slična onoj $M(H)$, to će i njezina slika biti kvalitativno slična slici 2. Na slici 3. prikazana je ovisnost $B(H)$ za neke najvažnije vrste permanentnih magneta, i to u drugom kvadrantu.

Permanentni magneti u istosmjernom stroju djeluju u jednome relativno složenome magnetskom krugu. Da ne preskočimo izravno sa stanja u materijalu na stanje u stroju, što bi moglo izazvati određene nejasnoće, razmotrimo najprije pojavu u jednostavnome magnetskom krugu na slici 4.a. Određenoj indukciji B u prstenastom namotu s feromagnetskom jezgrom pripada prema krivulji magnetiziranja jakost polja H i odgovarajuće protjecanje $\Theta = 2\pi r H$, a omjer $B/H = \mu = \mu_0 \mu_r$ je, dakako, apsolutna permeabilnost željeza. Pretpostavljamo da je debljina jezgre d na slici 4.a mnogo puta manja od polumjera prstena r, tako da možemo jakost polja H u presjeku jezgre smatrati konstantnom. Vrijednost

indukcije B u našem je slučaju μ_r puta veća nego što bi bila kad bi isto protjecanje vladalo u krugu istih dimenzija, ali bez feromagnetske jezgre, gdje bi vrijedilo $B/H = \mu_0$. Naš se krug ponaša (u usporedbi s onim bez feromagnetika) kao da mu je dodan neki fiktivni strujni oblog A_m jednak magnetiziranju M (vidi sl. 4.b).



Sl. 3. Krivulja demagnetiziranja za različite trajne magnete



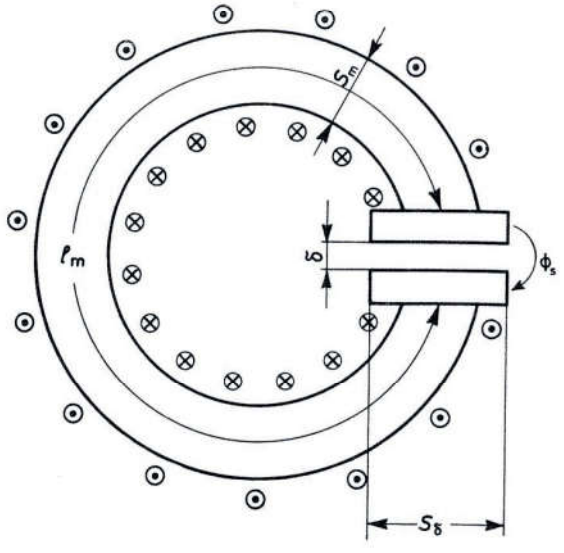
Sl. 4. Magnetiziranje *M:* a) prstenasta zavojnica s feromagnetskom jezgrom; b) prikaz zamišljenoga strujnog obloga izazvanoga molekularnim strujama; c) model molekularnih struja

Zapravo, znamo da su se magnetski dipoli tako poredali na smjer vanjskoga magnetskog polja da magnetiziranja M djeluje baš u istom smislu kao i vanjsko polje H, i to pod utjecajem toga istog vanjskog polja. Slika 4.c prikazuje model djelovanja elektronskih staza molekula u jezgri, uz pretpostavku da su svi dipoli u ravnini presjeka orijentirani (okomito na smjer polja $\vec{B}$). Dakako, pretpostavka je ispunjena tek uz vrlo veliku jakost polja (blizu zasićenja). Vidi se sa slike 4.c da se magnetska djelovanja (elektronskih) struja unutar presjeka međusobno poništavaju, tako da aktivne ostaju samo struje na vanjskom obodu. Te vanjske struje tvore uzduž površine jezgre naš *fiktivni* strujni oblog A_m. Tako za svaku točku feromagnetske jezgre vrijedi jednadžba (3) jer je i protjecanje uzbude $\Theta = iw = 2\pi rH$ ravnomjerno raspodijeljeno, kao što je ravnomjerno raspodijeljeno i pripadno protjecanje uzrokovano magnetiziranjem $2\pi rM$. Iz jednadžbi (3) i (4) izlazi neposredno:

$$M = (\mu_r - 1)H. \tag{5}$$

Budući da relativni permeabilitet feromagnetika iznosi $\mu_r = 3000 \ldots 4000$, to je protjecanje $2\pi rM$ ekstremno veliko prema protjecanju $\Theta = 2\pi rH$ uzbudnog svitka. Kad pri velikoj jakosti polja praktički sve elektronske staze leže u istoj ravnini, daljnji porast jakosti polja H ne izaziva više nikakav porast magnetiziranja. I time se tumači zasićenje feromagnetika. Ako sad našem prstenu sa svitkom iz slike 4. oduzmemo uzbudu iskapčanjem struje u uzbudnom svitku ($H = 0$), u njemu će u svakoj točki vladati remanentna indukcija B_r (vidi sl. 2). Za različite vrste feromagnetskih prstena remanentnu indukciju na slici 3. predočavaju vrijednosti uz $H = 0$.

U svakome magnetskom krugu koji sadrži permanentni magnet ili magnete nalazi se i dio kruga ili dijelovi kruga koji nisu permanentni magneti i kojima se rasprostire magnetski tok izazvan djelovanjem permanentnih magneta. Tom rasprostiranju suprotstavlja se magnetski otpor promatranog kruga. Tako zamišljamo da je permanentni magnet izvor magnetske energije u magnetskom krugu, i njegov magnetski napon tjera krugom magnetski tok, ovisno o veličini magnetskog otpora [L 55]. Zamislimo li naš promatrani magnetski krug sa slike 4.



Sl. 5. Magnetski krug prstenaste zavojnice s tvrdom feromagnetskom jezgrom sa zračnim rasporom – približenje magnetskom krugu stroja s permanentnim magnetom

rasječenim na jednom mjestu (vidi sl. 5) zračnim rasporom δ, gdje je presjek raspora S_δ drukčiji (veći) od presjeka prstena (magneta) S_m, približili smo se donekle slici magnetskog kruga stroja. Magnetski otpor zračnog raspora:

$$R_m = \frac{\delta}{\mu_0 S_\delta}$$

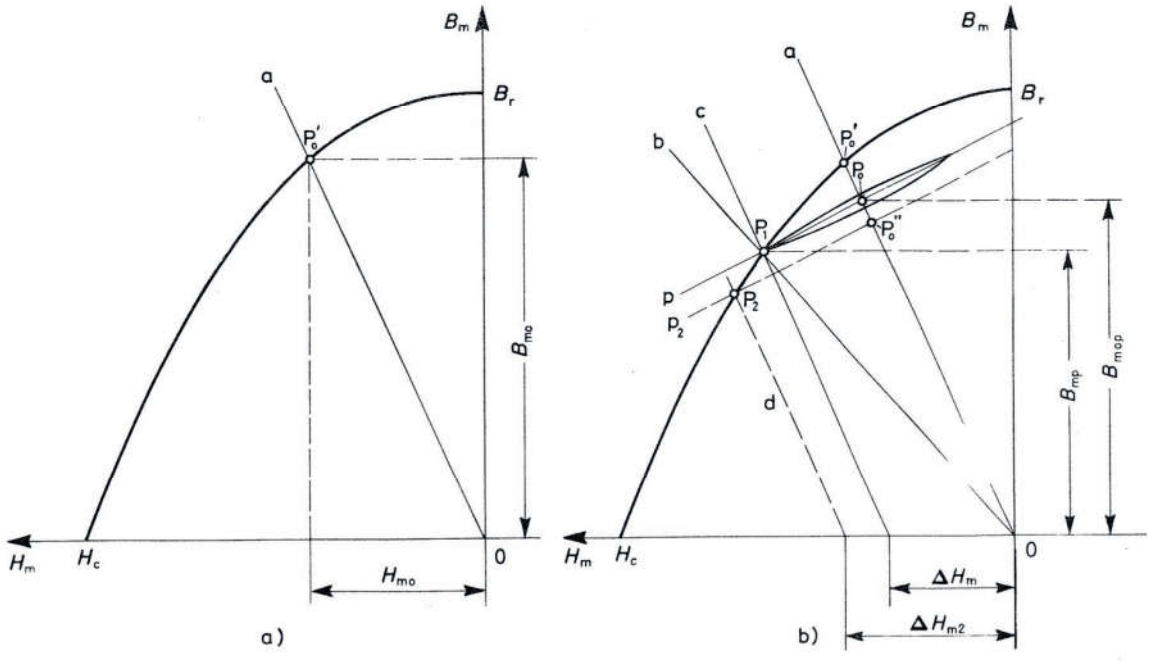
smanjit će očito veličinu magnetskog toka i u samome permanentnom magnetu. Da ocijenimo taj utjecaj, pogledajmo ove odnose. Ako je cjelokupni iznos magnetskog otpora u krugu u principu:

$$\frac{l}{\mu S} = \frac{\Theta}{\Phi} = \frac{Iw}{\Phi} = \frac{Hl}{BS},$$

iz čega izlazi poznato:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{H}{B} \text{ ili } \mu = \frac{B}{H},$$

to znači da magnetski otpor $\frac{l}{\mu S}$ i magnetsku vodljivost $\frac{\mu S}{l}$ u koordinatnom sustavu $B(H)$ predočuje pravac kroz ishodište. Za naš primjer prikazuje to pravac »a« na slici 6, a njegovo sjecište s krivuljom povratnog magnetiziranja $B_m(H_m)$, označeno s P'_o, pokazuje radnu točku, tj. vrijednost indukcije B_m u permanentno-



Sl. 6. Objašnjenje radne točke istosmjernog stroja s permanentnim magnetima: a) djelovanje magnetskog otpora na radnu točku (u praznom hodu); b) utjecaj opterećenja na pomak radne točke

me magnetu (prstenu). Indukcija u zračnom rasporu može se izračunati iz geometrijskih odnosa (ako je vrijednost magnetskog toka u svakom »presjeku« kruga jednaka) kao (vidi sl. 5):

$$B_\delta = B_m \frac{S_m}{S_\delta}. \tag{8}$$

Ta bi relacija vrijedila kad bi debljina zračnog raspora bila toliko mala da se presjek kojim prolazi tok u rasporu uopće ne poveća. Budući da nas kod realnih strojeva zanima stvarna vrijednost indukcije u zračnom rasporu, morat ćemo računati samo s glavnim tokom Φ_{gl}, a ne s ukupnim, kako je napravljeno. Ukupni tok Φ_m prolazi magnetom, a rasporom samo glavni Φ_{gl}, koji je od ukupnoga manji za rasipni tok Φ_s (označen i na sl. 5):

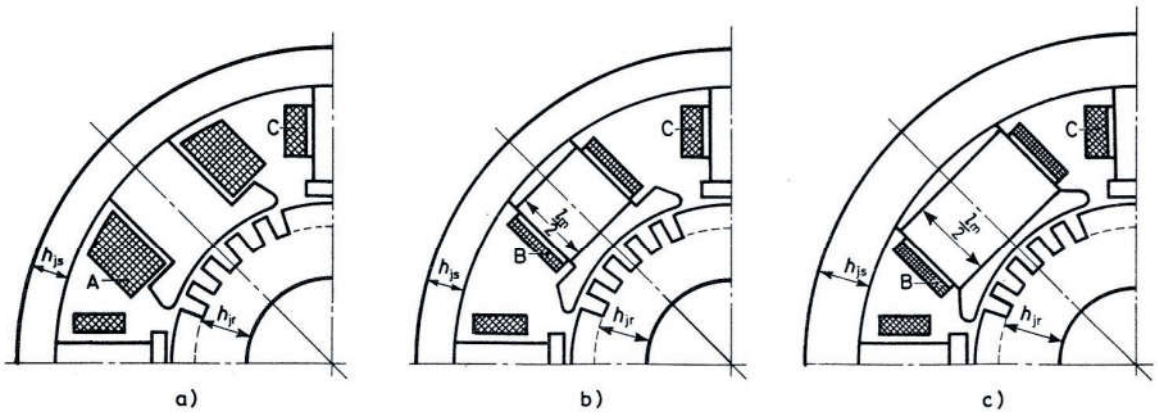
$$\Phi_m = \Phi_{gl} + \Phi_s, \tag{9}$$

tako da je stvarna vrijednost indukcije u zračnom rasporu stroja:

$$B_\delta = \frac{1}{\sigma} B_m \frac{S_m}{S_\sigma}, \tag{10}$$

gdje faktor σ označava utjecaj rasipanja magnetskog toka i iznosi:

$$\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi_{gl}} = \frac{\Phi_{gl} + \Phi_s}{\Phi_{gl}} = 1 + \frac{\Phi_s}{\Phi_{gl}}. \tag{11}$$



Sl. 7. Izvedba istosmjernih strojeva – presjeci: a) klasični četveropolni istosmjerni stroj; b) četveropolni istosmjerni stroj s permanentnim magnetima dimenzija jednakih kao u klasičnome; c) istosmjerni stroj osnovnih dimenzija jednakih onima u klasičnome, s poboljšanim iskorištenjem prostora i poboljšanim magnetskim krugom; A – uzbudni klasični namot, B – namot za magnetiziranje, C – namot pomoćnih polova

Kad se promatra magnetski krug realnog stroja s permanentnim magnetima, kakav je prikazan skicama na slikama 7.b i c, moramo odmah upozoriti na to da će se s opterećenjem stroja mijenjati nagib pravca »a« na slici 6, pa s njime i iznosi indukcija B_m i B_δ iako relacije od (8) do (11) vrijede općenito. Zato smo na slici 6. označili točku »a« s B_{mo} i H_{mo}, pri čemu indeks o znači prazni hod. Vratimo se zasad određivanju vrijednosti H_{mo} sa slike 6. Budući da je u magnetskom krugu indukcije B_{mo} (sa sl. 5) uzbuda $H_{mo}l_m$, a magnetski napon zračnog raspora V_δ jedini je magnetski napon na nekome magnetskom otporu, bit će:

$$H_{mo} = H_m = \frac{V_\delta}{l_m}. \tag{12}$$

Za složeniji magnetski krug stroja s permanentnim magnetom (sl. 7.b i c) u kojem je cijelo mnoštvo magnetskih napona na pojedinim magnetskim otporima, može se

pisati za ukupni magnetski krug stroja V_M uz izuzeće permanentnih magneta, tj. za zrak i dijelove od mekih feromagnetika:

$$V_M = 2V_\delta + 2V_z + 2V_p + V_{js} + V_{jr} \text{ [A]},$$

gdje je $2V_\delta$ magnetski napon dvaju zračnih raspora, $2V_z$ dvaju putova kroz zube armature, $2V_p$ dvaju polova, V_{js} jarma statora i V_{jv} jarma rotora.
Umjesto više parcijalnih napona pretpostavit ćemo da su u magnetskom krugu prošireni zračni raspori 2δ, i to upravo toliko da njihov magnetski otpor bude točno koliko i magnetski otpor cijeloga magnetskog kruga. Za tu pretpostavku označimo povećan zračni raspor s δ', pa vrijedi:

$$V_M = 2V'_\delta = 2\delta' H_\delta, \tag{13}$$

a iz ravnoteže magnetskog napona i protjecanja $H_m l_m = V_M = 2V'_\delta$ izlazi:

$$H_m = \frac{V_M}{l_m} = \frac{2V'_\delta}{l_m}. \tag{14}$$

Ta vrijednost polja H_m je u praznom hodu stroja (stroj bez struje u armaturi) naša vrijednost polja H_{mo} na slici 6.a, ali sad za stvarni oblik stroja poput onoga na slici 7.a ili 7.c. Time je ujedno opisano demagnetizirajuće djelovanje magnetskog otpora u magnetskom krugu istosmjernog stroja s permanentnim magnetima. Iz relacija (12) i (14) jasan je utjecaj dužine permanentnog magneta l_m na iznos indukcije u magnetu B_m, odnosno B_{mo}. Što je magnet duži, nagib je pravca »a« na slikama 6.a i b strmiji i u magnetskom je krugu jača indukcija.

Da vidimo što će se dogoditi kad armaturom poteče struja tereta. Pojavu možemo rastumačiti s dvije, formalno različite predodžbe. Prema prvoj povećava se stvarni magnetski otpor magnetskog kruga zbog djelovanja reakcije armature, što uzrokuje drukčiji raspored magnetskog toka u zračnom rasporu, zubima i polnim papučama stroja. Taj povećani magnetski otpor prikazan je na slici 6.b pravcem »b« manjeg nagiba od pravca »a«. Druga je predodžba da zamišljeni magnetski napon zbog reakcije armature (V_{zas} iz odjeljka 4.3) djeluje suprotno smislu magnetiziranja iznosom:

$$\Delta H_m = \frac{V_{zas}}{l_m} \tag{15}$$

pa ishodište pravca magnetskog otpora »a« valja na apscisi slike 6.b pomaknuti ulijevo za taj iznos, čime dobivamo pravac »c« na slici. Naravno, i pravac »b« i pravac »c« sijeku krivulju $B_m(H_m)$ u istoj točki (P_1 na sl. 6.b), pa dobivamo, za opterećeni stroj, stvarnu vrijednost indukcije B_m u magnetima, i to manju od B_{mo} u praznom hodu. Iz nje bismo uz pomoć izraza (10) mogli računati vrijednost indukcije B_δ u zračnom rasporu. To još ne bi stvaralo nikakvu nedoumicu jer i u klasičnog stroja reakcija armature izaziva sličnu pojavu gubitka glavnoga magnetskog toka ili induciranog napona. Međutim, rasteretimo li sad stroj, ponovno magnetiziranje ne odvija se više po osnovnoj krivulji demagnetiziranja; točka P_1 neće se vratiti u položaj P'_0. U principu, djeluje li se nekim dodatnim

utjecajem (jakost polja ΔH_m) na magnetski krug, uvijek će se prilikom jačanja protjecanja radna točka kretati po nekoj novoj, vrlo uskoj petlji histereze, koja se praktički može nadomjestiti pravcem »p« na slici 6.b. Položaj pravca »p« ovisi o najvećem iznosu ΔH_m koji je taj stroj (magnetski krug) dotad doživio. Dakle, u našem primjeru nakon rasterećenja stroja iz radne točke P_1 (s indukcijom u magnetima B_{mp}) na slici 6.b, vratit će se radna točka u praznom hodu u točku P_0 s iznosom indukcije u magnetu B_{mop}, što je manje nego je bilo prije opterećenja (točka P'_0 na sl. 6.a). Pravac »p« prema slici 6.b ostaje radni pravac istosmjernog stroja s permanentnim magnetom tako dugo dok opterećenje stroja (makar i sasvim kratkotrajno) preraste onu vrijednost koja je prouzrokovala ΔH_m na slici 6.b. Kad se stroju dogodi veće opterećenje koje bi izazvalo polje demagnetizacije $\Delta H_{m2} > \Delta H_m$ (vidi sl. 6.b), radna točka na krivulji $B_m(H_m)$ našla bi se na slici 6.b kao presjecište novog pravca »d« (crtkano) s tom krivuljom, tj. našle bi se u točki P_2. Nakon rasterećenja nova radna točka u praznom hodu P''_0 bila bi na novome radnom pravcu p_2 (crtkano na sl. 6.b), koji bi ubuduće bio novi radni pravac stroja. Dakle, povećano opterećenje izazvalo bi daljnju demagnetizaciju stroja, smanjenje glavnog toka pri svim opterećenjima. Tako bi istosmjerni stroj s permanentnim magnetima trajno mijenjao karakteristike jer bi njegovi magneti trajno »pamtili« najveće opterećenje koje je doživio. Takvo stanje bilo bi izuzetno nepovoljno. Zato se stroj prilikom izrade i ispitivanja stabilizira određenim postupkom, tako da se u njemu uspostavi magnetsko stanje (radni pravac »p«) koje se u pogonu neće remetiti opterećenjem. Očito je da se postupak stabilizacije mora izvesti s tolikom demagnetizirajućom jakosti polja ΔH_m da je u pogonu više nikakav teret ili pogonsko stanje ne može premašiti. Za svaki slučaj mora ipak postojati i naknadna mogućnost stabilizacije, pa je to jedan od uzroka da polovi s magnetima moraju imati jedan namot, u principu uzbudni namot, koji ne služi za rad stroja u pogonu, već samo za magnetiziranje, demagnetiziranje i stabilizaciju. Budući da se te operacije izvode vrlo kratkotrajno, može se taj namot vrlo jako (termički) preopterećivati, pa zbog toga zauzima vrlo malo mjesta. Potreba za tim namotom vidi se i iz ovog razmišljanja. Stator stroja bez rotora pruža neusporedivo veći magnetski otpor magnetskom toku, pa se u takvu stanju bez rotora stroj uopće ne bi mogao ni magnetizirati na dovoljno visoku vrijednost remanentne indukcije B_r u magnetima. Dalje, želimo li cijelom (stabiliziranom) stroju izgraditi (demontirati rotor), kad bi to uopće i bilo moguće zbog potrebnih velikih mehaničkih sila, stroj bi se suviše demagnetizirao i nakon povratka rotora u magnetski krug ne bi imao ni približno potrebno glavno magnetsko polje. Zato je i prijeko potreban taj uzbudni namot, najčešće nazvan namot za magnetiziranje. Jasno je da se i montiranje i demontiranje rotora moraju obavljati u neuzbuđenom (nemagnetiziranom) stanju stroja.

Sad je možda pravi trenutak da se spomenu neki osnovni principi gradnje stroja s permanentnim magnetima. Slika 7. daje pregled razvoja od klasičnog stroja prema onome s permanentnim magnetima. Na slici 7.a u presjeku je prikazan klasični stroj s velikim uzbudnim namotom A i namotom pomoćnih polova C. Na slici 7.b istom je stroju, bez konstrukcijskih promjena, ugrađen u polove permanentni magnet visine $l_m/2$ i namot za magnetiziranje B. Očito je pri tome stroju presjek neiskorišten jer se ugradnjom namota B (umjesto A na sl. 7.a)

oslobodio znatan iznos presjeka. Na slici 7.c, koja prikazuje istosmjerni stroj s permanentnim magnetima s povoljnijim konstrukcijskim rješenjem, taj je prostor iskorišten da se poroširi jezgra pola, tj. permanentni magnet kako bi se dobio magnet veće ukupne energije zbog njegova većeg volumena. Dalje, na slici 7.c prošireni su nešto i presjeci putova magnetskom krugu, i to jarmu statora i rotora (povećano h_{js} i h_{jr}), te eventualno nešto prošireni zubi armature, dakle u dijelu magnetskog kruga od mekih feromagnetika. Razlog je tome izbjegavanje jakog zasićenja magnetskih putova prilikom magnetiziranja, tj. omogućivanje da se magnetiziranjem postigne visoka vrijednost remanentne indukcije B_r, što se uz jače zasićeni feromagnetni dio magnetskog kruga ne bi dalo ostvariti.

8.1.2. Izbor radne točke istosmjernog stroja s permanentnim magnetima

Nakon načelnog prikaza ponašanja realnog istosmjernog stroja i utjecaja problema koji iskrsavaju unošenjem permanentnih magneta u magnetski krug stroja, te utjecaja tereta na, u krajnjoj konzekvenciji, magnetski tok, ostaje otvoreno više pitanja: kako izvesti magnetiziranje, demagnetiziranje i stabilizaciju, te prema kojim kriterijima i kako odabrati radnu točku. Pokušajmo odgovoriti.

Magnetiziranje se obavlja protjecanjem istosmjernom strujom s približno trostrukim iznosom jakosti polja zasićenja prema iznosu koercitivne sile, $H_z \doteq 3H_c$ [L 31] (vidi sl. 2.). Pri tome moraju presjeci željeza stroja (izvan permanentnih magneta) biti tako dimenzionirani da u njima pri magnetiziranju ne bude prevelikih padova magnetskog napona. Ako, dakle, nema prevelikih zasićenja, remanentna će indukcija u magnetima B_r biti dovoljno visoka (vidi sl. 8). Trajanje magnetizacije je kratko, 2–3 sekunde. Nakon magnetiziranja (poslije smanjenja struje u namotu za magnetiziranje), kao što je prije objašnjeno, uspostavi se u magnetskom krugu stroja stanje koje odgovara onome u permanentnim magnetima označenome točkom P'_0. Zatim se pristupa stabilizaciji, koja se dade izvesti protjecanjem namota za magnetiziranje, i to istosmjernom ili izmjeničnom strujom. Izmjenična struja ima neke prednosti, što će biti malo poslije obrazloženo. Sad nas zanima kako odrediti jačinu polja za stabilizaciju ΔH_{mmax}, pa prema njemu nije teško izračunati ni iznos odgovarajuće struje:

$$\Delta H_{mmax} = \frac{\Theta_{st}}{l_m} \tag{16}$$

$$I_{st=} = \frac{\Delta H_{mmax} \cdot l_m}{w_{mag}}, \tag{17}$$

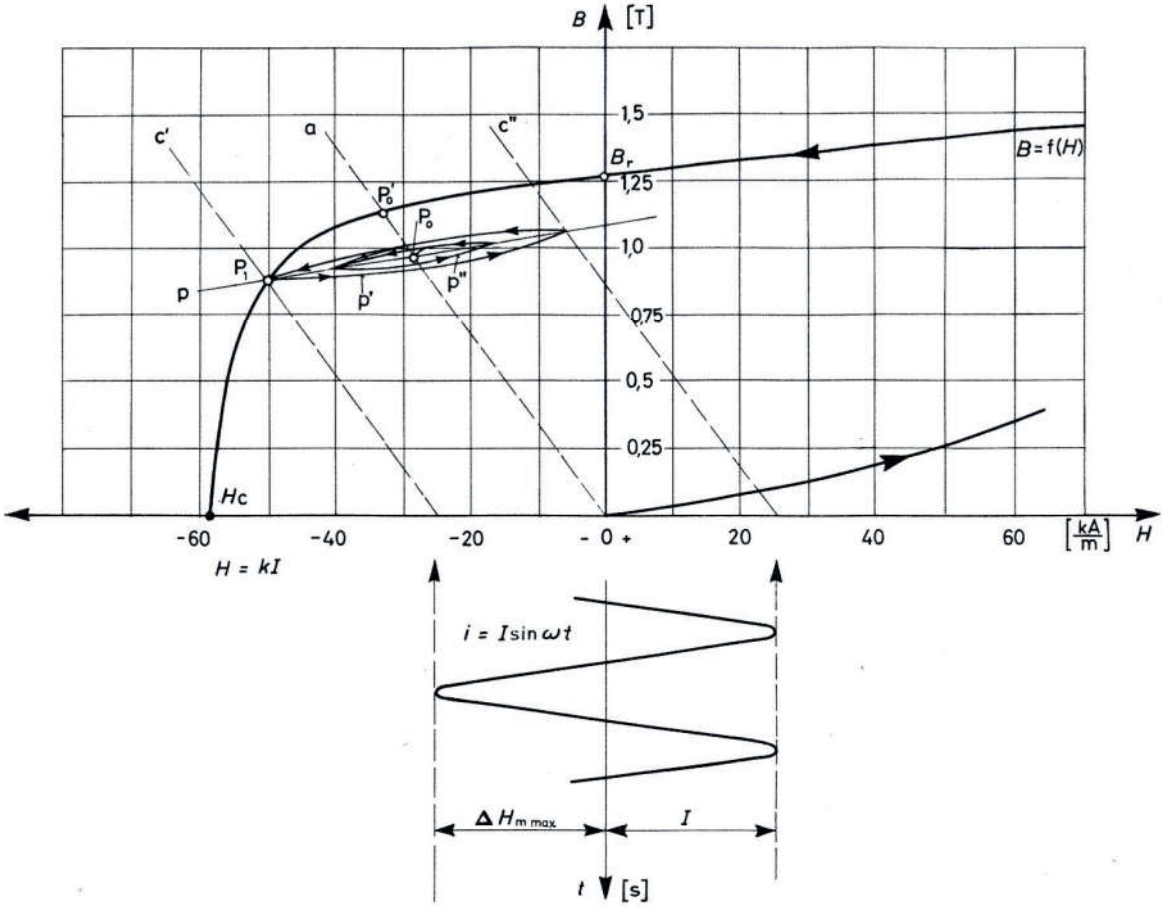
odnosno:

$$I_{st\sim} = \frac{\Delta H_{mmax} l_m}{\sqrt{2}\, w_{mag}}. \tag{18}$$

U izvedenim jednadžbama je s l_m(m) označena dužina permanentnih magneta u paru polova, Θ_{st} (A) je potrebno protjecanje para polova za stabiliziranje, w_{mag} (1) broj zavoja namota za magnetizaciju na paru polova, a $I_{st=}$ i $I_{st\sim}$ su efektivne vrijednosti istosmjerne i izmjenične struje za stabiliziranje. Koliki mora biti iznos struje za stabilizaciju, ovisi o veličini, vrsti i namjeni stroja, te preopterećenju koje on može doživjeti. Zato i literatura daje nešto različite podatke. Prema [L 37] struje stabilizacije treba uzeti prema magnetskom naponu reakcije armature V_{zas} (vidi odjeljak 4.3), i to V_{zas}, koji bi u stroju izazvala četverostruka struja armature. U [L 49] dan je podatak za veću vrijednost (V_{zas} prema 7–9 puta većoj struji preopterećenja od nazivne) uz napomenu da motori napajani iz izmjenične mreže uz pretvorbu u ispravljačkim tiristorskim mostovima zahtijevaju veću vrijednost stabilizacijskog protjecanja. Nije naodmet upozoriti na to da pri stabilizaciji izmjeničnim strujama njihova efektivna vrijednost mora biti $\sqrt{2}$ puta manja nego pri stabilizaciji istosmjernim strujama, tj. maksimalne vrijednosti struja treba da budu jednake – vidi relacije (17) i (18). Važnost točnog postupka posebno raste kad se gradi više jednakih strojeva koji moraju imati jednake (što sličnije) vanjske karakteristike: $U = f(I_a)$ za generator i $n = f(I_a)$ za motor. Zbog tolerancija u izradi i nehomogenosti materijala teško je pri magnetiziranju postići potpuno jednake vrijednosti remanentne indukcije B_r, što se donekle može izjednačiti pažljivim izborom struja stabilizacije tako da se pri pažljivom postupku postižu odstupanja u indukcijama u zračnom rasporu B_δ ne veća od 0,5 %.

Ostaje još pitanje razlika stabilizacije istosmjernim ili izmjeničnim protjecanjem. Uvodno recimo da permanentni magnet gubi (djelomično) svoja svojstva vremenski konstantnih vrijednosti (B_{mo} i H_{mo}) iz tri razloga. Prvi je djelovanje struja što je već protumačeno. Drugi razlog su (velike) temperaturne razlike, ako ih stroj doživljava tokom svog trajanja, što u normalnim uvjetima razlika nastalih grijanjem i hlađenjem stroja u pogonu i nije tako. Treće je vremensko starenje magneta, što obično ne čini veliki kvantitativni gubitak svojstava, ali je neugodno zbog promjene vanjskih karakteristika, posebno motora, kojima zbog tog slabljenja svojstava s vremenom raste brzina vrtnje. Stabilizacija izmjeničnim protjecanjem ima tu prednost što se magneti stabiliziraju i »magnetski« i vremenski (umjetno starenje), a povoljno djeluje i na toplinsko stabiliziranje. Međutim, stabilizacijom istosmjernim protjecanjem proces se stabilizacije ograničava samo na prvi razlog, bez utjecaja na vremensko (i eventualno) toplinsko starenje. Na slici 8. prikazan je u principu postupak stabilizacije izmjeničnim protjecanjem. Namotu za magnetiziranje narinut je izmjenični napon tako da njime teče izmjenična struja $i = I\sin wt$. Maksimalna vrijednost te struje mora dati željenu jačinu polja stabilizacije ΔH_{mmax}. Budući da su vrijednosti maksimalne struje i ΔH_{mmax} proporcionalne, obje su veličine ucrtane u vremenskom prikazu stabiliziranja na donjem dijelu slike 8. jednake, ali, dakako, u različitim mjerilima. Pravac magnetiziranja »a« mijenja s vremenom položaj, kako se mijenja struja, u granicama krajnjih položaja pravaca c′ i c″ na slici. Za to vrijeme kreće se radna točka magneta po uskoj petlji histereze (na slici zbog vidljivosti nacrtana mnogo širom od stvarne). Nakon kraćeg vremena smanjuje se postepeno struja uzbuđivanja do vrijednosti $i = 0$. Za to vrijeme primiču se

krajnje radne točke tvoreći sve uže petlje histereze, tako da kad struja iščezne, ostane radna točka P_0 na presjecištu pravaca »a« i »p«. Cijeli se postupak stabilizacije također provodi u relativno kratkom vremenu od 2–3 sekunde. U pogonu će se radna točka pomicati ulijevo od P_0 ovisno o struji opterećenja.



Sl. 8. Prikaz postupka magnetiziranja i stabiliziranja permanentnih magneta u istosmjernom stroju: P_0 – radna točka u praznom hodu nakon završetka stabiliziranja, p′, p″ – povratna karakteristika (petlja) pri maksimalnoj i smanjenoj amplitudi uzbudne struje, p – pravac kojim se zamjenjuje vrlo uska petlja unutrašnje povratne karakteristike

Želimo li potpuno razmagnetizirati stroj, npr. prilikom demontaže rotora, namotom za magnetiziranje narine se istosmjerna struja negativnog smjera, i to takva da odgovara jačini polja približno jednakog koercitivnoj sili H_c. To je od 1/4 do 1/3 vrijednosti struje magnetiziranja. Razmagnetiziranje traje približno jednu sekundu. Na natpisnoj pločici stroja obavezno je naznačena vrijednost otpora namota za magnetiziranje, te vrijednosti struja i trajanja procesa magnetiziranja, stabiliziranja i razmagnetiziranja.

Dosad smo razmotrili pitanje iznalaženja radne karakteristike istosmjernog stroja predočene pravcem »p« na slici 8, i to s gledišta stabilnosti (konstantnosti) te karakteristike. Ostalo je otvoreno pitanje određivanja te iste karakteristike s gledišta optimalnog iskorištenja permanentnih magneta. Pri tome nećemo ulaziti

u vrlo složeno pitanje kako se dimenzionira i stroj i magneti da se optimalno iskoristi cijeli volumen stroja. Nije teško uvidjeti da će permanentni magneti biti optimalno iskorišteni kad je radna točka tako odabrana da magneti rade u području svoje maksimalne energije. Energija magneta dana je u principu poznatim izrazom (V = volumen):

$$W = \frac{1}{2} \int_V HB\mathrm{d}V. \tag{19}$$

Zamislimo magnetsku energiju (izvan permanentnih magneta) cijelu prikupljenu u zračnom rasporu, i to povećanome zračnom rasporu δ' koji reprezentira cijeli magnetski otpor kruga:

$$W_\delta = 0{,}5\ H_\delta B_\delta (S_\delta 2\delta'). \tag{20}$$

Pri tome je W_δ energija skupljena u zračnom rasporu, a S_δ presjek zračnog raspora. Uvrstimo li vrijednost $2\delta' H_\delta$ iz izraza (13) u (20), izlazi:

$$W_\delta = 0{,}5 \cdot 2V'_\delta B_\delta S_\delta.$$

Podijelimo li lijevu i desnu stranu volumenom magneta $S_\mathrm{m} l_\mathrm{m}$ (S_m = presjek magneta), dobivamo:

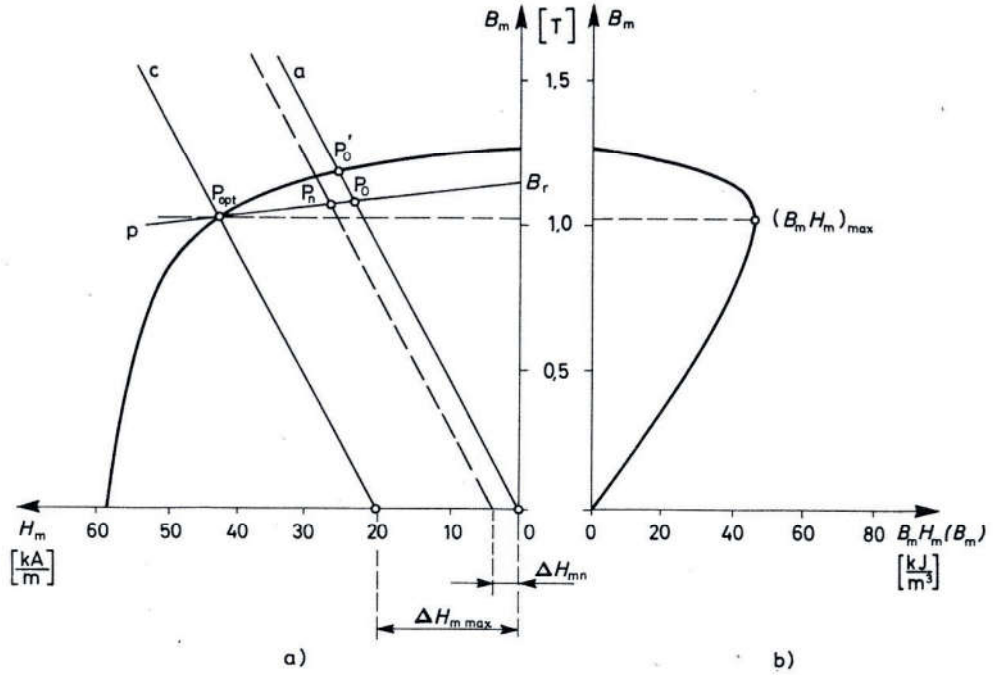
$$\frac{W_\delta}{S_\mathrm{m} l_\mathrm{m}} = \frac{0{,}5 \cdot 2V'_\delta B_\delta S_\delta}{S_\mathrm{m} l_\mathrm{m}}$$

i uz pomoć jednadžbi (8) i (14) izlazi konačno:

$$\frac{W_\delta}{S_\mathrm{m} l_\mathrm{m}} = 0{,}5\ B_\mathrm{m} H_\mathrm{m}. \tag{21}$$

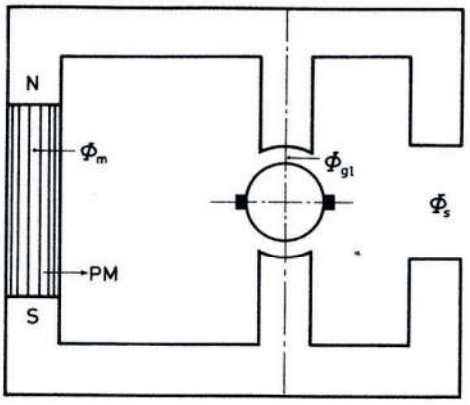
Umnožak $B_\mathrm{m} H_\mathrm{m}$ iz jednadžbe (21) izražava dvostruku vrijednost energije po jedinici volumenta trajnih magneta koju ti trajni magneti daju (za stroj bez rasipnog toka) za stvaranje magnetskog polja u zračnom rasporu. Uzme li se u obzir rasipni tok Φ_s, dijeli se ta energija u omjeru $\Phi_\mathrm{gl} : \Phi_\mathrm{s}$ na korisnu u zračnom rasporu i izgubljenu u rasipnim putovima. Iz ovoga kratkog razmatranja izlazi da radnu točku (B_m, H_m) treba tako postaviti da istosmjerni stroj s permanentnim magnetima radi pri $(B_\mathrm{m} H_\mathrm{m})_\mathrm{max}$. To zapravo znači da radna točka mora ležati na presjecištu pravca »p« s krivuljom $B_\mathrm{m}(H_\mathrm{m})$ (vidi sl. 8), tj. prilikom stabilizacije magneta treba zapravo odabrati toliku stabilizacijsku struju da točka P_1 na slici 8. leži upravo u točki gdje produkt $B_\mathrm{m} H_\mathrm{m}$ ima maksimalnu vrijednost. Na slici 9. prikazan je put grafičkog određivanja te točke. Iz krivulje $B_\mathrm{m}(H_\mathrm{m})$ na slici 9.a. najprije se množenjem vrijednosti indukcija u magnetu i pripadnih jačina polja izračuna krivulja $(B_\mathrm{m} H_\mathrm{m}) = \mathrm{f}(B_\mathrm{m})$ na slici 9.b. Za vrijednost $(B_\mathrm{m} H_\mathrm{m})_\mathrm{max}$ pronalazi se točka P_opt na slici 9.a. Točkom P_opt povuče se pravac »c« paralelan s pravcem »a« koji ide točkom P'_0 i ishodištem krivulje $B_\mathrm{m}(H_\mathrm{m})$. Odsječak na apscisi ΔH_mmax ujedno je mjera za potrebnu stabilizacijsku struju, pa magnete treba stabilizirati strujom iz jednadžbe (17) ili (18), već prema tome provodi li se stabilizacijski postupak istosmjernom ili izmjeničnom strujom. Konačno se dobiva točka

praznog hoda P_0, kao presjecište pravaca »p« i »a«, i iz nje stvarna indukcija u magnetima B_m u praznom hodu stroja. Dalje se može dobiti i radna točka indukcije u magnetu za nazivni teret stroja, tako da se za fiktivni magnetski napon V_{zas} uzrokovan reakcijom armature pri nazivnoj struji stroja izračuna ΔH_{mn}, tj. jakost polja kojim reakcija armature demagnetizira stroj, i da se, iz odgovarajuće točke na apscisi slike 9.a povuče pravac paralelan s pravcem »a«. Na slici je taj pravac crtkano izvučen i gdje on siječe pravac »p«, tu leži točka P_n, kojoj je ordinata vrijednost indukcije u magnetima pri nazivnom opterećenju stroja.



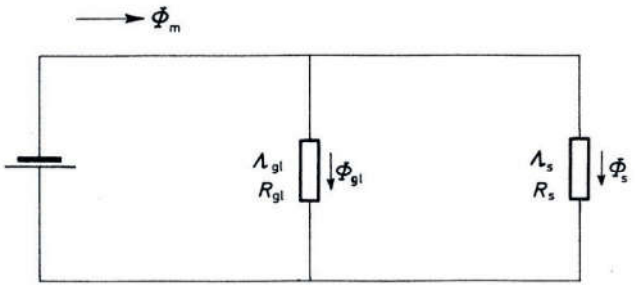
Sl. 9. Određivanje optimalne radne točke za istosmjerni stroj s permanentnim magnetima

Prema dosadašnjem izlaganju, dade se istosmjernom stroju s permanentnim magnetima na dosta jednostavan način ostvariti indukcija, pa onda i indukcija u zračnom rasporu prema jednadžbi (10). Međutim, računanje indukcije u zračnom rasporu otežano je činjenicom da je faktor σ različit za svaki teret. Pokažimo o



Sl. 10. Osnovni prikaz magnetskog kruga istosmjernog stroja s permanentnim magnetima: PM – permanentni magnet

čemu je riječ. Na slici 10. nacrtan je u principu magnetski krug istosmjernog stroja s permanentnim magnetima. Permanentni magnet PM izvor je magnetskog toka Φ_m, od čega jedan dio kao glavni magnetski tok Φ_{gl} prolazi zračnim rasporom i ulančuje armaturni namot, a drugi prolazi mimo armature i zatvara se kao rasipni tok Φ_s. Budući da je permanentni magnet izvor magnetskog napona, možemo istosmjerni stroj s permanentnim magnetom prikazati i nadomjesnom (magnetskom) shemom na slici 11, koja odgovara i slici 10. Reći ćemo da se glavnome



Sl. 11. Nadomjesna shema magnetskog kruga sa slike 10.

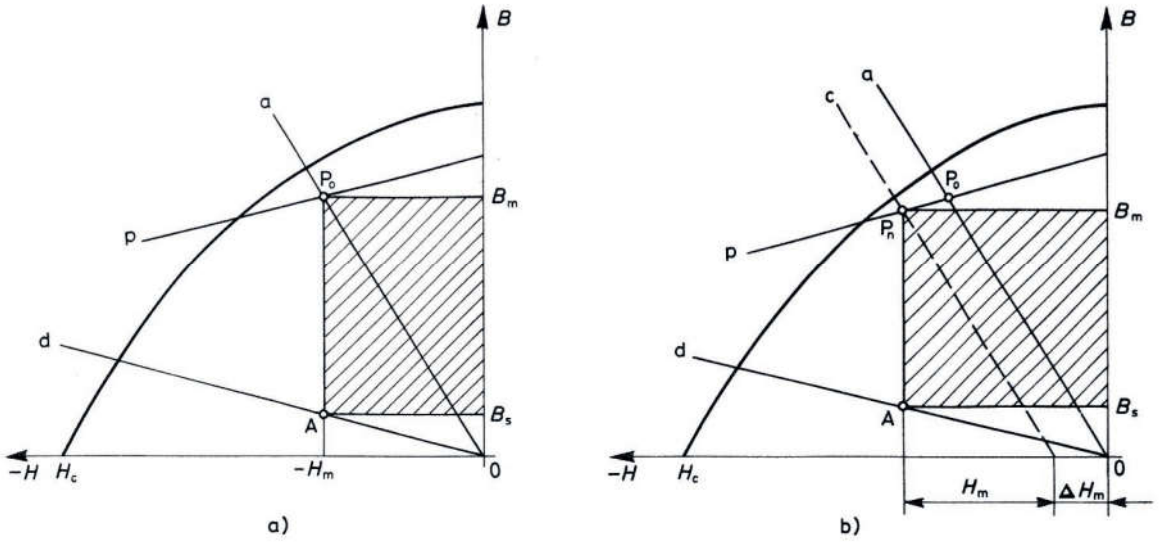
magnetskom toku Φ_{gl} suprotstavlja magnetski otpor R_{gl}, odnosno da ga provodi magnetska vodljivost Λ_{gl}, a jednako tako da se rasipnome magnetskom toku Φ_s suprotstavlja magnetski otpor R_s, odnosno da ga provodi magnetska vodljivost Λ_s. Mijenja li se opterećenje stroja, mijenja se i glavni magnetski tok Φ_m, pa i njegovi dijelovi Φ_{gl} i Φ_s. Važna je konstatacija da se i magnetski otpor R_{gl} ili vodljivost Λ_{gl} mijenjaju s teretom stroja zbog reakcije armature, ali se rasipni magnetski otpor R_s i rasipna magnetska vodljivost ne mijenjaju i ostaju konstantni. Posljedica je da se raspodjela magnetskog toka Φ_m na Φ_{gl} i Φ_s stalno mijenja s teretom, pa je i faktor σ, prema jednadžbi (11), stalno promjenljiv i raste s teretom, što se vidi izvedemo li iz (11):

$$\sigma = 1 + \frac{\Phi_s}{\Phi_{gl}} = 1 + \frac{R_{gl}}{R_s}.$$

Očito je da će promjena σ biti to veća što je promatranome istosmjernom stroju jači utjecaj reakcije armature. I tad je proračun indukcije B_δ u zračnom rasporu stroja pri različitim teretima bitno otežan, a s njime i primjer ustanovljavanja vanjskih karakteristika stroja. Međutim, može se na jednostavan grafički način pronaći indukcija u zračnom rasporu B_δ pri svakom opterećenju. Ne ulazeći u dugotrajna objašnjavanja, pokazan je postupak na slici 12. Pravac »a« na slici 12.a karakterizira otpor (ili vodljivost) glavnoga magnetskog kruga stroja u praznom hodu, a pravac »d« otpor (ili vodljivost) rasipnoga magnetskog kruga, već prema tome promatra li se omjer sa strane apscise ili sa strane ordinate. Točka P_0 na stabiliziranom pravcu »p« karakterizira radnu točku u praznom hodu. Prema tome je površina trokuta P_0B_mO numerički jednaka ukupnoj magnetskoj energiji koju odaju magneti, jer je B_mH_m jednako dvostrukoj magnetskoj energiji što je sadrže magneti. Budući da je H_m (ili $-H_m$) jakost polja u magnetima, to je B_sH_m

jednako dvostrukoj magnetskoj energiji koja se utroši na rasipno magnetsko polje, a $(B_m - B_s)H_m$ je jednako dvostrukoj magnetskoj energiji koja se troši na glavno magnetsko polje. Iz toga se lako zaključuje za indukciju u zračnom rasporu:

$$B_\delta = (B_m - B_s)\frac{S_m}{S_\delta}. \tag{22}$$



Sl. 12. Određivanje korisne magnetske energije istosmjernog stroja s permanentnim magnetima: a) u praznom hodu stroja; b) za stroj u pogonskome opterećenom stanju

Nema nikakva razloga da se to razmišljanje ne protegne na opću sliku stroja s opterećenjem gdje je konstrukcija za neko opterećenje izvedena na slici 12.b. Prema tome, za stroj poznatih svojstava mogu se uvijek grafički konstruirati vrijednosti B_m i B_s, i odatle izračunati B_δ po relaciji (22).

8.1.3. Svojstva istosmjernih strojeva s permanentnim magnetima

Istosmjerni stroj uzbuđen permanentnim magnetima ima praktički čvrstu, nepromjenljivu i o zbivanjima u stroju nezavisnu uzbudu, pa su mu svojstva približno jednaka onima nezavisno uzbuđenog stroja s klasičnom elektromagnetskom uzbudom. Takve su mu i vanjske karakteristike, što znači da je npr. takvu stroju nemoguće postići svojstva serijski uzbuđenog stroja.

Kad uspoređujemo svojstva klasičnoga nezavisno uzbuđenog stroja i onoga uzbuđenog permanentnim magnetima, ima još razlika u tome što stroj uzbuđen permanentnim magnetima ne može raditi s oslabljenom uzbudom. To znači da se u generatorskom radu ne može raditi ni s raznovrsnom uzbudom niti mu se dade korigirati uzbuda kako bi se održao konstantan napon, a u motorskom radu otpada mogućnost upravljanja brzine vrtnje slabljenjem polja. Budući da se

istosmjerni stroj s permanentnim magnetima izuzetno rijetko upotrebljava kao generator (baš zbog izostanka mogućnosti podešavanja uzbude), zanimljivo je razmotriti karakteristike samo u motorskom pogonu.

Vanjska će karakteristika motora $n\ (I_a)$ biti objema izvedbama motora slična. Zanimljivo je pitanje stabilnosti brzine vrtnje motora i tvrdoće vanjske karakteristike. U tom cilju preuredimo malo već poznati opći izraz za brzinu vrtnje istosmjernog motora:

$$n = \frac{U - I_a R_a - \Delta U_č}{k'_e \Phi_{gl}} = \frac{U - I_a R_a - \Delta U_č}{k'_e (\Phi_{glo} - \Delta\Phi)}. \tag{23}$$

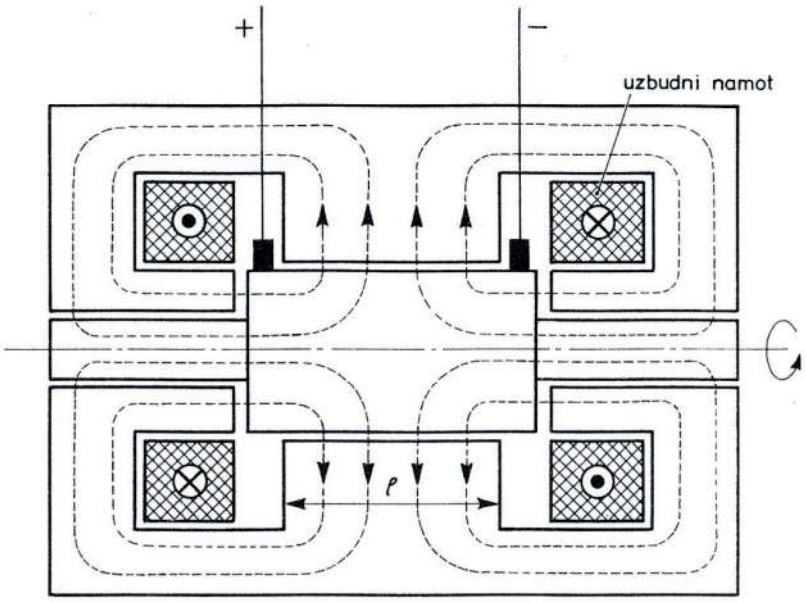
Tu je sad Φ_{glo} glavni magnetski tok u praznom hodu (bez armaturne struje), a $\Delta\Phi$ je gubitak (promjena) glavnoga magnetskog toka uzrokovana strujom armature. Promatrajući brojnik izraza (23), nema nikakvih razlika u obje varijante, pa je ocjenu razlike vanjske karakteristike potrebno donijeti analizom promjene veličine $\Delta\Phi$, tj. promjene magnetskog toka. Znamo da se svakome nezavisno uzbuđenom stroju glavni tok Φ_{gl} mijenja pod teretom zbog tri osnovna razloga. Prvi je u tome što reakcija armature na poznati način smanjuje glavni tok. Drugi je razlog eventualni pomak četkica iz neutralne zone, koji, s jedne strane, neznatno smanjuje glavni tok zbog integracije tog toka s granicama izvan neutralne zone, a, s druge strane, znatnije utječe na glavni tok uzdužnim protjecanjem dijela zavoja armature obuhvaćenih dvostrukim kutom pomaka četkica, što može i smanjivati i povećavati glavni magnetski tok, već prema tom u kojem su smislu pomaknute četkice. Treći je razlog u tome što struja u svicima koji komutiraju pri natkomutaciji ili potkomutaciji djeluje slično kao pomak četkica (i kad su četkice u neutralnoj zoni) jer se nulta vrijednost struje komutacije ne postiže točno u neutralnoj zoni. Drugi razlog, pomak četkica, ne djeluje kad ga nema, bez obzira na vrstu uzbude, a kad je prisutan, djeluje jednako na stroj s obje varijante uzbude. Tako je i s trećim razlogom, nepravocrtnom komutacijom, jer se fizikalno svodi na drugi razlog. Dakle, s gledišta tih dvaju uzroka promjene glavnoga magnetskog toka ne treba očekivati razliku u vanjskim karakteristikama istosmjernih strojeva, onoga klasično uzbuđenog ili onoga s permanentnim magnetima. Kod prvog razloga, klasične reakcije armature, stvar je nešto drukčija. Utjecaj rekacije armature nešto je manji pri uzbudi s permanentnim magnetima, zbog većega magnetskog otpora magnetskog toka motora s permanentnim magnetima, od onoga klasično uzbuđenog stroja pa i zbog manjeg zasićenja motora s permanentnim magnetima, te je $\Delta\Phi$ klasičnim motorima nešto veće nego motorima s permanentnim magnetima. Zbog toga motori s permanentnim magnetima imaju nešto stabilniju (mekšu) vanjsku karakteristiku.

Važno je upozoriti na još jednu pogonsku prednost motora s permanentnim magnetima. Njima je uzbuda konstantna, tj. ne mijenja se s temperaturom motora, a klasičnome se nezavisno uzbuđenom motoru povećava otpor uzbudnog namota u toplome pogonskom stanju, pa mu se zbog promjene uzbudne struje mijenja magnetski tok i s njime brzina vrtnje, koja raste kako se motor zagrijava.

Želimo li brzinu vrtnje držati konstantnom, treba klasičnom motoru mijenjati uzbudu (upravljati) ovisno o promjeni temperature uzbudnog namota. Kod motora s permanentnim magnetima otpada potreba za tim. Dalje, motor s permanentnim magnetima nema gubitaka zbog uzbude, a klasični motor ima stalno te gubitke, pa mu je i korisnost (η) lošija u usporedbi s onom u motora s permanentnim magnetima. Zbog manjih gubitaka motor s permanentnim magnetima lakše je i ohladiti od klasičnoga, što ima posebno značenje za zatvorene motore s vanjskim (površinskim) hlađenjem. I konačno, motor s permanentnim magnetima ima manje stezaljki i dovodnih žica (posebno važno za pogon dizalica), te manje upravljačke aparature, i zato manje osjetljivih mjesta za potencijalne kvarove, tj. ima veću pouzdanost. Dakako, motor s permanentnim magnetima neće nikad doživjeti pobjeg.

8.2. Unipolarni stroj

Unipolarni stroj je istosmjerni stroj bez kolektora. Naziv unipolarni mogli bismo prevesti s jednopolni, ili stroj sa svega jednim polom. Uzdužni presjek takvoga stroja prikazuje shematski slika 1. Uzbudni namoti proizvode tok, koji se zatvara kroz osovinu, jaram i rotor. Na slici 1. crtkane nam linije pokazuju silnice



Sl. 1. Presjek klasičnoga unipolarnog stroja

koje simbolički predočuju taj tok. Namota armature nema, nego je tijelo rotora ujedno i jedini vodič armature. Budući da je zračni raspor δ uzduž cijelog oboda rotora konstantne širine, to po cijelom obodu rotora vlada konstantna indukcija B, s tim što je smjer polja na svakome mjestu približno okomit na površinu rotora.

Vrtimo li vanjskom silom rotor konstantnom brzinom vrtnje n, inducirani napon na krajevima rotora iznosi:

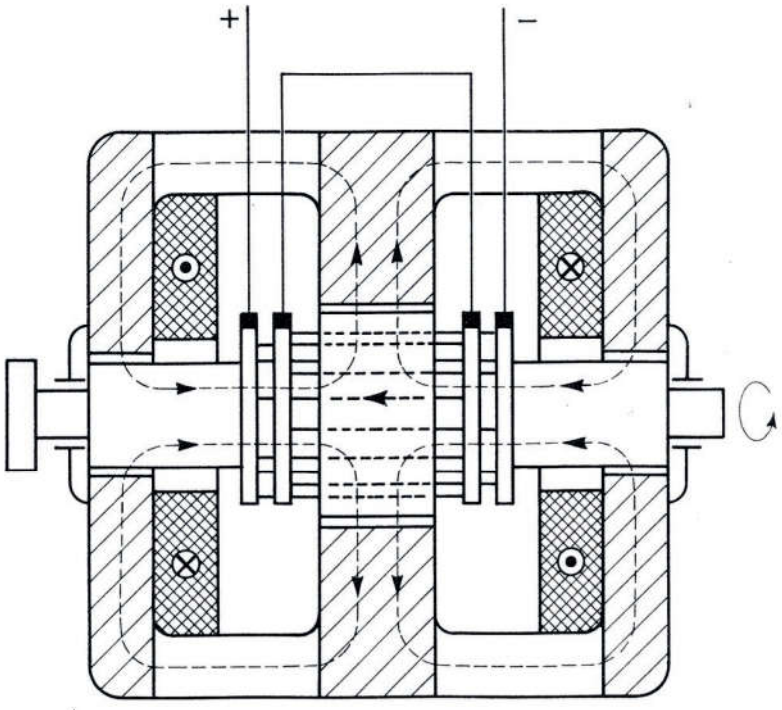
$$E = Blv = Bl \frac{D_a \pi n}{60},$$

tj.:

$$E = \frac{\Phi_{gl} n}{60}. \tag{1}$$

Četkice na krajevima rotora odvode taj napon na stezaljke. To je osnovna slika unipolarnog stroja. Tijelo rotora je od željeza ili je na željeznu jezgru navučen jedan relativno tanak plašt od bakra, kako bi se smanjili gubici. Takav unipolarni generator može davati velike struje, što se odmah vidi iz dimenzija vodiča (rotora). Glavna mu je mana u tome što i u najvećim izvedbama daje niske napone. Takva jedinica može davati od 6 do 40 V, uz uobičajene struje od 5 000 do 60 000 A.

Upotreba takva generatora vrlo je ograničena zbog niskog napona. Najviše se upotrebljava u postrojenjima za elektrolizu, jer osim toga što osnovni parametri odgovaraju zahtjevima elektrolize nema uopće valovitosti napona, a to se razabire iz osnovne fizikalne slike.



Sl. 2. Dvostruka izvedba unipolarnog stroja

Naponske mogućnosti unipolarnoga generatora mogu se povećati tako da se napravi dvostruka izvedba. Shematski uzdužni presjek takve izvedbe je na slici 2. Razlika od prije opisane izvedbe je u tome što kao namot ne služi više samo tijelo rotora nego su na to tijelo u utore ugrađena dva kaveza od bakra, i to tako da

svaki drugi štap po obodu pripada drugom kavezu. Kavezi su na krajevima zatvoreni prstenima, a izolirani su međusobno i prema masi. Sad se mogu naponi dvaju kaveza spojiti u seriju, kako to prikazuje slika 2. Na taj se način kod najvećih jedinica postižu naponi čak do 200 V. Najveći su se unipolarni strojevi uz niži napon gradili za struje do gotovo 300 000 A (L 5, 31).

Klasični unipolarni stroj, kratko prikazan ovim izlaganjem, zapravo se prestao graditi već davno, a danas se u manjim jedinicama upotrebljava još samo u mjerne svrhe, tako da se ovog trena ne vidi pravi uzrok zašto ga nismo jednostavno izostavili. Tome je razlog što je zapravo on doživio u nedavnoj prošlosti svoj povratak na tehničku scenu. Doduše, ne više u klasičnom obliku i s klasičnom upotrebom, već u supravodljivoj izvedbi kao stroj vrlo velike snage. Zato smo ga ovdje i obradili, s time što će o njemu biti još dosta riječi u devetom poglavlju, gdje se razmatraju granične snage stroja.

8.3. Metadini

8.3.1. Općenito o metadinima

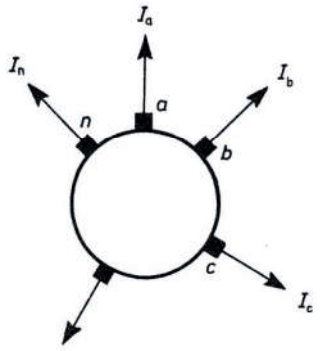
Kad bismo metadine nekako pokušali nazvati imenom koje odgovara našem jeziku, nazvali bismo ih »međučetkičnim strojevima«, što vrlo loše zvuči, ili istosmjernim strojevima s četkicama u po volji odabranom položaju na obodu rotora ili kolektora – što je predugačko. Ali ti nam neprikladni nazivi otkrivaju osnovni način na koji su metadini nastali, pa smo ih zato i spomenuli.

Razmatranje ćemo početi ovom predodžbom: položimo dvije ili više četkica u bilo koje položaje na kolektoru istosmjernog stroja s normalnim namotom armature koja se vrti, te ako u rotoru ima bilo kakva magnetskog toka, mjerit ćemo među četkicama neki napon. Zamislimo da smo promatranom stroju oduzeli stator sa svim polovima i pripadnim namotima, tj. da smo u promatranje uzeli samo rotor s normalnim armaturnim namotom i kolektorom s n četkica, kao na slici 1. Pretpostavimo da naš rotor slobodno lebdi kao da je u beztežinskom stanju i da ne djeluju nikakva mehanička trenja. Dalje, neka se armatura vrti konstantnom brzinom i neka četkicama teku struje u armaturu ili iz nje, tj. pozitivne ili negativne u matematičkom smislu. Označimo te struje s I_a, I_b ... I_n prema oznakama četkica na slici 1. Rezultantno polje tih struja u armaturi inducira različite napone među različitim četkicama. Tako će se među nekim četkicama, recimo označenima s d i l, inducirati napon:

$$E_{dl} = \sum_{x=a}^{n} C_{xdl} I_x. \tag{1}$$

Pri tome su C_{xdl} konstantne veličine ovisne o konstrukcijskim podacima namota i stroja, te o položaju četkica d i l, a indeks x označava vezu sa strujom koja izaziva uzbudu. Pretpostavimo li npr. da takav rotor umetnemo u neki stator s polovima (bez uzbudnih struja), mijenja se vrijednost induciranog napona samo zbog promjene konstante C_{xdl} nastale zbog promjene magnetske vodljivosti prostora.

Ako razmotrimo mogućnosti koje nam takav stroj pruža, dolazimo brzo do zaključka da on u takvoj izvedbi može djelovati samo kao pretvarač električne energije u električnu energiju drugog napona. Razlozi su ovi: generatorski ili motorski rad istosmjernog stroja karakterizira stvaranje okretnog momenta ili protumomenta vrtnje na osovini. Da se moment stvori, potrebno je čvrsto hvatište u prostoru na koje bi on djelovao. To hvatište može biti u prostoru ili čvrsti permanentni magnet ili čvrsti namot kojeg je polje, kad njime protječe struja, nepomično u prostoru. Zato je naša slika, zapravo, osnovni prikaz metadin-pretvarača.



Sl. 1. Skica armature (rotora) istosmjernog stroja s n slobodno raspoređenih četkica na kolektoru

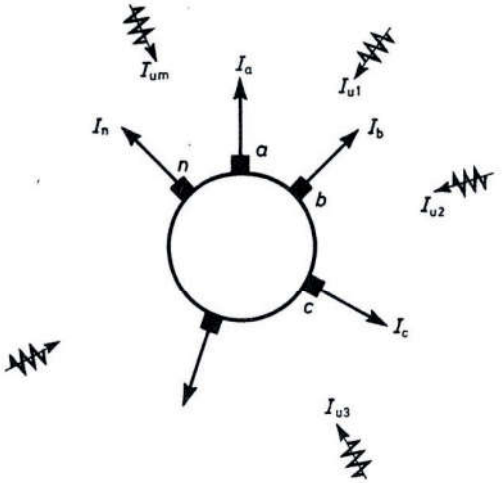
Da napravimo korak dalje od principne fizikalne slike metadin-pretvarača, do metadin-motora ili metadin-generatora, vratimo se na početnu sliku i dodajmo m svitaka u prostoru dobro učvršćenih i tako razmještenih da nadomještaju stator tako zamišljenog stroja. U svicima neka teku uzbudne struje I_{u1}, I_{u2} ... I_{um}. Takav raspored prikazuje slika 2. Tad će i magnetska polja uzbudnih svitaka inducirati napone u armaturnom namotu, tj. inducirat će se naponi među bilo kojim dvjema četkicama na kolektoru. U toj će novoj situaciji inducirani napon između četkica, recimo opet d i l, biti:

$$E_{dl} = \sum_{x=a}^{n} C_{xdl} I_x + \sum_{y=1}^{m} C_{uydl} I_{uy}. \tag{2}$$

Tu je C_{uydl} (uz konstantnu brzinu vrtnje!) konstantna veličina u kojoj su na odgovarajući način sadržani konstrukcijski i drugi podaci rotora i odgovarajućega y-tog uzbudnog namota te njegov položaj prema rotoru, odnosno četkicama d i l. Tako predočenom stroju struje u armaturi s tokovima statora, s jedne strane i struje u uzbudnim namotima s tokovima zbog armaturnih struja, s druge strane, tvore ukupni moment, koji ima određeni iznos i taj samo slučajno može biti jednak nuli, tj. bit će jednak nuli kad je superpozicija svih momenata stroja takva da se oni međusobno kompenziraju. Vrti li tako nastali moment rotor stroja u smjeru svojeg djelovanja, riječ je o metadin-motoru. Tjeramo li rotor silom protiv djelovanja tog momenta, riječ je o metadinskom generatoru.

Zamislimo li da se uzbudni namoti nalaze smješteni na statoru od željeza, pa da u njega umetnemo promatrani rotor, slika se u principu ne mijenja, samo što će se na odgovarajući način promijeniti vrijednosti za C_{uydl} za promatrani par četkica, i to zbog promjene magnetske vodljivosti prostora u kojem se rasprostiru promatrana magnetska polja.

Time je postavljena osnovna fizikalna slika metadinskih strojeva. Na osnovi takve fizikalne predodžbe konstruirano je do danas mnogo vrsta metadinskih strojeva, kao što su amplidin, autodin, rototrol, metadin-pretvarač itd. Svim metadinskim strojevima zajedničko je da komutiraju u vrlo nepovoljnim uvjetima jer im se četkice nalaze i u položajima gdje vlada znatni magnetski tok, pa se



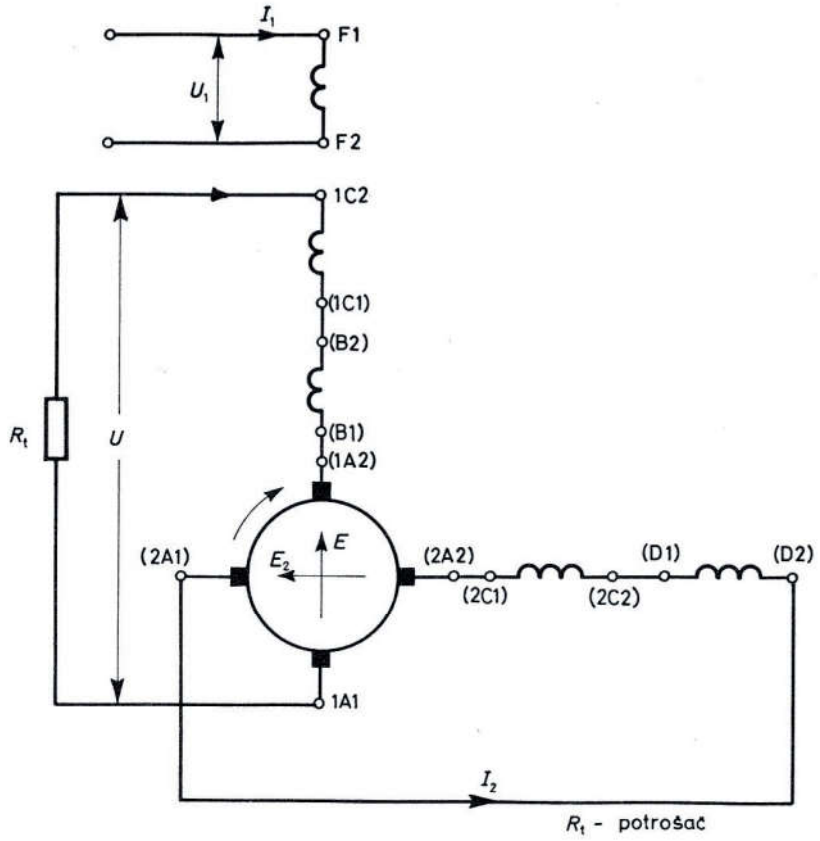
Sl. 2. Skica istosmjernog stroja s *n* slobodno raspoređenih četkica kolektora i *m* slobodno raspoređenih namota na statoru

mogu u principu graditi samo za vrlo male snage. Budući da su se gotovo svi metadinski strojevi upotrebljavali u reguliranim elektromotornim pogonima, to im i nije bila najveća mana. Međutim, s pojavom poluvodičke tehnike njihove funkcije u reguliranim pogonima preuzeli su elektronički regulatori, i oni su gotovo iščezli iz prakse. Izuetak je amplidin – posebno strojno pojačalo, koje se zbog određenih tehničkih svojstava zadržalo u nekim pogonima. Zato ćemo od svih metadinskih strojeva obraditi samo amplidin.

8.3.2. Amplidin, sastav i princip djelovanja

Amplidin je istosmjerni rotacioni stroj koji služi kao pojačalo snage, zbog čega je i dobio naziv amplidin. Osnovnu shemu amplidina prikazuje slika 3. Osim normalnih četkica spojenih na stezaljke 2A1 i 2A2 ima on i okomite četkice (pod kutom od 90 električkih stupnjeva) spojene na stezaljke 1A1 i 1A2. Uzbuda je amplidina nezavisna (stezaljke F_1 i F_2), no obično on ima više (3–5) uzbudnih namota na glavnom polu koji u reguliranom pogonu služe kao upravljački namoti (na sl. 3. nacrtan je samo jedan). S gledišta normalnoga nezavisno uzbuđenog stroja na stezaljkama 2A1 i 2A2 morao bi biti izlaz snage, no one su međusobno kratkospojene, ili su, kao na slici 3, spojene preko serijskog namota (stezaljke D1 i D2) i, eventualno, preko namota za kompenzaciju (stezaljke 2C1 i 2C2). Taj strujni krug zovemo poprečnim. Obično amplidini manjih snaga nemaju toga serijskog namota i namota za kompenzaciju, ali su na slici 3. nacrtani radi cjelovitosti

prikaza. Glavni je izlazni strujni krug (stezaljke 1A1 i 1A2) spojen na potrošač otpora R_t preko namota pomoćnih polova (stezaljke B1 i B2) i kompenzacijskog namota (stezaljke 1C1 i 1C2). Obično kompenzacijski namot ima nekoliko otcjepa (na sl. 3. ih nema) kako bi se kompenzacija stroja mogla točno podešavati otcjepljivanjem dijela kompenzacijskog namota ili čak spajanjem dijela tih otcjepa kako bi djelovali u smislu suprotnome onom glavnog dijela kompenzacijskog namota.



Sl. 3. Shema spoja amplidina s oznakama stezaljki

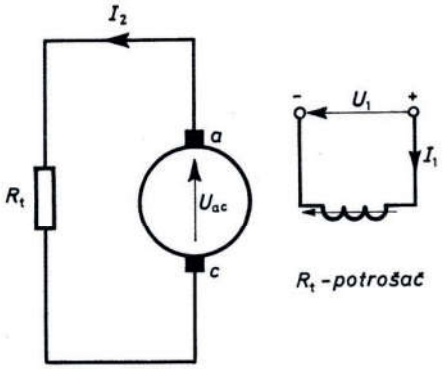
Već smo u sedmom poglavlju (odjeljak 7.4) obrazložili funkciju pojačala nezavisno uzbuđenog generatora i pojmove faktora pojačanja napona i snage. Usporedimo sad amplidin kao pojačalo s nezavisno uzbuđenim generatorom i pri tome opišimo (fizikalno) djelovanje amplidina i njegovu (statičku) sposobnost pojačanja snage.

Usporedimo sad amplidin kao pojačalo s nezavisno uzbuđenim generatorom i pri (red veličine) 1% snage rotorskoga strujnog kruga, možemo, uz oznake prema slici 4, pisati da je:

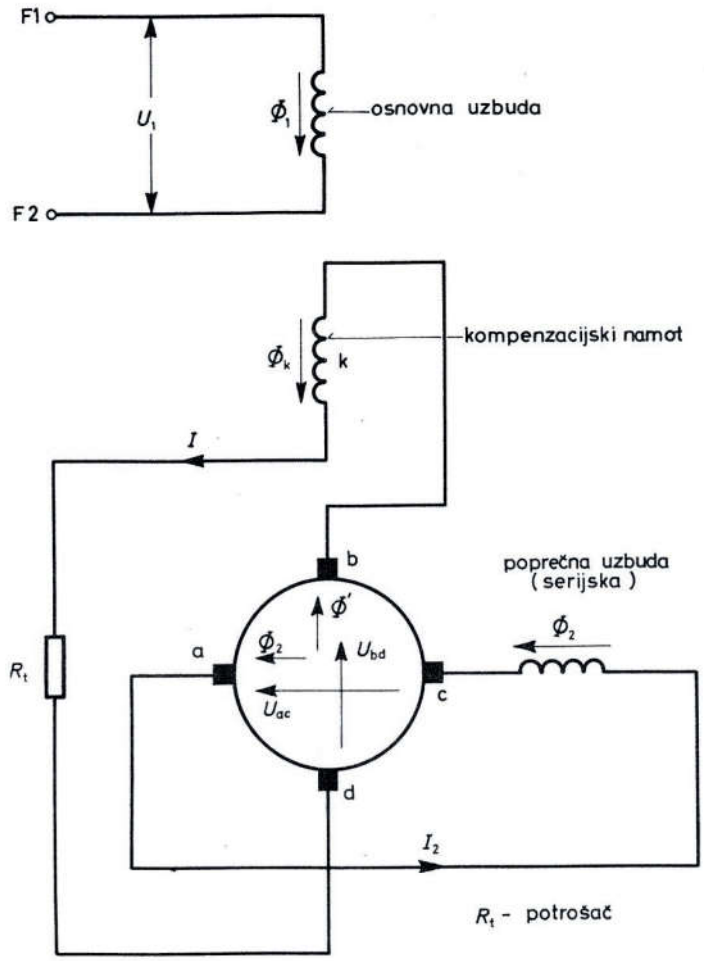
$$U_{ac} I_2 \doteq 100\, U_1 I_1,$$

tj. impuls u uzbudnom krugu 100-struko se pojačava u krugu tereta. Pri tome oznake U_1 i I_1 znače napon i struju u uzbudnome, a U_{ac} i I_2 napon i struju u armaturnome strujnom krugu generatora. Ako amplidinu prema skici na slici 5 (na

kojoj su prikazani samo bitni elementi iz sheme 3) dodamo novi par četkica b i d, a četkice a i c međusobno (kratko) spojimo preko jednoga serijskog uzbudnog namota, koji djeluje u poprečnoj osi stroja, potjerat će napon U_{ac} armaturom i kroz taj uzbudni namot struju I_2, a ona će stvoriti u poprečnoj osi stroja tok magnetski Φ_2. Taj magnetski tok inducira na četkicama b i d napon U_{bd}, a njega vodimo na potrošač otpora R_t, kojim teče struja I. Struja I, koja teče armaturom,



Sl. 4. Skica nezavisno uzbuđenoga generatora s djelovanjem istosmjernog pojačala



Sl. 5. Skica uz načelno objašnjenje o djelovanju amplidina

izaziva reakciju armature označenu magnetskim tokom Φ'. Taj magnetski tok izravno je suprotan magnetskom toku osnovne uzbude Φ_1, pa bi direktno rušio napon U_{ac}, a time posredno napon U_{bd}. Zato je dodan kompenzacijski namot, kojeg magnetski tok Φ_k poništava magnetski tok Φ'. To je osnovno fizikalno djelovanje. Ako pretpostavimo da je pojačanje drugog stepena, tj. pojačanje poprečnoga strujnog kruga s četkicama a i c prema novome izlaznom krugu s četkicama b i d otprilike jednako kao što je bilo ono prvog stepena, možemo pisati:

$$U_{bd} I \doteq 100\ U_{ac} I_2 \doteq 10\,000\ U_1 I_1.$$

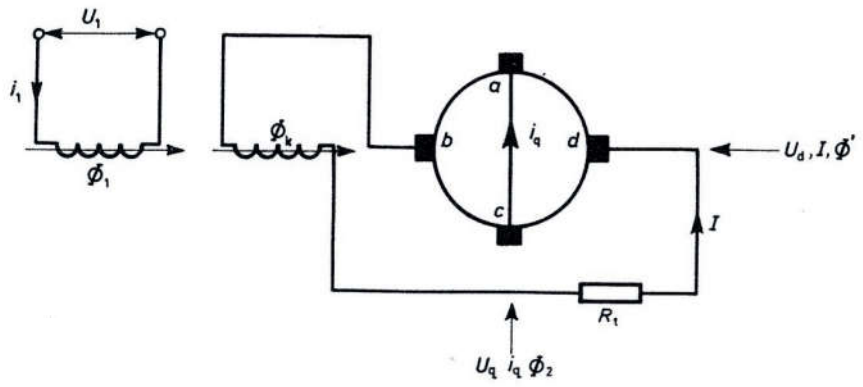
Amplidin je, dakle, pojačalo s jakim pojačanjem snage reda veličine 1:10 000. Zbog tog svojstva on se koristi u regulacijskim procesima jer uz relativno veliko pojačanje ima, s obzirom na veliku snagu, relativno malu ukupnu vremensku konstantu.

S pojavom amplidina postaje funkcija (specijalnog) istosmjernog stroja kao pojačala posebno zanimljiva. Statička i dinamička svojstva, faktori dobrote itd. očito su znatno povoljniji nego običnome nezavisno uzbuđenom generatoru. Zato ćemo se u idućem odjeljku nešto detaljnije pozabaviti tim pitanjima.

8.4. Specijalni istosmjerni strojevi kao pojačala snage

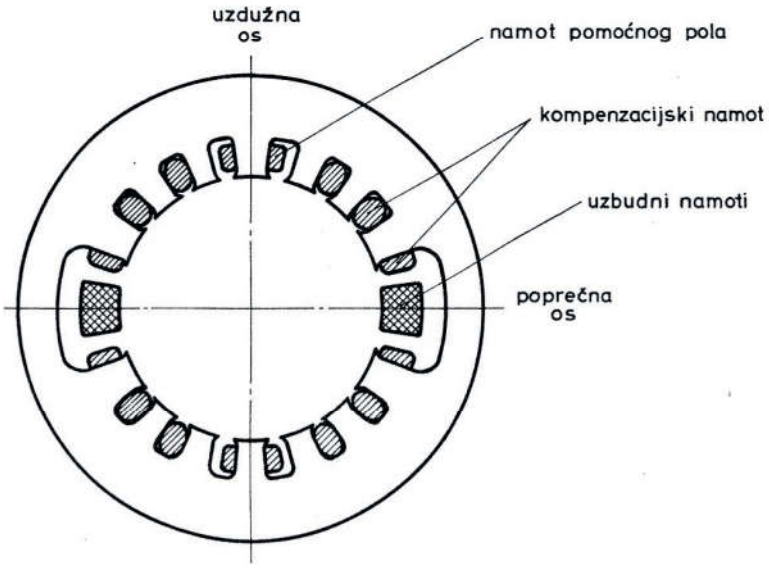
U odjeljku 7.4. opisano je načelno djelovanje istosmjernog stroja kao pojačala snage (strojno pojačalo), a u odjeljku 8.3. principno je prikazano (statičko) djelovanje amplidina kao strojnog pojačala. I zaista, amplidin je najbolji predstavnik strojnih pojačala. Da nema izvjesnih mana, kao što su visoka cijena i pogonska osjetljivost, bio bi on idealno pojačalo snage u svim onim pogonima u kojima se iz bilo kojih razloga ne upotrebljava elektroničko pojačalo. Razložimo, dakle, amplidin, njegovu građu i djelovanje, te njegove karakteristike kao pojačala.

Već poznata shema, ovdje predočena slikom 1, daje predodžbu najjednostavnijeg amplidina, onoga sa samo jednim uzbudnim namotom. Primjer s više uzbudnih namota u principu se ne razlikuje od ovoga, pa ćemo obraditi taj osnovni primjer spoja. Za lakše razumijevanje ponovimo (prema odjeljku 8.3) opis statičkog djelovanja amplidina na nešto



Sl. 1. Osnovna shema spoja najjednostavnije izvedbe amplidina, s jednim uzbudnim namotom

drukčiji način: Napon U_1 na uzbudnom namotu protjerat će njime struju i_1, koja će stvoriti u magnetskom krugu glavni magnetski tok Φ_1. Uslijed vrtnje inducira se djelovanjem toga magnetskog toka napon U_q na (kratkospojnim) četkicama *ac*, koji će protjerati armaturom struju i_q. Poprečna kratkospojna struja i_q stvara magnetski tok Φ_2, koji će inducirati napon U_d na četkicama *bd*. Napon U_d potjerat će struju tereta I armaturnim strujnim krugom i otporom tereta R_t. Struja I stvorit će magnetski tok Φ', koji djeluje nasuprot osnovnome magnetskom toku Φ_1, ali ga (djelomično ili potpuno) kompenzira magnetski tok Φ_k stvoren djelovanjem kompenzacijskog namota kojim također protječe struja I. Na taj se način izbjegava poništavanje stvorenog efekta. Novo je u ovom načinu prikaza podjela fizikalnih veličina na one koje djeluju u poprečnome (uobičajeni indeks q) magnetskom krugu i one koje djeluju u direktnome (uobičajeni indeks d) magnetskom krugu stroja. Stječe se dojam da amplidin u sebi sadrži dva stroja u kaskadi, pa se tako može u prvi mah stvoriti i predodžba da bi dva jednostavna istosmjerna stroja mogla dati isti učinak. Usprkos fizikalnoj sličnosti ipak je amplidin kao pojačalo znatno bolji od kaskade, o čemu će poslije biti više rečeno. Odmah se uočava prednost amplidina u tome što u prvom stepenu može imati optimalno pojačanje. Prvi stepen (ulaz uzbudni namot – izlaz poprečne četkice *ac*) identičan je običnom stroju, a zbog u principu kratkospojenog izlaza ostvaruju se optimalni uvjeti pojačanja snage prema jednadžbi (7.4.–11) ako se premoste četkice *ac* odgovarajućim otporom. Treba, dalje, očekivati i relativno brzi odziv, jer se proces ulančenja odigrava unutar jednoga magnetskog kruga. Jednako tako može se očekivati odlično magnetsko vezivanje svih namota na statoru – uzbudnih namota i kompenzacijskog namota, jer su svi namoti položeni vrlo blizu jedan drugome. Na slici 2. vidi se načelni raspored statorskih namota.



Sl. 2. Presjek statorskog željeza dvopolnog amplidina i princip smještaja statorskih namota

U stvarnim je izvedbama redovno više uzbudnih namota, a kompenzacijski namot ima više otcjepa tako da se može podešavati stupanj kompenzacije. Da olakšamo praćenje izvoda za pojačanje itd., odredimo da sve veličine u uzbudnom krugu (i magnetski tok koji se tamo stvori) nose indeks 1, sve veličine u poprečnom krugu indeks 2, a u izlaznom (armaturnom) krugu indeks 3, uz izuzetak veličina što se odnose na kompenzacijski namot, koje neka imaju indeks k. Pretpostavimo, dalje, da magnetski krug nije nigdje zasićen, a

veličine označimo uobičajenim oznakama: R – otpori, e, E – inducirani naponi, u, U – naponi stezaljki, Φ – magnetski tokovi, Θ – protjecanja, L – induktiviteti, i, I – struje, w – brojevi zavoja, n – brzina vrtnje itd.

Razmotrimo prazni hod amplidina. Magnetski tok izazvan protjecanjem uzbudnog namota je:

$$\Phi_1 = c_1\Theta_1 = c_1 i_1 w_1, \tag{1}$$

pri čemu je c_1 konstanta proporcionalnosti protjecanja i magnetskog toka u nezasićenom stroju. U poprečnoj grani magnetski tok Φ_1 inducira napon:

$$e_2 = k'_e n\Phi_1 = c_1 k'_e n\Theta_1, \tag{2}$$

pri čemu je k'_e poznata konstanta koja sadrži konstrukcijska svojstva stroja. Struja u poprečnoj grani je:

$$i_2 = \frac{e_2}{R_2} = \frac{k'_e n}{R_2}\,\Theta_1 \tag{3}$$

i ona stvara u poprečnoj osi magnetski tok:

$$\Phi_2 = c_2 i_2 w_a = \frac{c_1 c_2 k'_e w_a n}{R_2}\,\Theta_1, \tag{4}$$

pri čemu je c_2 konstanta proporcionalnosti između poprečnoga magnetskog toka i poprečnog protjecanja. Na izlazu se od toga magnetskog toka inducira u praznom hodu napon:

$$e_{30} = k'_e n\Phi_2 = \frac{c_1 c_2 k'^2_e w_a}{R_2}\,n^2\Theta_1 = cn^2\Theta_1, \tag{5}$$

a pri tome je:

$$c = \frac{c_1 c_2 k'^2_e w_a}{R_2}.$$

Očito je da je izlazni inducirani napon proporcionalan kvadratu brzine vrtnje i ulaznom protjecanju, pri čemu je faktor proporcionalnosti c visok (kao da je umnožak faktora dvaju strojeva, od kojih prvi troši cijeli napon na stvaranje pojačanja). Odatle potječe visok faktor pojačanja snage amplidina, reda veličine $5 \cdot 10^4$. No taj se visoki faktor pojačanja snage lako gubi, tj. ostvaruje se samo u gotovo idealnim okolnostima, ali posebno teško pod teretom, kad poteče struja izlaza. Tome je uzrok više razloga, kojih je osnova velika osjetljivost magnetskog kruga na bilo kakve uzroke. Najčešći su uzroci takvim pojavama:

a) nedovoljna savršenost izrade (tehničke tolerancije);
b) vrtložne struje u dijelovima željeza (lima);
c) dodatni utjecaj magnetskih polja svitaka u komutaciji;
d) četkice – nesavršenost izrade, prilijeganja i položaja.

Poseban utjecaj ima eventualna netočnost kompenzacije. Pod teretom se može odnos induciranih napona prikazati nejednadžbom:

$$u_3 \lesseqgtr e_3 \lesseqgtr e_{30}, \tag{6}$$

tj. napon stezaljki (pod teretom) u_3, inducirani napon (pod teretom) e_3 i inducirani napon praznog hoda e_{30} mogu biti poredani padajućim ili rastućim slijedom. Pri tome su razlike

zbog padova napona na otporima armature R_a i kompenzacijskog namota R_k neznatne, a odlučujuću ulogu ima stupanj kompenzacije. Da to protumačimo, krenimo od protjecanja pod teretom, koje je rezultat protjecanja uzbudnog namota Θ_1, protjecanja zbog reakcije armature izlaznog kruga Θ_3 i protjecanja kompenzacijskog namota Θ_k:

$$\Theta_{rez} = \Theta_1 - \Theta_3 + \Theta_k. \tag{7}$$

S time će izlazni inducirani napon prema relaciji (5) biti:

$$e_3 = cn^2\Theta_{rez},$$

$$e_3 = cn^2(\Theta_1 - \Theta_3 + \Theta_k) = cn^2\Theta_1 - cn^2\Theta_3(1 - \nu),$$

i, konačno:

$$e_3 = e_{30} - cn^2\Theta_3(1 - \nu).$$

Pri tome je ν stupanj kompenzacije:

$$\nu = \frac{\Theta_k}{\Theta_3}$$

i uz potpunu kompenzaciju $\Theta_3 = \Theta_k$ dobivamo $\nu = 1$, odakle izlazi $e_3 = e_{30}$. Iz tog razloga prave se otcjepi, ili se stvara mogućnost šantiranja kompenzacijskog namota, da mu se protjecanje podesi prema protjecanju reakcije armature. Dapače, najčešće se stvori mogućnost i male *prekompenzacije* da se može poništiti i utjecaj padova napona na omskim otporima. Protjecanje Θ_3 je:

$$\Theta_3 = i_3 w_3 = i_3 w_a = \frac{e_3}{R_3 + R_t} w_a,$$

pri čemu su $w_a = w_3$ efektivni zavoji armature, $R_3 = R_a + R_k + R_č$ otpori armature, kompenzacijskog namota i onaj zbog pada napona na četkicama, a R_t je otpor tereta.

S time se izraz za inducirani napon izlaza amplidina pod teretom može pisati:

$$e_3 = cn^2\Theta_1 - cn^2\frac{e_3 w_a}{R_3 + R_t}(1 - \nu),$$

odnosno:

$$e_3\left[1 + \frac{cn^2 w_a}{R_3 + R_t}(1 - \nu)\right] = cn^2\Theta_1 = e_3\frac{R_3 + R_t + cn^2 w_a(1 - \nu)}{R_3 + R_t},$$

odakle neposredno dobivamo:

$$e_3 = \frac{cn^2(R_3 + R_t)}{R_3 + R_t + cn^2 w_a(1 - \nu)}\Theta_1. \tag{8}$$

To je konačni izraz za inducirani napon izlaza pod teretom, gdje se jasno vide sve mogućnosti kompenziranja primjenom jačeg ili slabijeg protjecanja kompenzacijskog namota, tj. manjeg ili većeg stupnja kompenzacije ν.

Na jednak način razvit ćemo izraz za napon stezaljki:

$$U_3 = e_3 - i_3 R_3 = e_3 - \frac{e_3 R_3}{R_3 + R_t}$$

i uz pomoć jednadžbe (8):

$$U_3 = \frac{cn^2(R_3 + R_t)\Theta_1}{R_3 + R_t + cn^2 w_a(1 - \nu)} - \frac{cn^2(R_3 + R_t)R_3\Theta_1}{(R_3 + R_t)[R_3 + R_t + cn^2 w_a(1 - \nu)]},$$

što sređeno daje:

$$U_3 = \frac{cn^2 R_t}{R_3 + R_t + cn^2 w_a(1 - \nu)}\Theta_1. \tag{9}$$

Sad je moguće odrediti i takav stupanj kompenzacije da se ponište i djelovanja padova napona na omskim otporima izlaznog kruga. Treba samo izjednačiti izraze za inducirani napon u praznom hodu (5) i napon izlaza (9) $u_3 = u_{30}$, iz čega dobivamo:

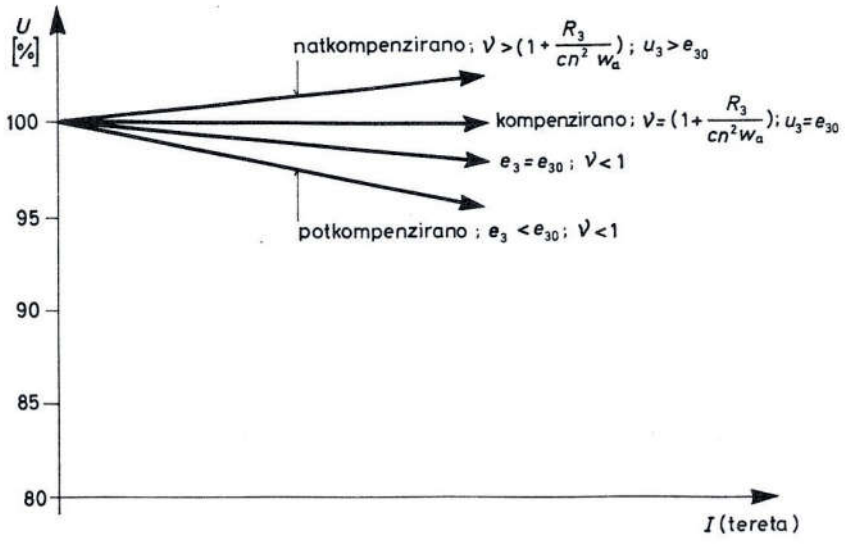
$$\frac{cn^2 R_t\Theta_1}{R_3 + R_t + cn^2 w_a(1 - \nu)} = cn^2\Theta_1,$$

$$R_t = R_3 + R_t + cn^2 w_a(1 - \nu),$$

i, konačno:

$$\nu = 1 + \frac{R_3}{cn^2 w_a}. \tag{10}$$

Na slici 3. u principu su prikazane statičke vanjske karakteristike amplidina za razne mogućnosti kompenzacije.



Sl. 3. Statičke karakteristike amplidina za različite stupnjeve (dobrote) kompenzacije

8.4.1. Brzina odziva amplidina

Vrlo je zanimljivo pitanje brzine odziva amplidina. Da razvijemo izraze za vremenske konstante koje ga karakteriziraju, razmotrimo odgovarajuće prelazne pojave, a među njima kao prvu formiranje izlaznoga induciranog napona u praznom hodu. Slika 4. u principu sadrži shemu po kojoj možemo postaviti odgovarajuće jednadžbe strujnih krugova. Crtkani

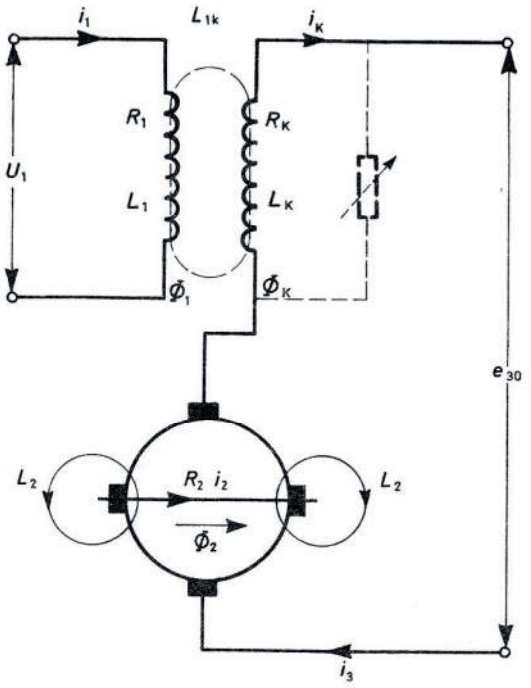
otpornik načelno pokazuje da se kompenzirani namot dade podesiti ili šantom ili otcjepima. Možemo za strujne krugove napisati ove četiri jednadžbe:

(I) $U_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_{1k} \frac{\mathrm{d}i_k}{\mathrm{d}t}$;

(II) $0 = i_k R_k + L_k \frac{\mathrm{d}i_k}{\mathrm{d}t} + L_{1k} \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}$;

(III) $e_2 = c_1 w_1 i_1 + c_k w_k i_k = i_2 R_2 + L_2 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}$;

(IV) $e_{30} = c_2 w_2 i_2$.



Sl. 4. Principna shema namota amplidina s jednim namotom i s oznakama fizikalnih veličina, i to za primjer bez opterećenja

Jednadžba (I) je uvjet naponske ravnoteže ulaznog kruga. Jednadžba (II) je uvjet ravnoteže kompenzacijskog kruga, jer kompenzacijski namot u praznom hodu djeluje kao sekundar transformatora (u praznom hodu) kojem je primar ulazni krug. Jednadžba (III) je uvjet naponske ravnoteže u poprečnom krugu amplidina, a jednadžba (IV) inducirani je napon izlaza. Zbog vrlo malog rasipanja između primarnoga uzbudnog namota i kompenzacijskog namota može se za odnose međuinduktiviteta L_{1k} i induktiviteta pisati:

$$L_{1k} = \sqrt{L_1 L_k} = L_1 \frac{w_k}{w_1} = L_k \frac{w_1}{w_k}.$$

Pomnožimo li sad jednadžbu (I) s $\frac{w_1}{R_1}$, a jednadžbu (II) s $\frac{w_k}{R_k}$, izlazi:

$$w_1 \frac{U_1}{R_1} = w_1 i_1 + w_1 T_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + w_k T_1 \frac{\mathrm{d}i_k}{\mathrm{d}t} = \Theta_1 + T_1 \left(\frac{\mathrm{d}\Theta_1}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}\Theta_k}{\mathrm{d}t} \right),$$

$$0 = w_k i_k + w_k T_k \frac{\mathrm{d}i_k}{\mathrm{d}t} + w_1 T_k \frac{\mathrm{d}i_k}{\mathrm{d}t} = \Theta_k + T_k \left(\frac{\mathrm{d}\Theta_k}{\mathrm{d}t} + \frac{\mathrm{d}\Theta_1}{\mathrm{d}t} \right),$$

pri čemu su Θ_1 i Θ_k protjecanja, a T_1 i T_k vremenske konstante primarnog i kompenzacijskog uzbudnog kruga amplidina.

Zbrajanjem tih jednadžbi dobivamo:

$$\Theta_1 + \Theta_k + (T_1 + T_k)\left(\frac{d\Theta_1}{dt} + \frac{d\Theta_k}{dt}\right) = \frac{w_1 U_1}{R_1}.$$

Ako pomnožimo posljednji rezultat s c_1, i budući da još $\Theta_1 + \Theta_k$ izražavaju cijelo primarno protjecanje, izlazi:

$$e_2 + (T_1 + T_k)\frac{de_2}{dt} = U_1 \frac{c_1 w_1}{R_1},$$

odnosno:

$$e_2 + T' \frac{de_2}{dt} = K_1 U_1. \tag{11}$$

U toj relaciji T' je zbroj vremenskih konstanta uzbudnog i kompenzacijskog kruga, a k_1 konstantni odnos među veličinama i njihovi su izrazi:

$$T' = T_1 + T_k, \tag{12}$$

$$K_1 = \frac{c_1 w_1}{R_1}. \tag{13}$$

Deriviramo li jednadžbu (III) po vremenu:

$$\frac{de_2}{dt} = R_2 \frac{di_2}{dt} + L_2 \frac{d^2 i_2}{dt^2},$$

i uvrstimo taj rezultat i jednadžbu (III) u jednadžbu (11), bit će nakon sređivanja:

$$i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + T'\left(R_2 \frac{di_2}{dt} + L_2 \frac{d^2 i_2}{dt^2}\right) = k_1 U_1.$$

Dijeljenjem s R_2 i sređivanjem prelazi ta jednadžba u:

$$T' T_2 \frac{d^2 i_2}{dt^2} + (T' + T_2)\frac{di_2}{dt} + i_2 = \frac{k_1}{R_2} U_1. \tag{14}$$

$T_2 = \dfrac{L_2}{R_2}$ je očito vremenska konstanta poprečnog kruga amplidina. No iznos te vremenske konstante (za razliku od ostalih) ponešto je nesiguran. T_2 stvarno ima iznos L_2/R_2 samo onda kad struje svitaka u komutaciji nemaju nikakav utjecaj na glavni magnetski tok i kad su poprečene četkice položene idealno u neutralnoj zoni, dakle kad nema povratne veze zbog struja u kratkospojnoj poprečnoj grani. Ako toga povratnog utjecaja ima, onda je ne samo smanjen koeficijent vezanja primarnog kruga c_1, dakle i k_1, nego je smanjena i vremenska konstanta T_2 i ona iznosi:

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2\left(1 + \dfrac{c_1 k_{21}}{R_2}\right)}. \tag{15}$$

Pri tome je k_{21} koeficijent proporcionalnosti između dodatnog protjecanja u uzdužnoj osi i poprečne struje koja ga je prouzrokovala. Tako je iznos $T_2 = L_2/R_2$ zapravo najveća moguća ili granična vrijednost vremenske konstante poprečnog kruga.

Ako pomnožimo sad jednadžbu (14) s w_2c_2 i budući da je i_2w_2 (u idealnom slučaju) ukupno protjecanje poprečnog kruga, bit će:

$$T'T_2\frac{d^2e_{30}}{dt^2}+(T'+T_2)\frac{de_{30}}{dt}+e_{30}=k_1k_2U_1=kU_1, \tag{16}$$

pri čemu su:

$$k_2=\frac{w_2c_2}{R_2}, \tag{17}$$

$$k=k_1k_2. \tag{18}$$

Za rješenje diferencijalne jednadžbe (16) karakteristična je algebarska jednadžba s promjenljivom q:

$$T'T_2q^2+(T'+T_2)q+1=0.$$

Koeficijenti su tako raspoređeni uz potencije da je rješenje direktno vidljivo:

$$q_1=-\frac{1}{T'}, \qquad q_2=-\frac{1}{T_2},$$

pa će opće rješenje jednadžbe (15) biti:

$$e_{30}=A_1e^{-\frac{t}{T'}}+A_2e^{-\frac{t}{T_2}}+kU_1. \tag{16.a}$$

Tom se općom jednadžbom mogu računati konkretni vremenski odzivi amplidina. Da dođemo do opipljivih rezultata, razmotrimo jedan praktički stvarni primjer, tj. odziv pri uključenju uzbude.

Za konkretni primjer uključenja uzbudnog namota vrijede početni uvjeti $t=0$ i $e_{30}=0$, a i $de_{30}/dt=0$, jer se u izlaznom krugu još ništa nije počelo zbivati. Derivacijom jednadžbe (16.a) dobiva se:

$$\frac{de_{30}}{dt}=\frac{1}{T'}A_1e^{-\frac{t}{T'}}-\frac{1}{T_2}A_2e^{-\frac{t}{T_2}}, \tag{16. b}$$

pa se uvrštenjem početnih uvjeta u jednadžbe (16.a) i (16.b) izračunavaju konstante integracije:

$$A_1=kU_1\frac{T'}{T_2-T'}, \qquad A_2=kU_1\frac{T_2}{T'-T_2}.$$

Tako za izlazni inducirani napon u praznom hodu izlazi konačno:

$$e_{30}=kU_1\left(1+\frac{T'}{T_2-T'}e^{-\frac{t}{T'}}+\frac{T_2}{T'-T_2}e^{-\frac{t}{T_2}}\right). \tag{16.c}$$

Amplidin najčešće ima više uzbudnih (upravljačkih) namota. Tad se za T' može uvrstiti zbroj njihovih vremenskih konstanta i vremenske konstante kompenzacijskog namota:

$$T'=T_{11}+T_{12}+T_{13}+\ldots+T_k=\sum_{x=1}^{n}T_{1x}+T_k. \tag{12.a}$$

Iz formalno napisane jednadžbe (16.c) ne vidi se jasno tendencija vremenskog ponašanja izlaznog napona, tj. ne vidi se jasno trajanje odziva, sve dok se nešto više ne zna o vremenskim konstantama. U praktičkim izvedbama redovito je vremenska konstanta poprečnog kruga znatno veća od vremenske konstante statorskih namota T':

$$T_2>>T'. \tag{15.a}$$

Vremenska konstanta T_2 reprezentira cijeli veliki poprečni magnetski tok, i to glavni i rasipni uz mali radni otpor. S druge strane, u strujne krugove uzbudnih (upravljačkih) namota redovito su uključeni znatni predotpori, a i magnetski tok koji obuhvaćju manji je od poprečnoga, dok kompenzacijski namot ima po prirodi uključene predotpore armature i tereta uvijek kad je aktivan, tj. kad je uključen. Time postaje jasna relacija (17). Ako je T' po iznosu mali dio od T_2, onda je $\left(\frac{T'}{T_2 - T'}\right)$ još manji dio od $\left(\frac{T_2}{T' - T_2}\right)$, a to su koeficijenti uz drugi i treći pribrojnik jednadžbe (16.c). Jednako tako i $e^{-\frac{t}{T'}}$, iako u trenutku $t = 0$ jednako po veličini $e^{-\frac{t}{T_2}}$, mnogo brže iščezava s trajanjem pojave, pa je jasno da e_{30} prema izrazu (16.c) teži ka:

$$e_{30} \doteq kU_1\left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right). \tag{16.d}$$

Budući da je i zbog jednadžbi (13), (17) i (18):

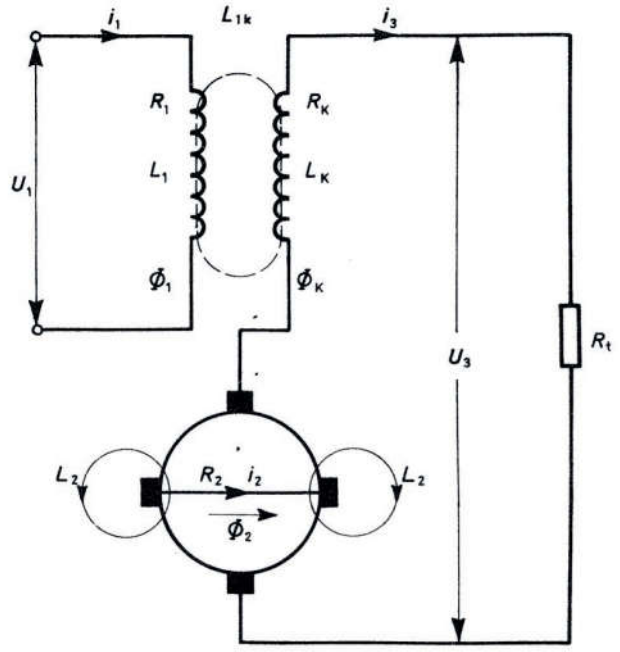
$$kU_1 = U_1\frac{c_1w_1}{R_1}\frac{c_2w_2}{R_2} = I_1c_1w_1\frac{c_2w_2}{R_2} = E_2\frac{c_2w_2}{R_2} = E_{30},$$

to prema izrazima (16.c) i (16.d) izlazi:

$$e_{30} = E_{30}\left(1 + \frac{T'}{T_2 - T'}e^{-\frac{t}{T'}} + \frac{T_2}{T' - T_2}e^{-\frac{t}{T_2}}\right), \tag{16.e}$$

$$e_{30} \doteq E_{30}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right). \tag{16.f}$$

Amplidin bez tereta zapravo i nije u stvarnom pogonu. Mnogo je zanimljivije njegovo ponašanje pod teretom, iako ne treba očekivati neke bitne razlike. Pretpostavimo amplidin pod teretom shemu kojeg neka nam prikazuje slika 5. Za njega, služeći se već spomenutim oznakama i oznakama na slici 5, možemo postaviti pet osnovnih jednadžbi, od (V) do (IX):



Sl. 5. Principna shema namota amplidina s jednim uzbudnim namotom i s oznakama fizikalnih veličina – sve za pogonski opterećen stroj

(V) $$U_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + L_{1k} \frac{\mathrm{d}i_3}{\mathrm{d}t};$$

(VI) $$e_2 = c_1[i_1 w_1 - i_3 w_a(1 - \nu)];$$

(VII) $$e_2 = i_2 R_2 + L_2 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t};$$

(VIII) $$e_3 = i_3 R_3 + (L_k + L_a) \frac{\mathrm{d}i_3}{\mathrm{d}t} + L_{1k} \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t};$$

(IX) $$e_3 = c_2 w_a i_2.$$

Pri tome je L_a induktivitet armaturnoga strujnog kruga.

Jednadžba (V) je uvjet naponske ravnoteže ulaznog kruga. Jednadžba (VI) prikazuje inducirani napon u poprečnom krugu kao funkciju protjecanja koje ga stvara. Pri tome je $i_3 w_a\ (1-\nu)$ rezultantno protjecanje armaturnog i kompenzacijskog namota. Jednadžba (VII) je uvjet naponske ravnoteže u poprečnom krugu amplidina, a jednadžba (VIII) u izlaznome strujnom krugu. Jednadžba (IX) izražava inducirani napon izlaza u funkciji protjecanja od kojeg nastaje. R_3 je, dakako, ukupni otpor u izlaznom krugu, dakle $R_3 = R_a + R_k + R_t$. Vremenske konstante pojedinih krugova su:

$$T_1 = \frac{L_1}{R_1}, \quad T_2 = \frac{L_2}{R_2}, \quad T_3 = \frac{L_a L_k}{R_3}.$$

Na osnovi toga se vremenski utjecaj međuinduktiviteta može prikazati kao:

$$\frac{L_{1k}}{R_1} = \frac{L_1}{R_1} \frac{w_a(1 - \nu)}{w_1} = T_1 \frac{w_a(1 - \nu)}{w_1},$$

$$\frac{L_{1k}}{R_3} = \frac{L_k + L_a}{R_3} \frac{w_1}{w_a(1 - \nu)} = T_3 \frac{w_1}{w_a(1 - \nu)}.$$

Podijelimo jednadžbu (V) s R_1, a jednadžbu (VIII) s R_3:

$$\frac{U_1}{R_1} = i_1 + T_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + T_1 \frac{w_a(1 - \nu)}{w_1} \frac{\mathrm{d}i_3}{\mathrm{d}t},$$

$$\frac{e_3}{R_3} = i_3 + T_3 \frac{\mathrm{d}i_3}{\mathrm{d}t} + T_3 \frac{w_1}{w_a(1 - \nu)} \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}.$$

Pomnožimo prvi od tih izraza s w_1, a drugi s $w_a\ (1 - \nu)$:

$$w_1 \frac{U_1}{R_1} = i_1 w_1 + T_1 \frac{\mathrm{d}[i_1 w_1 + i_3 w_a(1 - \nu)]}{\mathrm{d}t},$$

$$w_a(1 - \nu) \frac{e_3}{R_3} = i_3 w_a(1 - \nu) + T_3 \frac{\mathrm{d}[i_1 w_1 + i_3 w_a(1 - \nu)]}{\mathrm{d}t}$$

i zbrojimo rezultat:

$$w_1 \frac{U_1}{R_1} + \frac{e_3}{R_3} w_a(1 - \nu) = i_1 w_1 + i_3 w_a(1 - \nu) + (T_1 + T_3) \frac{\mathrm{d}[i_1 w_1 + i_3 w_a(1 - \nu)]}{\mathrm{d}t}.$$

U toj relaciji $i_1 w_1 + i_3 w_a(1 - \nu)$ izražava ukupno protjecanje koje stvara primarni magnetski (glavni) tok. Uzmemo li to u obzir i pomnožimo li posljednji rezultat s c_1 (prema prijašnjoj definiciji), izlazi nakon sređivanja:

$$c_1[w_1 \frac{U_1}{R_1} + \frac{e_3}{R_3} w_a(1 - \nu)] = e_2 + T' \frac{de_2}{dt}. \tag{19}$$

Tu je sad T' zbroj vremenskih konstanta uzbudnog i izlaznoga strujnog kruga:

$$T' = T_1 + T_3. \tag{20}$$

Sad napišemo jednadžbu (VII) tako da na desnoj strani izlučimo R_2 i zatim napišemo još i derivaciju tog izraza:

$$e_2 = \left(i_2 + T_2 \frac{di_2}{dt} \right) R_2,$$

$$\frac{de_2}{dt} = \left(\frac{di_2}{dt} + T_2 \frac{d^2 i_2}{dt^2} \right) R_2.$$

Obje tako dobivene vrijednosti uvrstimo u desnu stranu jednadžbe (19):

$$c_1[w_1 \frac{U_1}{R_1} + \frac{e_3}{R_3} w_a(1 - \nu)] = R_2[i_2 + (T_2 + T') \frac{di_2}{dt} + T_2 T' \frac{d^2 i_2}{dt^2}$$

Nakon množenja tog izraza s $\frac{c_2 w_a}{R_2}$ i sređivanja uz pomoć jednadžbe (IX), tj. uvođenja $e_3 = c_2 w_a i_2$, dobivamo:

$$\frac{c_1 c_2 w_1 w_a}{R_1 R_2} U_1 = -\frac{e_3 c_1}{R_2 R_3} w_a^2 c_2(1 - \nu) + e_3 + (T_2 + T') \frac{de_3}{dt} + T' T_2 \frac{d^2 e_3}{dt^2}.$$

Koeficijent uz lijevu stranu tog izraza je poznati koeficijent k iz jednadžbe (18), pa diferencijalna jednadžba kad je uređena glasi:

$$T' T_2 \frac{d^2 e_3}{dt^2} + (T_2 + T') \frac{de_3}{dt} + e_3 \left[1 - \frac{k R_1 w_a(1 - \nu)}{R_3 w_1} \right] = k U_1. \tag{21}$$

Potpuno kompenziranim amplidinima faktor je kompenzacije 1, ($\nu = 1$) pa za taj slučaj diferencijalna jednadžba prelazi u:

$$T' T_2 \frac{d^2 e_3}{dt^2} + (T_2 + T') \frac{de_3}{dt} + e_3 = \mathrm{k} U_1. \tag{22}$$

Ta diferencijalna jednadžba ima formalno potpuno jednak oblik kao i jednadžba (16), pa će za ukopčanje uzbude, koje je i prije odabrano kao primjer, imati i formalno jednaka rješenja, jer su još i početni uvjeti jednaki. Uzmemo li u obzir da je tu $kU_1 = E_3$, dobivamo:

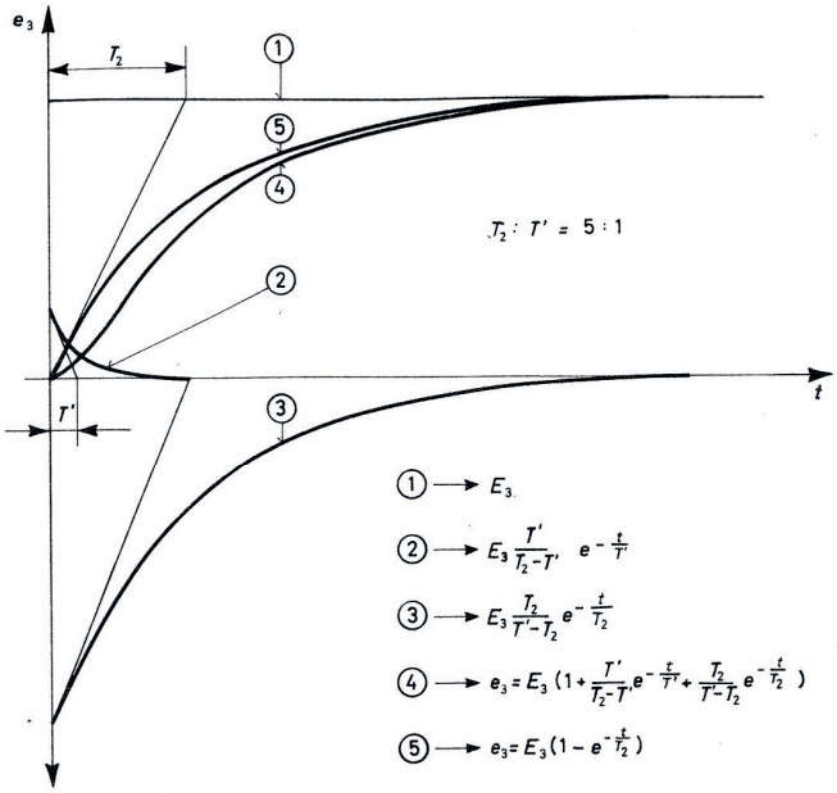
$$e_3 = E_3 \left(1 + \frac{T'}{T_2 - T'} \mathrm{e}^{-\frac{t}{T'}} + \frac{T_2}{T' - T_2} \mathrm{e}^{-\frac{t}{T_2}} \right). \tag{22.a}$$

Razmotrimo mogu li se i u pogonskim okolnostima opterećenog amplidina, radi približne ocjene, prihvatiti i približni zaključci dobiveni u njegovu praznom hodu. To ovisi samo o vremenskim konstantama T_2 i T'. T_2, vremenska konstanta poprečnog kruga, u principu se ne mijenja pod teretom, već je jednaka kao i u praznom hodu, tj. vrijedi izraz (15) s iznosom vrijednosti $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$. S vremenskom konstantom statorskih namota nešto je drukčije. U našem primjeru će iznositi prema izrazu (20) $T' = T_1 + T_3$, a u općem slučaju više uzbudnih namota:

$$T' = \sum_{x=1}^{n} T_{1x} + T_3. \tag{20.a}$$

Vremenska konstanta izlaznog kruga $T_3 = \dfrac{L_a + L_k}{R_a + R_k + R_t}$ očito je manja po iznosu od vremenske konstante kompenzacijskog namota $T_k = \dfrac{L_k}{R_k}$. Jednostavnom usporedbom izrazâ (12) i (12.a) sa (20) i (20.a) za vremenske konstante lako je zaključiti da je vremenska konstanta T' manja pod teretom nego u praznom hodu. Tako se razlika vremenskih konstanta $T_2 - T'$ pod teretom povećava, pa tim prije vrijede zaključci o mogućnosti pojednostavnjenja izraza za inducirani napon na izlazu opterećenog amplidina, koji su bili izvedeni pri razmatranju njegova praznog hoda. Dakle, može se uzeti:

$$e_3 \doteq E_3\left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right). \tag{22.b}$$



Sl. 6. Odziv amplidina u točnijoj i približnoj verziji računanja, za omjer vremenskih konstanta $T_2 : T' = 5 : 1$. Vrijedi u principu i za kaskadu

Da se stekne osjećaj o razlikama induciranog napona e_3 izračunatoga prema potpunoj relaciji (22.a) i prema pojednostavljenoj relaciji (22.b), nacrtan je na slici 6. vremenski tok obiju funkcija za omjer vremenskih konstanta $T_2 : T' = 5 : 1$. Dodatno su nacrtani i udjeli (utjecaji) svih pribrojnika iz jednadžbe (22.a).

8.4.2. Usporedba amplidina i kaskade

Amplidin ima kao pojačalo snage zaista vrlo dobra svojstva, veliko pojačanje i dobar, relativno kratak odziv. No, ima i mana. Prije svega tu je velika osjetljivost u pogonu (što je posebno važno), a i cijena mu je visoka, zbog specijalne gradnje i oštrih tehničkih

tolerancija izrade. Kako amplidin po osnovnoj fizikalnoj funkciji jako sliči kaskadi dvaju običnih strojeva, postavlja se pitanje nije li ekonomičnije uzeti takvu kaskadu, jer bi to moglo biti i jeftinije, a i u pogonu manje osjetljivo rješenje. Odgovor na to pitanje dat će samo usporedba svojstava obiju mogućnosti, i to svojstava kao pojačala, jer će se tek tako dobiti kompletni elementi za ocjenu.

Pojačanje snage u amplidinu, karakterizirano faktorom pojačanja snage, glasi po definiciji:

$$k_{\mathrm{pA}} = \frac{E_{30} I_3}{U_1 I_1} = \frac{E_{30}^2}{(R_3 + R_\mathrm{t}) U_1 I_1}.$$

Uvrstimo li vrijednosti za inducirani napon prema jednadžbi (8), razvija se taj izraz u:

$$k_{\mathrm{pA}} = \left[\frac{c n^2 (R_3 + R_\mathrm{t})}{R_3 + R_\mathrm{t} + c n^2 w_\mathrm{a} (1 - \nu)} \right]^2 \frac{(I_1 w_1)^2}{(R_3 + R_\mathrm{t}) U_1 I_1}.$$

Za potpuno kompenzirani amplidin ($\nu = 1$) može se pisati:

$$k_{\mathrm{pA}} = c^2 n^4 \frac{I_1 w_1^2}{(R_3 + R_\mathrm{t}) U_1}.$$

Budući da je $c = \dfrac{c_1 c_2 k_\mathrm{e}'^2 w_\mathrm{a}}{R_2}$ prema izvodu od izraza (2) do izraza (5), a uz $\dfrac{U_1}{I_1} = R_1$, dobiva se konačno:

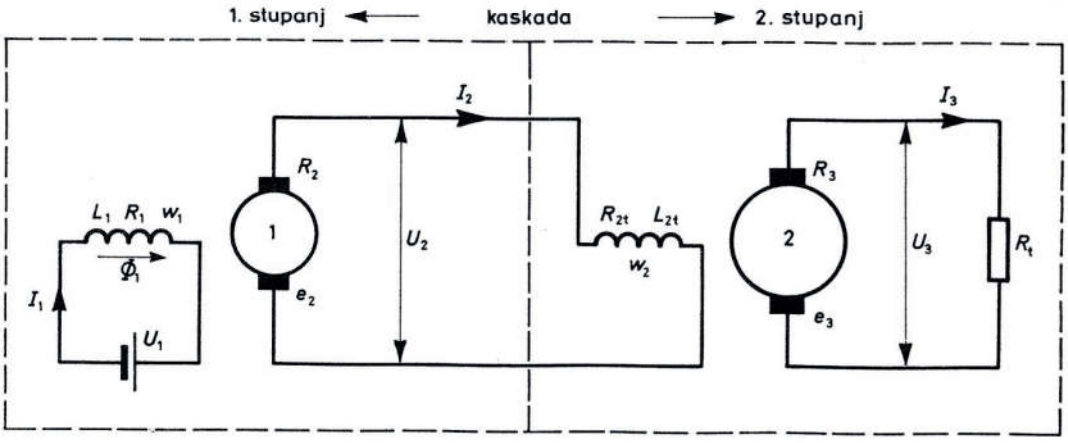
$$k_{\mathrm{pA}} = (c_1 c_2 k_\mathrm{e}'^2 n^2 w_1 w_\mathrm{a})^2 \frac{1}{R_2^2 (R_3 + R_\mathrm{t}) R_1}. \tag{23}$$

Potražimo na jednak način pojačanje snage kaskade. Uz pomoć u principu istih oznaka kao za amplidin, (uz ostale prema sl. 7) pišemo za faktor pojačanja snage kaskade:

$$k_{\mathrm{pK}} = \frac{E_{30} I_3}{U_1 I_1} = \frac{E_{30}^2}{(R_3 + R_\mathrm{t}) U_1 I_1}.$$

Do izraza za E_{30} u pogodnom obliku dolazimo na ovaj način: Magneuski tok u prvom stepenu kaskade (stroj 1 na sl. 7) iznosi (dakako za nezasićeno stanje):

$$\Phi_1 = c_1 \Theta_1 = c_1 i_1 w_1.$$



Sl. 7. Principna shema kaskade dvaju istosmjernih strojeva spojenih u pojačlo snage, s oznakama fizikalnih veličina (pogonsko stanje s teretom)

Taj tok inducira napon:

$$e_2 = k'_{e1} n_1 \Phi_1 = k'_{e1} n_1 c_1 i_1 w_1 = k'_{e1} n_1 c_1 \Theta_1,$$

pri čemu je s k'_{e1} označena poznata proporcionalnost, ali za stroj 1 na slici 7. Struja armature u prvom stepenu kaskade (i u uzbudi drugog stepena) je:

$$i_2 = \frac{e_2}{R_2 + R_{2t}} = \frac{c_1 k'_{e1} n_1 \Theta_1}{R_2 + R_{2t}}.$$

Tu je s R_{2t} označen otpor uzbude stroja 2 na slici 7, koji je teret u armaturnom krugu stroja 1. Ta struja stvara magnetski tok u drugom stepenu kaskade:

$$\Phi_2 = c_2 i_2 w_2 = \frac{c_1 c_2 k'_{e1} n_1 w_2}{R_2 + R_{2t}} \Theta_1,$$

pa izraz za inducirani napon u praznom hodu izlaza glasi:

$$e_{30} = k'_{e2} n_2 \Phi_2 = \frac{c_1 c_2 k'_{e1} k'_{e2} n_1 n_2 w_2}{R_2 + R_{2t}} \Theta_1.$$

Pri tome je s k'_{e2} označena poznata proporcionalnost za stroj 2 sa slike 7. Na osnovi toga je faktor pojačanja snage kaskade:

$$k_{pK} = \frac{(c_1 c_2 k'_{e1} k'_{e2} n_1 n_2 w_1 w_2)^2 I_1^2}{(R_2 + R_{2t})^2 (R_3 + R_t) U_1 I_1},$$

što sređeno poprima oblik:

$$k_{pK} = \left(\frac{c_1 c_2 k'_{e1} k'_{e2} n_1 n_2 w_1 w_2}{R_2 + R_{2t}} \right)^2 \frac{1}{(R_3 + R_t) R_1}. \tag{24}$$

Omjer faktora pojačanja snage amplidina i kaskade, tj. omjer izrazâ (23) i (24), bit će:

$$\frac{k_{pA}}{k_{pK}} = \frac{(c_1 c_2 k'^2_e n^2 w_1 w_a)^2 \dfrac{1}{R_2^2 (R_3 + R_t) R_1}}{\left(\dfrac{c_1 c_2 k'_{e1} k'_{e2} n_1 n_2 w_1 w_2}{R_2 + R_{2t}} \right)^2 \cdot \dfrac{1}{(R_3 + R_t) R_1}}. \tag{25}$$

Ne smijemo zaboraviti da se sve oznake u brojniku izraza (25) odnose na amplidin, a sve oznake u nazivniku na kaskadu. Zato jednake oznake *nemaju i istu numeričku vrijednost.* Označujemo, dalje, oznake koje se odnose na amplidin dodatnim indeksom A, a one za kaskadu indeksom K. Da dođemo do jasne usporedbe, pretpostavimo da su oba stroja kaskade jednako velika međusobno, a i s amplidinom, zatim da su slično građeni i da se vrte jednakom brzinom. Tad sigurno vrijedi:

a) $n_A = n_{1K} = n_{2K}$;

b) $k'_{eA} = k'_{e1K} = k'_{e2K}$;

c) $R_{1A} = R_{1K}$, $R_{2A} = R_{2K}$, $R_{3A} = R_{3K}$;

d) $c_{1A} w_{1A} = c_{1K} w_{1K}$, $c_{2A} w_{2A} = c_{2K} w_{2K}$.

Na osnovi toga izraz prelazi (25) u:

$$\frac{k_{pA}}{k_{pK}} = \left(\frac{R_{2K} + R_{2t}}{R_{pK}}\right)^2 \frac{R_{3K} + R_{tK}}{R_{3A} + R_{tA}}. \tag{25.a}$$

Pretpostavimo li za tren da teret u obje varijante može biti u principu isti, jer je riječ o jednako velikim strojevima i primjeni na istom objektu, tj. $R_{tA} = R_{tK}$, dobivamo:

$$\frac{k_{pA}}{k_{pK}} = \left(\frac{R_{2K} + R_{2t}}{R_{2A}}\right)^2$$

i uz pretpostavku *teorijski optimalnog* pojačanja u prvom stepenu kaskade $R_{2K} = R_{2t}$ izlazi konačno:

$$\frac{k_{pA}}{k_{pK}} = 4.$$

Međutim, pođe li se (uz dosad učinjene pretpostavke) od dodatne pretpostavke da je u teorijskom izlazu pojačala $E_3 I_3$ vrijednost I_3 nazivna struja, koju stroj uvijek može davati, i da je bit pojačanja u drugom stepenu kaskade u iznosu induciranog napona, može se za omjer izlaznih otpora pokazati:

$$\frac{R_{3K} + R_{tK}}{R_{3A} + R_{tA}} = \frac{\frac{E_{3K}}{I_{3K}}}{\frac{E_{3A}}{I_{3A}}} = \frac{E_{3K}}{E_{3A}} = \frac{k_{pk}}{k_{pA}},$$

pa kad se to uvrsti u relaciju (25.a), izlazi za idealni teorijski omjer stupnja pojačanja snage amplidina i kaskade:

$$\frac{k_{pA}}{k_{pK}} = \frac{R_{2K} + R_{2t}}{R_{2A}}, \tag{25.b}$$

te za maksimalno pojačanje u drugom stepenu kaskade:

$$\frac{k_{pA}}{k_{pK}} = 2.$$

Ali izgradnja prvog stepena pojačanja kaskade ne da se ostvariti uz uvjet maksimalnog pojačanja jer bi stroj u tom prvom stepenu trebao poništiti polovicu snage u vlastitome armaturnom otporu, što za veličine stroja koje dolaze u obzir nije ni približno moguće. Smanji li se stroj u prvom stepenu kaskade (suprotno uvodnim pretpostavkama) kako bi bio povoljniji omjer armaturnog otpora i otpora tereta, onda se opet gubi na pojačanju jer se smanjuju ostali elementi u jednadžbi (25). Ipak se pri konkretnom dimenzioniranju mogu naći neki optimumi koji leže negdje u području omjera otpora tereta i armature prvog stepena kaskade reda veličine 5 (pad napona cca 20 %). Uz sve ostalo izlazi praktički mogući omjer pojačanja snage amplidina i kaskade:

$$\frac{k_{pA}}{k_{pK}} \geq 10,$$

što vodi do zaključka da je pojačanje snage amplidina za red veličine veće od pojačanja kaskade!

Kako stoji s pitanjima odziva? Koja alternativa daje brže reakcije? Ustanovimo to promatranjem ponašanja obiju kombinacija pri uključenju primarne uzbude, a uz otvoreni

izlaz. Za amplidin je to već učinjeno, prema jednadžbama (16.a) i (22.a), pa ostaje da se još učini za kaskadu.

Za kaskadu se mogu pisati, u prilici uključenja primarnog kruga, i na osnovi već uvedenog sistema označivanja za sliku 7, ove tri jednadžbe stanja:

$$\text{(X)} \qquad U_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t};$$

$$\text{(XI)} \qquad e_2 = c_1 i_1 w_1 = i_2(R_2 + R_{2t}) + (L_2 + L_{2t}) \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t};$$

$$\text{(XII)} \qquad e_{30} = c_2 w_2 i_2 = i_3(R_3 + R_{3t}) + L_3 \frac{\mathrm{d}i_3}{\mathrm{d}t}.$$

Jednadžba (X) je uvjet naponske ravnoteže ulaznog kruga kaskade, tj. uzbude prvog stroja. Jednadžba (XI) daje uvjet naponske ravnoteže armaturnom krugu prvog stroja uključujući u njega i uzbudni krug drugog stroja. Jednadžba (XII) je izraz za inducirani napon izlaza (drugog stroja) kaskade u funkciji protjecanja od kojega nastaje. Pomnožimo li jednadžbu (X) s $\frac{w_1}{R_1} c_1$, dobivamo:

$$c_1 w_1 \frac{U_1}{R_1} = c_1 w_1 i_1 + c_1 w_1 T_1 \frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}.$$

Budući da je prema jednadžbi (VI) $c_1 w_1 i_1 = e_2$, a $\frac{U_1}{R_1} = I_1$ pa vrijedi $c_1 w_1 \frac{U_1}{R_1} = E_2$, može se prethodni izraz napisati i kao:

$$E_2 = e_2 + T_1 \frac{\mathrm{d}e_2}{\mathrm{d}t}.$$

U taj izraz uvrstimo jednadžbu (XI) za e_2 i njezinu derivaciju:

$$\frac{\mathrm{d}e_2}{\mathrm{d}t} = (R_2 + R_{2t}) \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + (L_2 + L_{2t}) \frac{\mathrm{d}^2 i_2}{\mathrm{d}t^2};$$

$$E_2 = (R_2 + R_{2t}) \left(i_2 + T_1 \frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} \right) + (L_2 + L_{2t}) \left(\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} + T_1 \frac{\mathrm{d}^2 i_2}{\mathrm{d}t^2} \right).$$

Ako pomnožimo tu jednadžbu s $\frac{w_2 c_2}{R_2 + R_{2t}}$, rezultat će biti:

$$\frac{E_2}{R_2 + R_{2t}} w_2 c_2 = i_2 w_2 c_2 + T_1 \frac{\mathrm{d}(i_2 w_2 c_2)}{\mathrm{d}t} + \frac{L_2 + L_{2t}}{R_2 + R_{2t}} \left[\frac{\mathrm{d}(i_2 w_2 c_2)}{\mathrm{d}t} + T_1 \frac{\mathrm{d}^2 (i_2 w_2 c_2)}{\mathrm{d}t^2} \right],$$

odnosno, budući da je omjer induktiviteta $(L_2 + L_{2t})$ i radnih otpora $(R_2 + R_{2t})$ vremenska konstanta T_2:

$$\frac{E_2}{R_2 + R_{2t}} w_2 c_2 = i_2 w_2 c_2 + (T_1 + T_2) \frac{\mathrm{d}(i_2 w_2 c_2)}{\mathrm{d}t} + T_1 T_2 \frac{\mathrm{d}^2 (i_2 w_2 c_2)}{\mathrm{d}t^2}.$$

Izraz $i_2 w_2 c_2$ je po jednadžbi (XII) e_{30}, a $\frac{E_2}{R_2 + R_{2t}} = I_2$. S time konačno izlazi, kad se supstituira u prethodni izraz:

$$E_{30} = e_{30} + (T_1 + T_2) \frac{\mathrm{d}e_{30}}{\mathrm{d}t} + T_1 T_2 \frac{\mathrm{d}^2 e_{30}}{\mathrm{d}t^2}. \qquad (26)$$

Budući da je formalni oblik jednadžbe (26) isti kao za amplidin, jednadžba (16), to je uz iste početne uvjete i rješenje formalno isto:

$$e_{30} = E_{30}\left(1 + \frac{T_1}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t}{T_2}}\right). \tag{26.a}$$

Sad je moguće usporediti vremenske konstante amplidina i ocijeniti odziv. Vremenske konstante ulaznih krugova, tj. T' amplidina i T_1 kaskade očito su jednake, za uvjete usporedbe iznesene u početku ovog odjeljka, $T_A = T_{1K}$. Međutim, s vremenskim konstantama armature prvog stroja kaskade T_{2K} i poprečnog kruga amplidina T_{2A} stoji nešto drukčije. Po definiciji su:

$$T_{2A} = \frac{L_2}{R_2}, \qquad T_{2K} = \frac{L_2 + L_{2t}}{R_2 + R_{2t}}.$$

Amplidinu predstavlja induktivitet L_2 glavni magnetski tok izlaznog kruga, a njegovo se rasipanje može gotovo zanemariti zbog odličnog ulančenja s namotom izlaza. Kaskadi je L_2 manje jer predstavlja samo induktivitet rasipnog toka armature prvog stroja kaskade. Ali je L_{2t}, koji predstavlja glavni magnetski tok i rasipne tokove uzbude drugog stroja kaskade, relativno veliko upravo zbog rasipnih tokova. Važan je, dakako, omjer induktiviteta i otpora, ali su L_{2t} i R_{2t} proporcionalni kvadratu broja zavoja uzbudnog namota, pa bez obzira na to kako je namotan uzbudni namot, odlučujući je odnos obuhvaćenoga magnetskog toka. Dakle, T_{2K} i T_{2A} su istog reda veličine, ali je ipak T_{2K} veće za utjecaj rasipnih induktivnih otpora, tj. približno za 20–30 %, tj:

$$T_{2K} > T_{2A}. \tag{27}$$

Između T_{2K} i T_{1K} vlada, dakle, sličan odnos kao između T_{2A} i T'_A, samo je omjer $\frac{T_{2K}}{T_{1K}}$ nešto veći od $\frac{T_{2A}}{T'_A}$. Na osnovi toga postaje zaključak o mogućnosti pojednostavnjenja izraza za inducirani napon izveden za amplidin još primjenljiviji za kaskadu, pa se izraz (26.a) može pisati kao:

$$e_{30} \doteq E_{30}\left(1 - e^{-\frac{t}{T_2}}\right). \tag{26.b}$$

I za kaskadu *kvalitativno* vrijedi slika 6.

Za sam odziv kaskade izlazi da je nešto sporiji od odziva amplidina, upravo zbog nešto veće odlučujuće vremenske konstante T_2.

Ako za ukupnu tehničku ocjenu vrijednosti amplidina i kaskade kao pojačala snage prihvatimo faktor dobrote, tj. omjer faktora pojačanja i vremenske konstante, onda je i on veći amplidinu za cijeli red veličine. Jer, budući da je:

$$\frac{k_{pA}}{k_{pK}} \geq 10, \text{ a } \frac{T_{2K}}{T_{2A}} \doteq 1{,}2 - 1{,}3,$$

vrijedi za omjer faktora dobrote amplidina i kaskade:

$$\frac{f_{dA}}{f_{dK}} \geq 12.$$

Tako je amplidin s gledišta tehničkih vrijednosti pojačanja izrazito najbolje strojno pojačalo snage. No budući da je kaskada jeftinija i manje osjetljiva, nalazi i ona svoje mjesto u praksi. Nju u raznim varijacijama detalja susrećemo i pod raznim nazivima pojedinih proizvođača (Rapidin i slično). Ostala strojna pojačala snage ne dostižu prednosti amplidina i kaskade, pa su danas u praksi gotovo napuštena.

8.5. Generatori za vagonsku rasvjetu i generatori za svarivanje

U dugom razvoju istosmjernih strojeva česta je bila pojava da sasvim specifična namjena dovede do pojave i razvoja specijalnih vrsta istosmjernih strojeva, specijalnih u smislu razjašnjenome u uvodu ovog poglavlja. Tako su nastale mnoge vrste specijalnih istosmjernih strojeva, od kojih su mnoge danas potpuno nezanimljive. U daljnjem izlaganju obradit ćemo, makar samo u osnovnim crtama, nekoliko vrsta prema dvjema namjenama koje još i danas imaju stanovito značenje, a to su specijalni generatori istosmjerne struje za vagonsku rasvjetu i specijalni generatori istosmjerne struje za svarivanje.

8.5.1. Generatori za vagonsku rasvjetu

Još prije tri desetljeća bili su svi izvori električne rasvjete, koju je na sebi nosio svaki putnički željeznički vagon, generatori istosmjerne struje, obično specijalne vrste, i u kombinaciji s akumulatorskom baterijom niskih napona (do 24 V). Mehaničku energiju (vrtnju) dobivali su od gibanja vagona (dakle, u krajnjemu, od lokomotive) i napajali su rasvjetu vagona. Akumulatorska baterija punila se u vožnji, a za vrijeme stajanja davala je električnu energiju za rasvjetu. Današnji moderniji vagoni zadržali su isti princip gradnje rasvjetnih agregata, samo s izmjeničnim generatorima (obično za jednofazni napon od 220 V), a veza s akumulatorskom baterijom ostvaruje se pomoću ispravljača i izmjenjivača uz električko upravljanje. Pri tome izmjenjivač u mirovanju impulsnim upravljanjem daje izmjenični napon koji se transformira na potrebnu visinu, a u kretanju se baterija puni (dakako preko pretvarača) iz izmjeničnoga generatora. No jednostavniji vagoni zadržali su stari istosmjerni sistem i još je znatna proizvodnja istosmjernih generatora, doduše više za zamjenu na postojećim vagonima nego za ugradnju u nove.

Od samog početka poželjno je bilo svojstvo takva generatora da ne mijenja struju (u znatnijem opsegu) kroz potrošač s promjenom brzine vrtnje n generatora, koja je proporcionalna brzini gibanja vlaka v (vagona). Sama činjenica paralelnog spoja baterije i stezaljki generatora nije najčešće bila dovoljna da se ostvari takav zahtjev. Prvi specijalni istosmjerni stroj razvijen s tom namjenom je *Rosenbergov (poredni) generator*. On je u osnovi preteča metadina, jer se koristi poprečnim četkicama, redovito kratko spojenima. Princip generatora vidi se na slici 1. Uzbuda je poredna, a za prikaz na toj slici odabrano je takvo stanje fizikalnih veličina (brzine vrtnje) kad akumulatorska baterija niti daje niti uzima struju, tj. kad generator daje struju samo potrošaču (rasvjeti) R_t i vlastitoj uzbudi. Poredna uzbuda stvara u uzdužnoj osi stroja magnetski tok Φ'_d, koji na kratko spojenim četkicama a i c inducira napon E_q. Taj će napon potjerati struju I_q, a ona u poprečnoj osi izaziva magnetski tok Φ_q. Da magnetski tok Φ_q bude što veći, grade se vrlo široke polne papuče (veliki faktor prekrivanja α), kako bi se povećala ukupna vodljivost poprečnoga magnetskog kruga λ_q. Napon na četkicama b, d, induciran magnetskim tokom Φ_q, vodi se na potrošač R_t paralelan naponu baterije. Na potrošaču napon iznosi:

$$U = IR_t = k'_e n \Phi_q - I_a R_a - \Delta U_č, \tag{1}$$

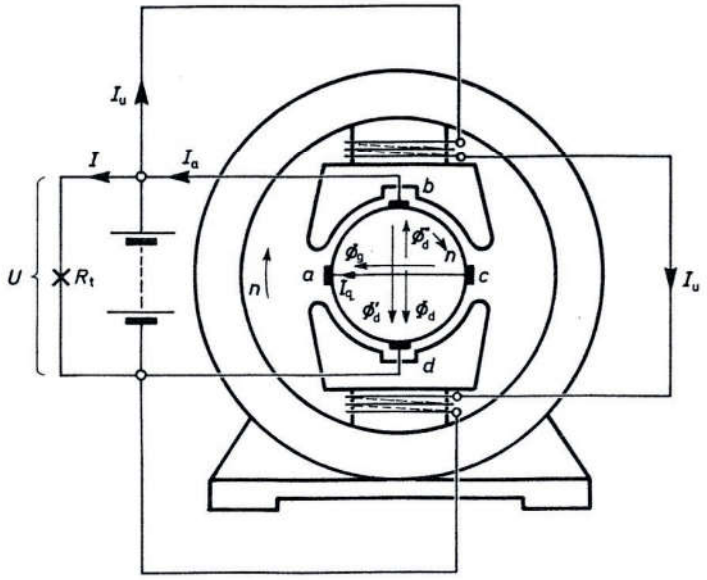
pri čemu je k'_e poznata konstanta ovisna o broju vodiča i vrsti namota stroja, a R_a je ukupni unutrašnji otpor stroja. Da struja I_a lakše komutira pod polovima, izrezane su polne papuče u zoni komutacije, tako da zbog povećanoga magnetskog otpora vlada manja

indukcija u toj zoni. Struja I_a stvara protjecanje u uzdužnoj osi stroja, koje bi protjeralo uzdužni magnetski tok Φ'_d suprotan toku uzrokovanome osnovnom uzbudom Φ'_d, tako da je ukupni tok u uzdužnoj osi:

$$\Phi_d = \Phi'_d - \Phi''_d. \tag{2}$$

Sve se to vidi iz oznaka na slici 1. Jednadžbu (2) možemo izraziti tako da na desnoj strani pišemo kao umnožak ukupne magnetske vodljivosti u uzdužnoj osi Λ_d i protjecanja:

$$\Phi_d = \Lambda_d(\Theta - I_a w'_a). \tag{3}$$



Sl. 1. Rosenbergov stroj za vagonsku rasvjetu

Tu je Θ protjecanje uzbudnog namota ($\Theta = w_u I_u$), a w'_a efektivni broj zavoja armature po polu reduciran faktorom f_n kojim se uzima u obzir da je armaturni namot raspodijeljen u prostoru i nije koncentriran kao primjerice uzbudni. Tako je:

$$w'_a = f_n \frac{k w_s}{2ap},$$

pri čemu je k broj kolektorskih lamela, w_s broj zavoja u jednom svitku, a broj pari paralelnih grana i p je broj pari polova. Budući da je $k w_s = \frac{z}{2}$, gdje je z ukupni broj vodiča, to će biti uz faktor namota f_n definiran u četvrtom poglavlju:

$$w'_a = \frac{2}{\pi} \frac{z}{2} \frac{1}{2ap} = \frac{z}{2\pi ap}. \tag{4}$$

Slično možemo i poprečni tok izraziti uz pomoć protjecanja:

$$\Phi_q = \Lambda_q I_q w'_a. \tag{5}$$

Inducirani napon u poprečnom krugu na četkicama a c troši se cijeli na pad napona unutar stroja, pa vrijedi:

$$E_q = k'_e n \Phi_d = I_q R_a. \tag{6}$$

Uz tako poznate prilike u stroju izrazimo struju potrošača iz jednadžbe (1), kad još s I_u označimo uzbudnu struju:

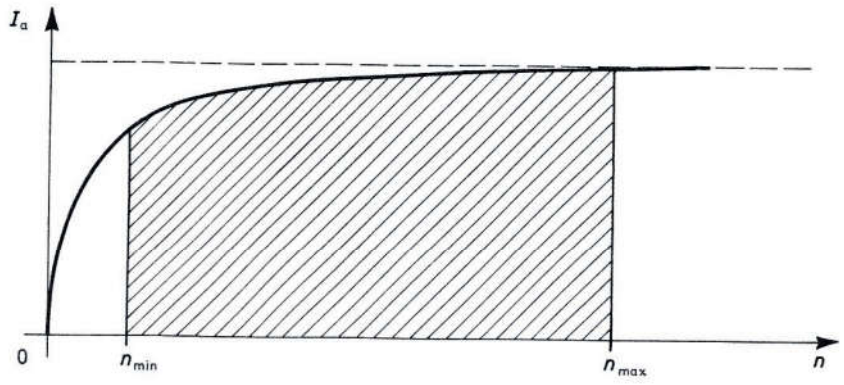
$$I = \frac{k'_e n \Phi_q - \Delta U_č - I_u R_a}{R_t + R_a}. \tag{7}$$

Sukcesivnom primjenom jednadžbi (5), (6) i (3) izraz (7) prelazi u:

$$I = \frac{k'^2_e n^2 \Lambda_q \Lambda_d w'_a \Theta + k'^2_e n^2 \Lambda_q \Lambda_d I_u w'^2_a - R_a \Delta U_č - I_u R^2_a}{R_a(R_a + R_t) + k'^2_e n^2 \Lambda_q \Lambda_d w'^2_a}. \tag{8}$$

Prva dva pribrojnika u brojniku tog izraza mnogostruko su veća po iznosu od druga dva, sve dok brzina vrtnje n nije sasvim mala (zaustavljanje, mirovanje, pokretanje vlaka). Pod tim je uvjetom i drugi član nazivnika mnogostruko veći od prvoga. Zanemarimo li, dakle (u vožnji), te male vrijednosti (kao da je $R_a \approx 0$), vrijedi:

$$I \doteq \frac{\Theta}{w'_a} - I_u, \rightarrow I_a \doteq \frac{\Theta}{w'_a}. \tag{9}$$



Sl. 2. Ovisnost struje Rosenbergova stroja o brzini vrtnje

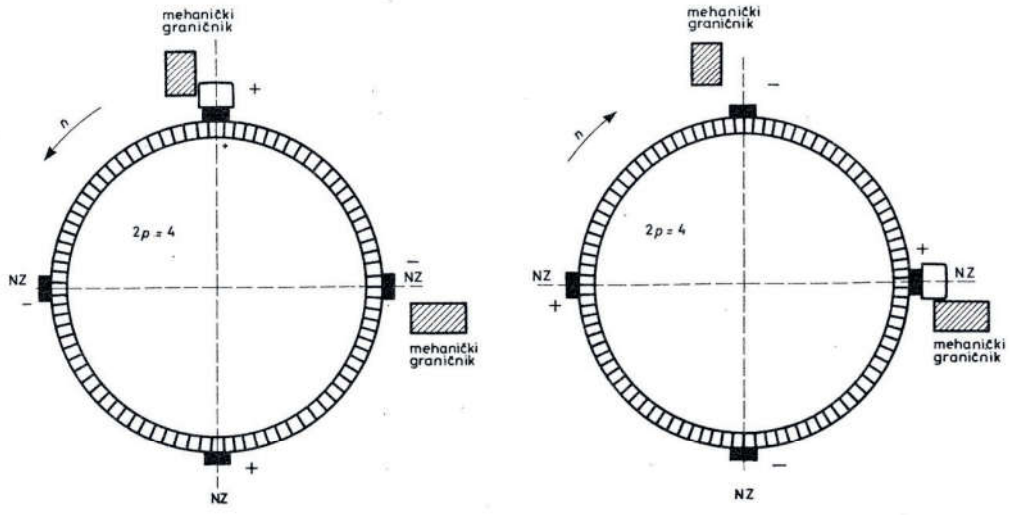
Struja je, dakle, proporcionalna uzbudi i ne ovisi o brzini vrtnje (vidi skicu na sl. 2) sve dok se ona ne približava vrijednosti $n \rightarrow 0$. Dakako, sve ima svoje granice. Ako je brzina vrtnje jednaka nuli ili je vrlo mala, ne može se više zanemariti unutrašnji otpor stroja R_a u jednadžbi (8), pa izraz (9) više ne vrijedi. Fizikalno to znači da s opadanjem brzine vozila nastupa trenutak kad je napon stroja niži od napona baterije. Tad će jedan relej, koji je osjetljiv na smjer struje I_a, iskopčati strujni krug generatora pa rasvjetu vozila u mirovanju opskrbljuje akumulatorska baterija, koja preuzima i uzbudu stroja, pa je bez tereta nezavisno uzbuđen.

Upotrebom stroja s poprečnim krugom osigurana su dva važna svojstva generatora za vagonsku rasvjetu. Prvo je praktički konstantna struja kroz potrošač; bolje rečeno, praktički konstantna između dviju brzina; n_{min}, pri kojoj se zbog sporog gibanja vlaka (utjecaj armaturnog otpora R_a) stroj iskopča, i n_{max}, koja je određena najvećom brzinom vlaka, dakle praktički s gledišta izvora struje za napajanje neograničena (može biti po volji velika). Dijagram struje ovisno o brzini vrtnje u principu prikazuje slika 2. To svojstvo konstantne struje zapravo je svojstvo praktički konstantnoga, o brzini vrtnje neovisnog napona. Fizikalno se to dade jednostavno protumačiti približnom konstantnosti poprečnog napona E_q, prema jednadžbi (6), koji bi težio porastu zbog povećanja brzine vrtnje, kad ne bi padao djelovanjem smanjenja uzdužnog toka Φ_d (zbog rasta protjecanja u

uzdužnoj osi i povećanja Φ'_d) koji se smanjuje baš zbog težnje rastu struje I_a kad napon E_q teži rastu zbog povećanja brzine. Dakle, djelovanjem zbog porasta brzine vrtnje kompenzira se protudjelovanje smanjenja ukupnoga uzdužnog protjecanja.

Drugo je svojstvo da je generator potpuno neosjetljiv na promjenu smjera brzine vrtnje (gibanje vlaka u dva smjera). Matematički je to očito iz jednadžbe (8) jer predznak struje terete pa i napona koji je tjera ovise o kvadratu brzine vrtnje n^2. Pridijelimo li brzini vrtnje n pri gibanju vlaka u jednom smjeru predznak plus, tad joj je pri gibanju vlaka u suprotnom smjeru pripada predznak minus, no kvadrat brzine vrtnje ima uvijek isti, pozitivni predznak. Fizikalno tumačenje je ovo. Ako osnovno protjecanje ima uvijek isti smisao (pretpostavka), u određenom će smjeru vrtnje (primjer na sl. 1) poprečni magnetski tok Φ_q imati smjer »ulijevo«, a u lijevom smjeru vrtnje smjer »udesno«, ali će uzdužni tok Φ'_d zadržati isti smisao u oba slučaja, pa onda i ukupni uzdužni tok Φ_d i napon na potrošaču (i stezaljkama uzbude!), čime je ujedno i potvrđena pretpostavka.

Budući da je stroj s poprečnim poljem skup i osjetljiv u pogonu, nastojao se zamijeniti jednostavnijim, običnim strojem, i tim je putem tekao i razvoj. Uz određeno zasićenje glavnoga magnetskog kruga i serijski namot na glavnim polovima koji ruši osnovnu uzbudu (protukompaundirani generator) može se približiti svojstvu da i takav izvor struje za rasvjetu vagona bude na sličan način neosjetljiv na promjenu brzine vrtnje (tj. da ima praktički konstantnu struju) kao i Rosenbergov generator. Tako je razvijeno mnoštvo varijacija stroja za vagonsku rasvjetu, u koje nećemo ulaziti. No običan stroj ne može sam po sebi biti neosjetljiv i na promjenu smjera vrtnje! I tu se znatno komplicira aparatura za ukapčanje i prekapčanje kombinacije generatora i akumulatorske baterije. To ne može biti samo obični o naponu ovisni relej, već mora imati i logiku za smisao vrtnje. Zato je posebno prikladna jedna domaća (»Rade Končar« – Rijeka) izvedba u kojoj se to složeno rješenje izbjegava automatskim mehaničkim prekapčanjem kad nastane promjena smjera gibanja vlaka. Da bi se u promjeni smjera vožnje, tj. u promjeni smjera vrtnje generatora, zadržao isti polaritet na (svim!) priključcima, generator je izgrađen s radijalno pomičnim okretnim nosačem četkica. Prilikom promjene smjera vrtnje postiže se, trenjem četkica o kolektor, automatsko premještanje nosača četkica, pa se one pomaknu za 180 električkih stupnjeva. Položaj četkica u neutralnoj zoni postiže se odgovarajućim mehaničkim graničnikom, kako to u principu prikazuje skica na slici 3. Ta jednostavna konstrukcija osigurava znatno višu pogonsku sigurnost (nema utjecaja trešnje na aparaturu) vrlo važnu za željeznički promet.

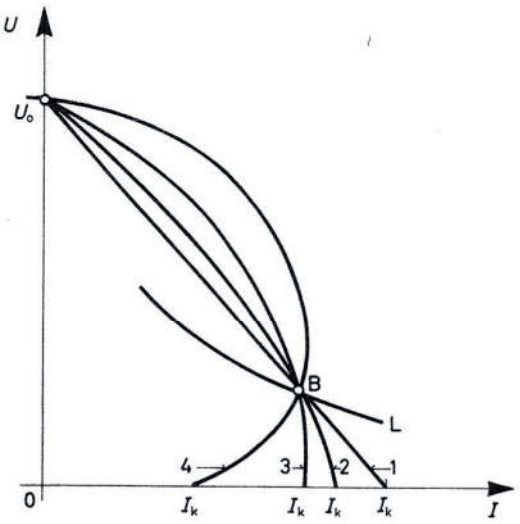


Sl. 3. Skica položaja četkica pri vrtnji u dva smjera generatora za vagonsku rasvjetu s okretnim nosačem držača četkica

8.5.2. Generatori za svarivanje

Generatori za svarivanje za razliku od onih za vagonsku rasvjetu nisu negdje na izmaku vlastite upotrebe. Iako se neprestano pojavljuju nove aparature za svarivanje (i istosmjernom strujom), kao što su transformatori s ispravljačima i ispravljačkim mostovima, ostaje na području tehnike zavarivanja jedan dio gdje su zbog oštrih tehničkih uvjeta nezamjenjivi generatori za svarivanje istosmjerne struje. Ovdje, dakako, nećemo ulaziti u tehniku svarivanja, no prijeko je potrebno ući u zahtjeve koji se postavljaju pred generatore za svarivanje u pogledu njihovih statičkih i dinamičkih svojstava.

Statičke karakteristike generatora za svarivanje, tj. kako bi bilo poželjno da one izgledaju, prikazuje slika 4. Na njoj krivulja označena s »L« predočuje idealiziranu strujno-naponsku karakteristiku nekoga električnog luka pri nekome određenom razmaku elektroda. Statička karakteristika svarnog generatora (vanjska karakteristika U, I) mora u odabranoj radnoj točki B imati veći nagib (jače opadati) od krivulje L kako bi se postigao (statički) stabilan rad. Krivulju 1 dalo bi se ostvariti napajanjem električnog luka iz čvrstoga (istosmjernog) naponskog izvora preko otpora određenog iznosa, dakle nezavisno uzbuđenim generatorom. Za krivulje 2 i 3 bio bi pogodan slabije ili jače protukompaundirani generator s nezavisnom kao osnovnom uzbudom. Krivulja 4 ostvaruje se protukompaundiranim generatorom s porednom uzbudom kao osnovnom, a u određenim uvjetima i samo s porednim generatorom. Čini se da bi krivulja 3 mogla biti optimalno rješenje jer struja ostaje gotovo konstantna između kratkog spoja i radne točke B, tj. u području gdje se pomiču krivulje L pri promjeni razmaka elektroda. Ipak se daje prednost obliku krivulje 2 jer se snaga za svarivanje ($U \cdot I$) u radnom području manje mijenja. Oblik krivulje 4 prihvatljiv je samo ako se struja od normalne radne točke do kratkog spoja vrlo malo

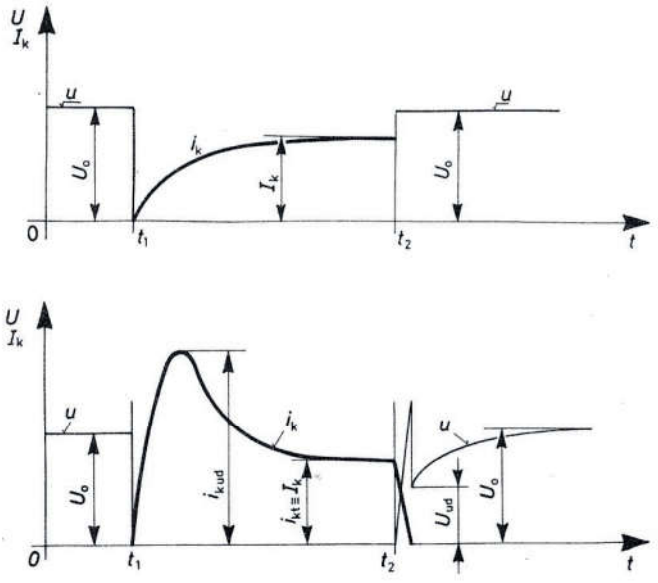


Sl. 4. Tipične statičke karakteristike stvarnoga generatora, 1, 2, 3 i 4; karakteristika luka L

mijenja. Izgleda na prvi pogled da bi se običnim istosmjernim generatorom moglo ostvariti stroj za svarivanje, no to, na žalost, nije moguće zbog zahtjeva povezanih s dinamičkim ponašanjem stroja (protukompaundirani generator, krivulje 2 i 3) ili golemih gubitaka snage u otpornicima (nezavisni generator uz nepovoljnu krivulju 1 na sl. 4). Ne valja zaboraviti na to da na slici 4. prikazane karakteristike vrijede samo uz nesmetani trajni pogon. Na detaljnije razmatranje nepovoljnosti rada s običnim protukompaundiranim generatorom još ćemo se vratiti.

Prijeđimo sad na upoznavanje dinamičkih i ostalih zahtjeva koji se postavljaju pred generatore za svarivanje. Proces zavarivanja teče približno ovako. Spajanjem elektroda prelazi generator naglo iz praznog hoda u kratki spoj. Razmicanjem elektroda nastaje luk koji se drži, ali kapljice metala u luku što se talože na varno mjesto stvaraju niz uzastopnih kratkih spojeva, luk se gasi i ponovno pali s velikom učestalošću. Armaturni krug generatora za svarivanje zbog toga se nalazi stalno u dinamičkom režimu prijelaznih procesa, i to sve zahtijeva veliku stabilnost sistema, posebnu otpornost na struje kratkog spoja i vrlo malu elektromagnetsku tromost. Upravo zbog toga posljednjeg zahtjeva za određene je vrste elektrolučnog svarivanja istosmjerni generator nezamjenjiv. Električno polje među elektrodama mora imati jakost polja reda veličine od 10^{10} do 10^{12} [Vm^{-1}] da se postigne samostalna elektronska emisija katode dovoljna za paljenje luka. Za paljenje luka potrebno je (zbog iznesenog uvjeta) da generator u praznom hodu ima napon od barem 30 V, a da se postigne sigurnost čovjeka (varioca), ne bi taj napon smio biti viši od 60 do 70 V. Uspostavljanje potrebnog napona (30 V) nakon prekida kratkog spoja ne bi smjelo trajati dulje od 0,05 s. I konačno, generatoru za svarivanje mora biti moguće podesiti (prije početka rada) struju kratkog spoja, obično u širokom rasponu. Kao reprezentant dinamičkih svojstava generatora za svarivanje uvedena je [L61, 5, 31] takozvana dinamička karakteristika: dijagram (prazni hod) – (kratki spoj) – (prazni hod), kraće PKP-dijagram. Takav dijagram za optimalno izgrađeni (idealni) stroj prikazuje slika 5.a. Sad je moguće obrazložiti zašto obični protukompaundirani generator kojim se postižu povoljne statičke karakteristike (krivulje 2 i 3 na sl. 3) ne zadovoljava dinamičke zahtjeve. Zbog čvrste magnetske veze između nezavisnog i (protu) serijskoga uzbudnog namota (što se može usporediti s dva namota na jednoj jezgri transformatora) nastupa djelovanje koje uzrokuje udarnu struju kratkog spoja (vidi sl. 5. b) znatno veću od trajne, a pri prekidu struje (kratkog spoja) presporo nestaje ta struja uz pojavu određenog prenapona. Zbog toga derivativnog djelovanja stroj za svarivanje nema potrebna dinamička svojstva. Ipak se princip (ali samo princip) upotrebe protukompaundnog namota susreće u nekim novijim verzijama generatora za svarivanje.

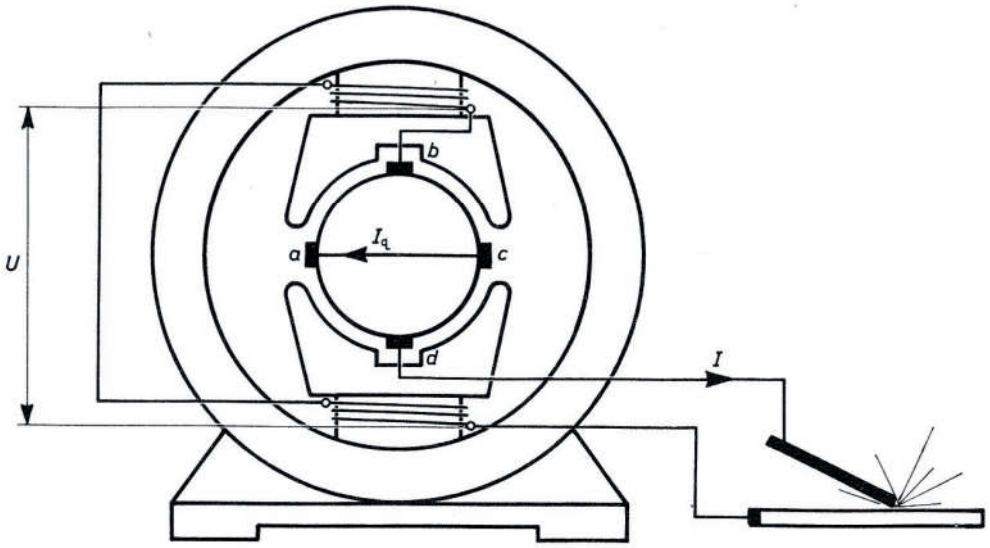
Potrebna statička i dinamička svojstva dovela su do razvoja mnogo vrsta istosmjernih strojeva za svarivanje, vjerojatno najvećeg broja specijalnih strojeva za jednu vrstu namjene, pa ćemo dalje u tekstu obraditi one od njih koji su fizikalno zanimljivi, bez obzira na to je su li moderni ili su relativno zastarjeli.



Sl. 5. Karakteristike PKP (prazni hod – kratki spoj – prazni hod) generatora za svarivanje; t_1 – trenutak nastanka kratkog spoja, t_2 – trenutak prekida kratkog spoja; a) dijagram za idealni svarni generator; b) dijagram za normalni protukompaundirani generator (nepovoljno)

8.5.2.1. Rosenbergov serijski generator za svarivanje

Rosenbergov stroj, ali poredni, poznajemo kao generator za rasvjetu vagona. On je poznat i kao prvi (dinamički) zadovoljavajući generator za svarivanje, ali u serijskom spoju, (vidi sl. 6). I tu je princip stroja s poprečnim poljem pružio mogućnost da se dobiju dobre statičke karakteristike i dobra dinamička svojstva. Obični serijski stroj (vidi vanjsku karakteristiku u 6. poglavlju) ne može dati napon u praznom hodu koji bi upalio luk u



Sl. 6. Rosenbergov stroj (serijski) kao svarni generator

kratkom spoju, bilo kako da mu je visok remanentni napon E_{rem}. No u stroju s poprečnim četkicama, zbog dvostrukoga uzastopnog ulančenja, taj je remanentni napon na izlazu dovoljno visok, a serijska karakteristika u području većih struja upravo je jednaka željenoj krivulji 2 sa slike 4. Izvedimo potrebne relacije. Prihvatimo oznake za Rosenbergov stroj iz odjeljka 8.5.1, pa prema jednadžbama (6) i (3) izlazi:

$$E_q = k'_e n \Phi_d = k'_e n \Lambda_d (I w_u - I w'_a) = I_q (R_a + R_d). \tag{10}$$

Razlike su samo u tome što su tu uzbudna i armaturna izlazna struja jednake jer je riječ o serijskom generatoru, i što se na desnoj strani pojavljuje otpor R_d (dodatni otpor) u kratkospojnome poprečnom krugu koji može, ali i ne mora, biti i na slici 6. nije ni ucrtan u poprečni strujni krug. Za inducirani napon u izlaznom krugu vrijedi:

$$E_d = k'_e n \Phi_q, \tag{11}$$

pa će uz pomoć jednadžbi (5) i (10) biti:

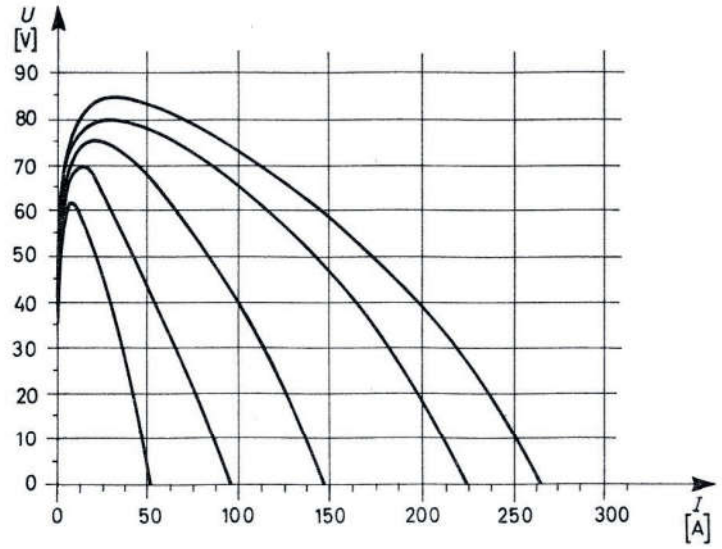
$$E_d = \frac{k'^2_e n^2}{R_a + R_d} \Lambda_q w'_a (\Lambda_d I w_u - \Lambda_d I w'_a). \tag{12}$$

Dobivamo, dalje, izlazni napon (napon na luku):

$$U = E_d - I(R_a + R_u) - \Delta U_č, \tag{13}$$

pri čemu je R_u otpor uzbudnog namota, a E_d inducirani napon prema jednadžbi (12). Uvrstimo li u jednadžbu (13) uvjet za prazni hod $I = 0$, slijedio bi i nulti napon, no zbog remanencije je to negdje reda veličine 30 V, kako je već rečeno. Iz izraza (13) dalje je jasno da pri malim strujama napon U raste jer je protjecanje uzbudnog namota Iw_u veće od protjecanja armaturnog namota Iw'_a (stroj još nije zasićen pa je razlika znatna). Međutim, s većim porastom struje vanjska se karakteristika ruši zbog četiri glavna razloga:

- pada uzdužna magnetska vodljivost zbog zasićenja zubi, zatim pola i jarma;
- jača reakcija armature i pada magnetski tok nastao od glavne uzbude;
- pojačava se rasipanje polova djelovanjem reakcije armature, pa se i zbog toga smanjuje dio uzdužnoga magnetskog toka koji sudjeluje u ulančenju;
- rastu padovi napona na otporima stroja.



Sl. 7. Tipična porodica statičkih karakteristika Rosenbergova svarnoga generatora

Karakteristike stroja vide se na slici 7. Naravno, ta se porodica karakteristika dobiva podešavanjem struje kratkog spoja. Podešavanje karakteristike izvodi se na Rosenbergovu svarnom generatoru na četiri načina:

a) pomicanjem poprečnih četkica a, c za određeni kut iz neutralne zone (vidi sl. 6);

b) dodavanjem otpora R_d u poprečni strujni krug (nije nacrtano na sl. 6);

c) mijenjanjem magnetskog otpora pola (obično jednoga) koji se s tim ciljem posebno gradi;

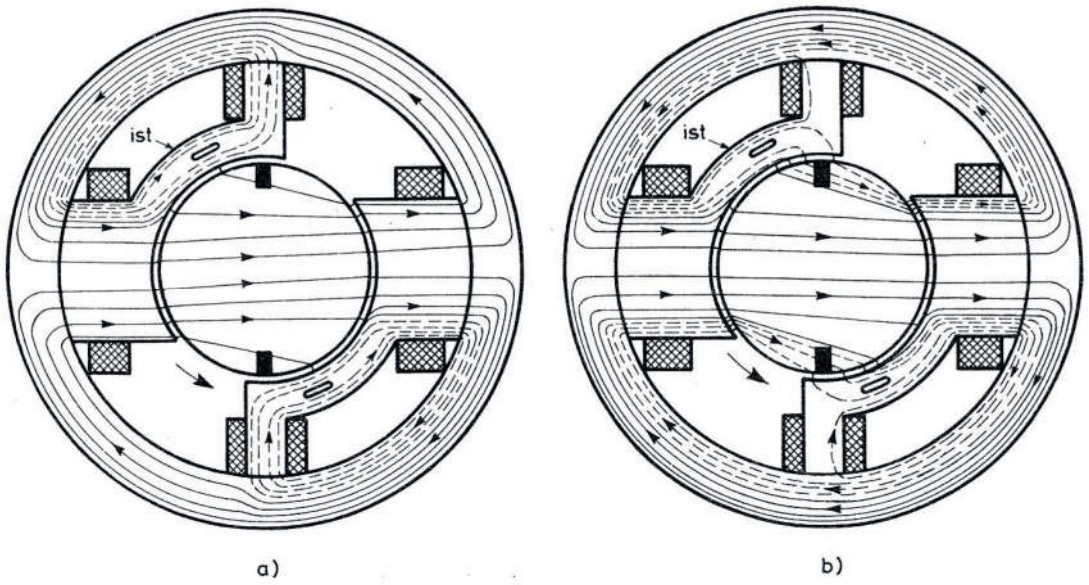
d) otcjepima na uzbudnom namotu stroja.

Naravno, moguće su i kombinacije dvaju načina podešavanja, a od njih je najefikasnija i daje najbolje rezultate kombinacija c) i d). Kako izgleda »pol za uranjanje« kojim se mijenja magnetski otpor, pokazat ćemo na jednoj od vrsta strojeva za svarivanje.

8.5.2.2. Svarni generator s rasipnim polovima

Budući da je općenito istosmjerni stroj s rasipnim polovima razvijen i izveden za cijelo mnoštvo namjena, od kojih nam je danas praktički ostala samo jedna – kao svarni generator, recimo uvodno nešto o osnovnoj zamisli stroja s rasipnim polovima i njegovim

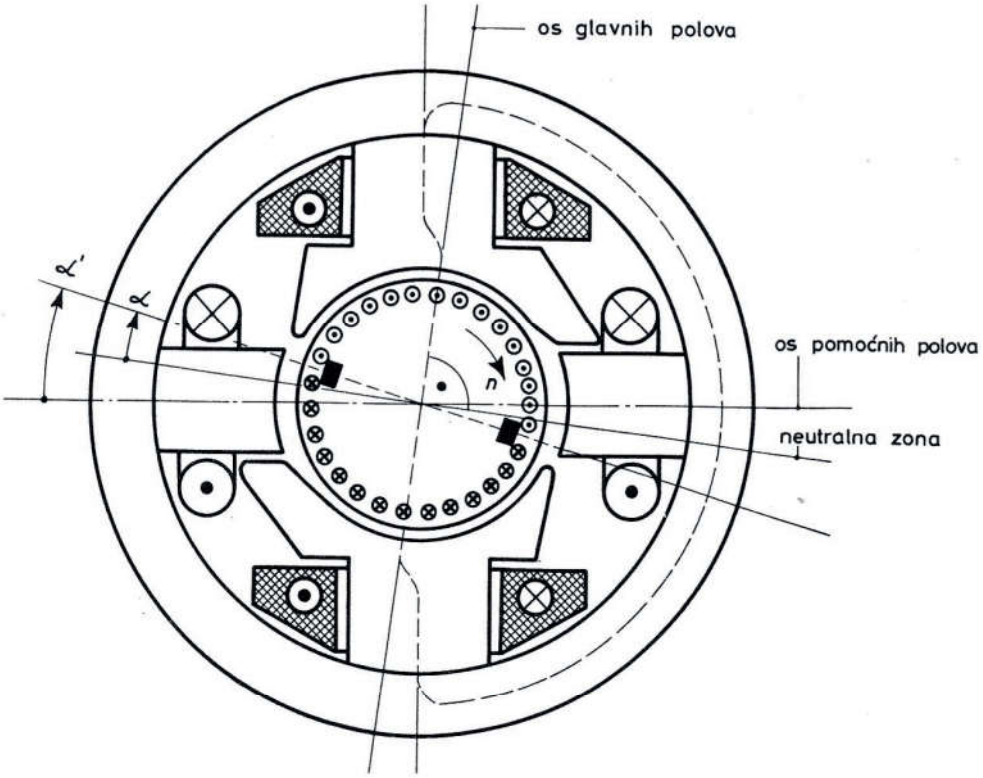
mogućnostima. Osnovna skica generatora s rasipnim polovima prikazana je na slici 8. Taj generator ima u neutralnoj zoni postavljene rasipne polove; rasipne u smislu mogućnosti povećavanja rasipanja glavnih polova, jer su željezne jezgre po jednome glavnom i rasipnom polu skupa spojene (vidi skicu na sl. 8). Namoti tih rasipnih polova spojeni su u seriju s armaturnim namotom. Skica na slici 8. a sadrži približni raspored magnetskog toka



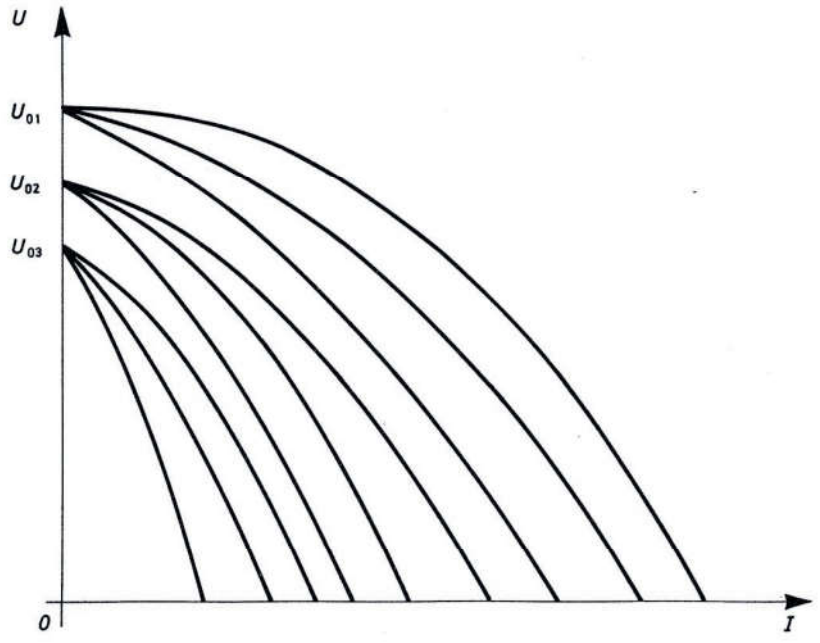
Sl. 8. Skica presjeka istosmjernog stroja s rasipnim polovima: a) u praznom hodu; b) pod opterećenjem za primjer kad rasipni polovi istiskuju magnetski tok

u praznom hodu. Dio ukupnoga magnetskog toka glavnih polova ne ulazi u praznom hodu u armaturu, već se vraća natrag u jaram preko *rasipnih polova*. Koliki će se dio magnetskog toka glavnih polova na taj način razasuti, tj. neće sudjelovati u induciranju napona, podešava se nekom vrstom *istmusa* u vodljivom putu rasipnih polova (vidi oznaku »ist« na slici). Pod teretom su rasipni polovi uzbuđeni i strujom armature, a mogu biti tako spojeni da ili *sišu* tok u sebe, tj. slabe ga u armaturi, ili ga *istiskuju* iz sebe, tj. jačaju ga u armaturi. Ima već prema smislu struje u namotima rasipnih polova, tj. prema spoju, različitih mogućnosti djelovanja i u motorskom i generatorskom radu. Na slici 8. prikazan je generator s rasipnim polovima koji pod teretom istiskuju tok iz sebe, tj. pod teretom inducirani napon takova generatora raste. To je slično djelovanju natkompaundacije kod istosmjernoga kompaundnog generatora i očito nije spoj pogodan da se njime ostvari karakteristika svarnoga generatora, već ima drugu namjenu, npr. kao generator za punjenje akumulatorskih baterija. Očito je za ostvarenje svarnoga generatora prijeko potrebno da rasipni polovi djeluju upravo na suprotan način. To se ostvaruje u spoju namota pri kojem se protjecanje glavnog i pomoćnog pola potpomažu, tako da rasipni pol uvlači magnetski tok u sebe i time slabi glavni magnetski tok, pa ga u kratkom spoju ostane malo. Posljedica je statička karakteristika koja odgovara svarnom agregatu, a dinamičke karakteristike, s obzirom na elektromagnetsku tromost zadovoljavaju, jer je prostorno magnetsko vezivanje (međuinduktivitet) glavnoga i rasipnoga relativno slabo. Modernije izvedbe svarnoga generatora izgledaju nešto drukčije. Jedna od njih predočena je skicom na slici 9. za dvopolni stroj presjek kojeg je prikazan slikom 9. vidi se kako je povećanjem polne papuče samo s jedne strane glavnog pola stvoren rasipni put glavnom toku. Uzdužna os stroja koja ide sredinom polnog luka glavnih polova nije više okomita na os pomoćnih

polova. Rasipni tokovi dvaju susjednih kvadranata stroja međusobno se jako razlikuju. Pod opterećenjem dio glavnoga magnetskog toka u praznom hodu odlazi rasipnim putem kroz pomoćne polove, pa je djelovanje slično (po posljedicama jednako) onome protukompaundnog namota na klasičnome istosmjernom stroju. Četkice su pomaknute iz neutralne zone za kut α, pa dio armaturnog protjecanja na luku kuta 2α djeluje suprotno



Sl. 9. Skica presjeka modernijega nezavisno uzbuđenog svarnoga generatora s rasipnim polovima



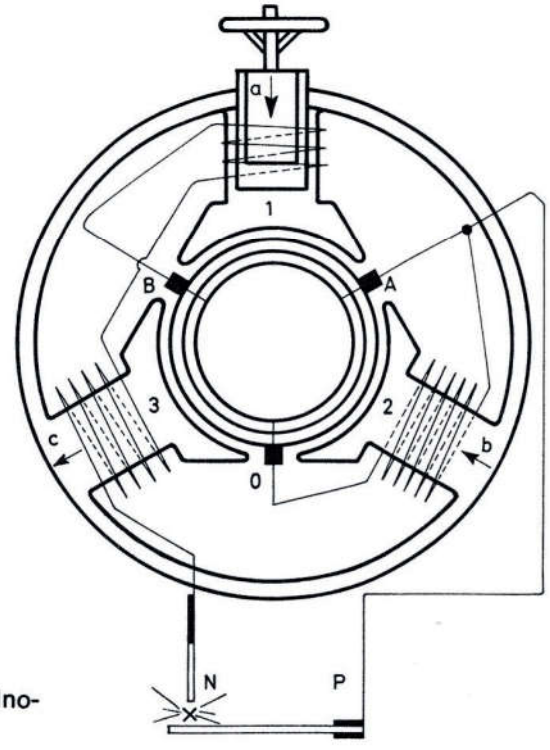
Sl. 10. Tipična porodica statičkih karakteristika za generator sa slike 9.

protjecanju glavnih polova, i tako se pod teretom dalje ruši glavni magnetski tok. I to je djelovanje slično onome protukompaundnog namota. Kombinacijom tih dvaju djelovanja postiže se poželjna statička karakteristika (krivulja 2 na sl. 4). Na slici 9. označena su za isti pomak četkica dva kuta pomaka, α i α'. Kut α je pomak prema neutralnoj zoni, a α' prema osi pomoćnih polova. Tako kad su četkice u električki neutralnoj zoni, već djeluje dio protjecanja armaturnog namota protukompaundirajuće. Podešavanje veličine struje kratkog spoja izvodi se pomakom četkica za kut α', što se može obavljati u cijeloj komutacijskoj zoni pod pomoćnim polovima. Pri tome se za pozitivne kutove (pomak) α' (u smislu vrtnje) struja kratkog spoja smanjuje, a za negativne se pomake (protivno smislu vrtnje) povećava. Otcjepima na uzbudnom namotu (ili promjenom struje u uzbudnom namotu, jer je stroj u osnovi nezavisno uzbuđen) također se podešava struja kratkog spoja. Na slici 10. pokazan je u principu tok statičkih karakteristika. Jasno se vide tri porodice tih karakteristika, koje u praznom hodu imaju napon U_{01}, U_{02} i U_{03}. Za svaku od tih porodica postižu se pojedinačne razne krivulje pomakom četkica.

8.5.2.3. Tropolni svarni generator

Princip rada svarnoga generatora s rasipnim polovima počiva zapravo na težnji da se ostvari protukompaundacija generatora, a izbjegne za dinamička svojstva nepovoljno čvrsto magnetsko vezivanje uzbudnog i protukompaundnog namota. U tom smislu još je povoljnija izvedba tropolnoga svarnoga generatora.

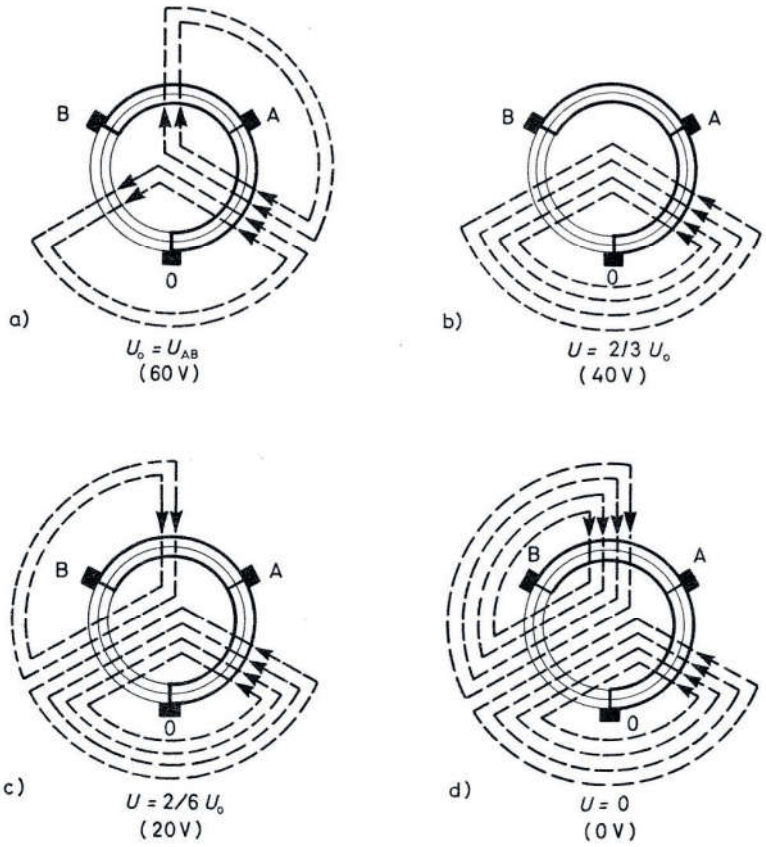
To je stroj s tri pola smještena pod kutom od 120°. Namot rotora mu je dvoslojan, s korakom od 120°. Na stroj su položene tri četkice u »neutralne« zone, dakle također razmaknute za 120°. Na slici 11. shematski su predočeni presjek i spoj stroja. Polovi su označeni s 1, 2, 3, a četkice s 0, A, B. Uzbudni je namot samo na polu 2, a priključen je na napon između četkica 0 i A, pa je u osnovi porednog karaktera. Stezaljke stroja P i N



Sl. 11. Skice presjeka i shema spoja tropolnoga svarnog generatora

priključene su na četkice A i B, s tim što su u seriju s armaturom spojeni uzbudni namoti polova 1 i 3 kojima teče struja armature. Spoj namota polova tako je izveden da smjer protjecanja, zbog struja koje njima teku, odgovara strelicama a, b i c na slici 11.

Opisat ćemo djelovanje stroja. U praznom hodu uzbudni namot stvara glavni magnetski tok, koji cijeli prolazi polom 2, a preko pola 1 zatvara se približno 1/2 toka, kao i preko pola 3. Predočimo taj tok silnicama kao na slici 12.a. Napon U_0 na četkicama A i B



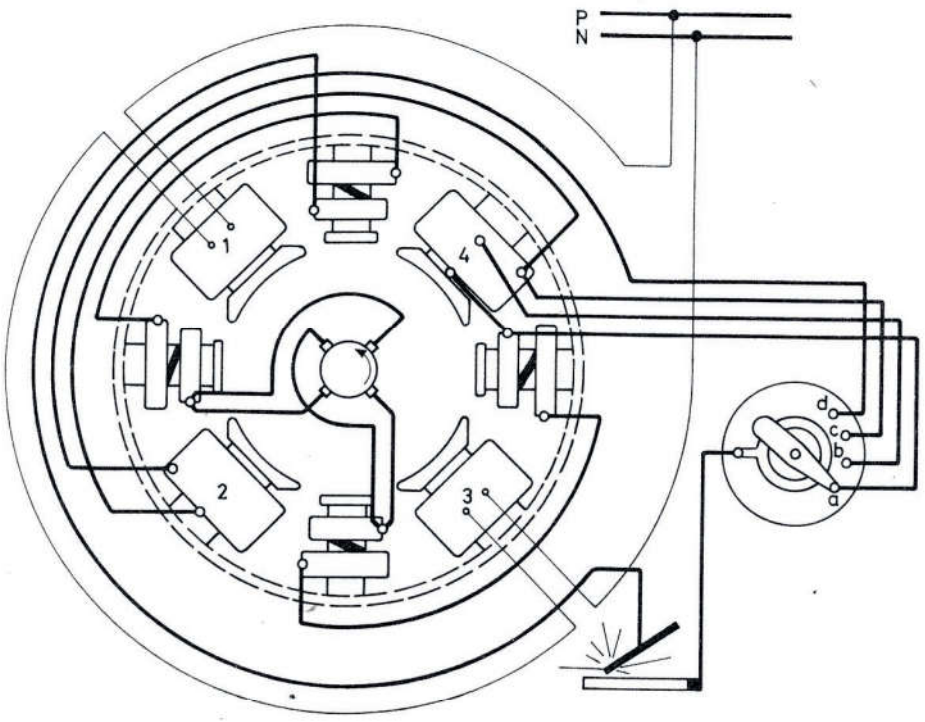
Sl. 12. Stanje magnetskog toka pri različitim opterećenjima tropolnoga generatora

(što je isto kao stezaljke P i N) inducira se samo u gornjem sloju namota pod polom 1 i u donjem sloju namota pod polom 2 (zato je i korak namota 120°). Dakle, U_0 je predočen sa šest silnica, i to četiri koje izlaze iz pola 2 i dvije koje ulaze u pol 1. Sad na stezaljke P i N priključimo teret, struja kojeg je upravo tolika da bi kroz polove 1 i 3 protjerala točno onoliki magnetski tok koliki u praznom hodu ulazi u pol 1. Zbog smjera djelovanja serijskoga uzbudnog namota taj je magnetski tok u polu 1 suprotan onome što ga tjera poredni uzbudni namot na polu 2. Rezultat je da polom 1 ne teče nikakav magnetski tok, što je prikazano na slici 12. b. Napon na četkicama A i B padne na 4/6 vrijednosti U_0, jer je tok što ga stvara predočen samo s četiri silnice koje izlaze iz pola 2. Podesimo li tad struju dvostruko veću od prethodne, dobit ćemo stanje prema slici 12. c. Serijski namoti ne samo da su poništili prijašnji magnetski tok u polu 1 nego su protjerali i novi u smjeru suprotnome onom u praznom hodu. Napon na stezaljkama pada na vrijednost 2/6 U_0 jer magnetski tok kroz pol 1 inducira u gornjem sloju djelatnog dijela namota napon suprotan onome koji u donjem sloju djelatnog namota inducira magnetski tok što izlazi iz pola 2. Na koncu, u kratkom spoju, gdje je napon stezaljki jednak nuli, struja će kratkog spoja narasti

točno do te veličine da magnetski tok u gornjem sloju namota među četkicama A i B inducira po iznosu točno jednak, a po smjeru suprotan napon onome što ga u donjem sloju namota inducira magnetski tok uzrokovan porednim uzbudnim namotom. Za taj slučaj vrijedi slika 12. d. Time se dobiva strma vanjska karakteristika svarnog generatora, koja opada gotovo po pravcu ovisno o porastu struje. Iznos struje kratkog spoja, a prema tome i iznos struje svarivanja, podešava se i mijenjajući magnetski otpor pola 1 mehaničkim uranjanjem jezgre pola, što se vidi na slici 11. Isti princip mijenjanja magnetskog otpora uranjanjem jezgre pola primjenjuje se i na nekim drugim vrstama svarnih generatora, npr. kako je već spomenuto, i na Rosenbergovu serijskom stroju. Tropolni svarni generator, iako danas praktički gotovo napušten, vrlo jasno pokazuje put kako se mogu magnetski odvojiti uzbudni i protukompaundni namot, čime se obilato koristilo u novijim rješenjima.

8.5.2.4. Svarni protukompaundirani generatori specijalne izvedbe

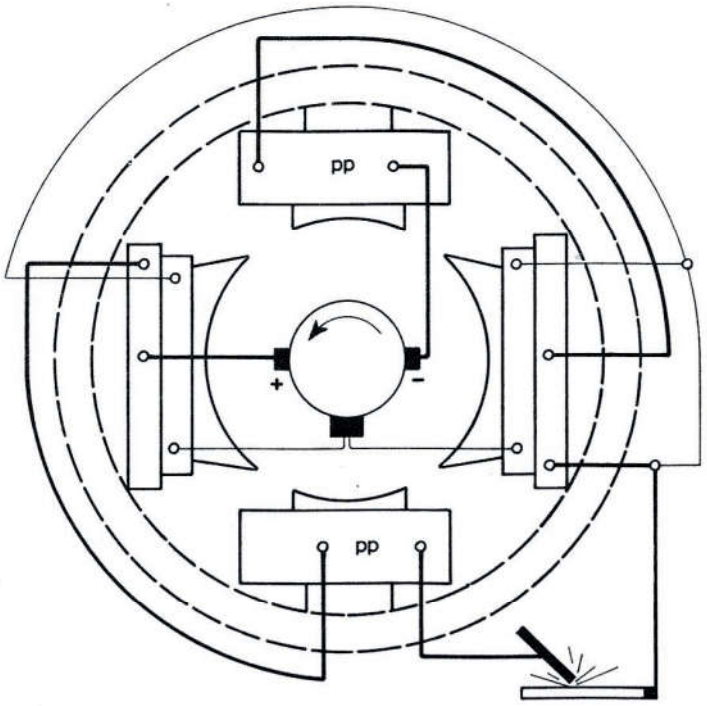
Razvoj je konačno doveo do modernih protukompaundiranih generatora koji se jednostavno koriste osnovnom uzbudom samo na nekim (glavnim) polovima, a serijskom protuuzbudom na drugima. Na slici 13. prikazuje se princip rješenja jednoga domaćeg (»Uljanik« – Pula) svarnog agregata. Svarni je generator četveropolni, s četiri glavna i četiri pomoćna pola. Osnovna uzbuda je nezavisna (izvor PN) i smještena je na samo dva nasuprot smještena glavna pola (1 i 3) na slici. Na druga dva glavna pola (2 i 4) nalaze se serijski protukompaundni namoti s otcjepima. Jakom preklopkom (vidi sl. 12) s četiri položaja uključuje se u armaturni krug veći ili manji dio serijskoga protukompaundnog



Sl. 13. Skice presjeka i shema spoja suvremenoga četveropolnog svarnoga generatora s preklopkom za podešavanje struje kratkog spoja. Na kontaktu a struja je najjača.

namota, što daje veće ili manje protjecanje serijskog namota i manju ili veću struju kratkog spoja. Time se ujedno podešavaju područja rada svarnog agregata i dobiva porodica statičkih karakteristika slična onoj na slici 10, ako se, dakako, još odgovarajuće podešava napon nezavisne uzbude, što se na modernom agregatu izvodi kontinuirano. Prikazanim rasporedom uzbudnih namota postiže se gotovo idealna dinamička karakteristika kao posljedica uspješnoga prostornog odvajanja nezavisnog i serijskog uzbudnog namota. Valja napomenuti da su na skici prikazanoj slikom 12, radi jasnijeg isticanja spoja namota unutar generatora, mehaničke dimenzije nacrtane nerealno. Jaram je statora samo crtkano prikazan, rotor se i ne vidi (izostavljen je) kolektor je ucrtan mnogostruko umanjen, a zračni je raspor jako povećan itd.

Usprkos svim prednostima svarnih agregata s dobrim dinamičkim svojstvima, koje se postižu opisanim načinima smanjenja međuinduktivne veze uzbudnih namota, i danas se grade svarni generatori na klasičan način, tj. kao običan, protukompaundirani stroj, kad se pred dinamičke karakteristike ne postavljaju najstroži zahtjevi. To je jednostavno, zbog toga što je takav generator jeftiniji. Jedno zanimljivo rješenje je samouzbudni protukompaundirani svarni generator s pomičnom četkicom, skicu kojeg, u principu, sadrži slika 14. To je također domaća izvedba (»Uljanik« – Pula). Generator je inače u osnovi



Sl. 14. Skice presjeka dvopolnoga samouzbudnog svarnoga generatora s pomičnom četkicom za podešavanje struje

običan dvopolni protukompaundirani generator s dva glavna i dva pomoćna pola i s izlazom svarnog napona na pozitivnoj i negativnoj četkici. No osnovni poredni samouzbudni namot spojen je samo na dio izlaznog napona. Vidi se na slici 14. da je negativni pol uzbudnog napona priključen na negativni pol armaturnog kruga, ali je pozitivni pol napona spojen na dodatnu, treću četkicu na kolektoru. Njezina je jedina funkcija da odvodi (dovodi) uzbudni napon na poredni namot. Pomicanjem te četkice po kolektoru kontinuirano se mijenja uzbudni napon, pa napon u praznom hodu i struja

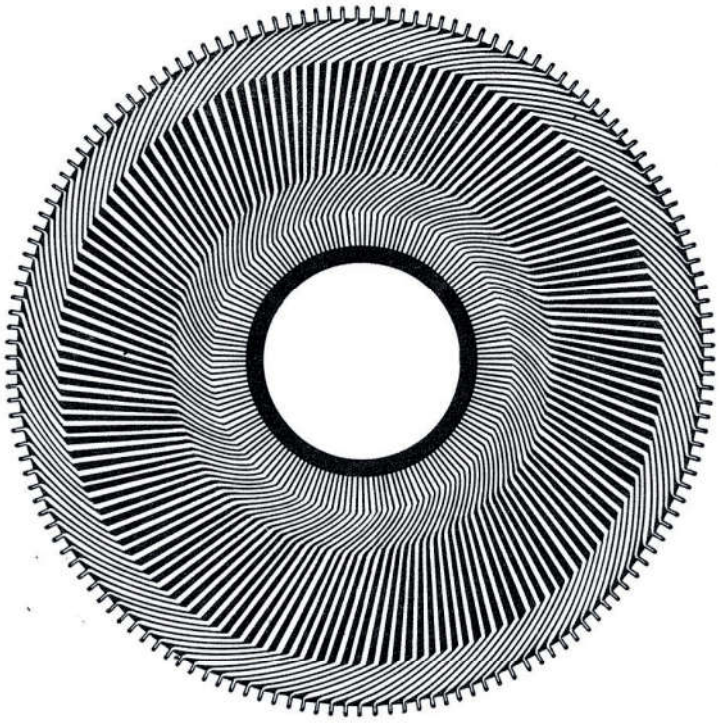
kratkog spoja. Inače za sam prikaz skice na slici 14. vrijedi sve ono rečeno za skicu na slici 13.

Sve vrste svarnih generatora obično su spojene s pogonskim motorom u svarni agregat. Pogonski je motor redovito trofazni asinhroni kavezni koji u modernijim izvedbama ima mogućnost priključka na sve uobičajene mrežne napone i frekvencije.

8.6. Motor s pločastim rotorom

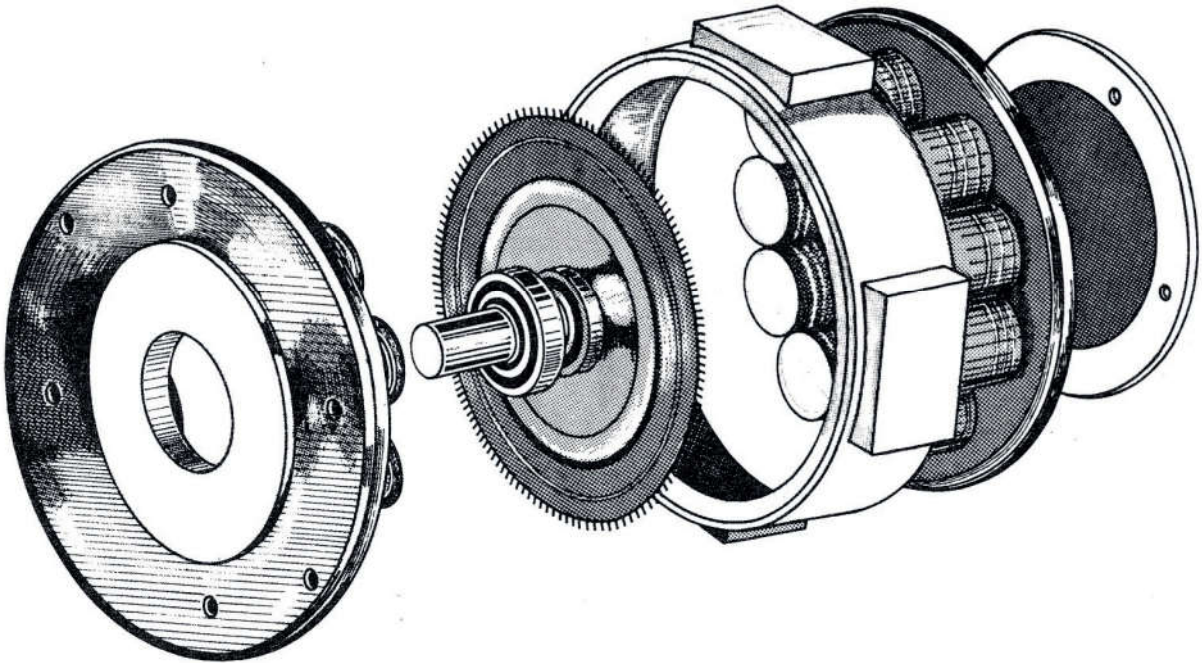
U motoru s pločastim rotorom klasični je princip ulančenja magnetskih tokova s namotima izveden na prostorno potpuno drukčiji način, i utoliko je taj motor specijalan.

Normalni istosmjerni motor ima takav geometrijski raspored glavnih dijelova da mu je zračni raspor zapravo zračni cilindar između primara i sekundara, a magnetski mu tok ulazi iz polova u armaturu, ulančuje armaturni namot i vraća se nanovo u primar. Pri tome on prolazi dva puta zračnim rasporom. Motor s pločastim rotorom ima drukčiji raspored. Sama armatura je relativno tanka ploča (disk) u koju je namot od bakra s jedne i druge strane utisnut i ulijepljen slično kao u električkim štampanim pločicama. Na slici 1. vidi se osnovni nacrt jedne strane takva rotora nakon što je već namot utisnut s obje strane. Jedna strana takva rotora nosi onaj dio namota koji u klasičnom motoru odgovara gornjem sloju dvoslojnog namota, a na drugoj je strani dio koji odgovara donjem sloju namota. Na vanjski i unutrašnji rub rotora zavareni su jedan po jedan vodiči s desne i lijeve strane diska, i tako je dobivena kompletna armatura s namotom po



Sl. 1. Armatura motora s pločastim rotorom; namot je utisnut, ulijepljen i spojen na vanjskom i unutrašnjem obodu diska

fizikalnom djelovanju identična onoj klasičnog motora. Tako »armatura« na slici 1. kao da ima $N = 151$ utor, zbog štapnog namota broj joj je svitaka po utoru $u = 1$, što odgovara broju kolektorskih lamela $k = 151$, i uz pet pari polova (vidi sl. 2) korak je svitka (uz vjerojatni valoviti namot) $y = 30$, a korak namota $y_1 = 15$ i spojni korak $y_2 = 15$. Petljasti namot dao bi očito izuzetno nizak napon motora.



Sl. 2. Motor s pločastim rotorom; uz tumačenje principa rada motora

Sa slike 2. uočavamo pet pari polova pričvršćenih na oba ležajna štita, koji su ujedno i jaram statora u magnetskom smislu. Četkice se na slici ne vide, ali su smještene s priključne strane diska i leže izravno na namotu u njegovu ravnom dijelu. Dakako, zračni je raspor aksijalan i magnetski tok polazeći iz N-polova s jedne strane prolazi prvim zračnim rasporom, armaturom i drugim zračnim rasporom, zatim se prelazeći jarmom u S-polove vraća istim aksijalnim putem na drugu stranu motora, gdje se preko jarma zatvara u početnim N-polovima. Polovi su okrugli i uzbudni su namoti na njima jednostavni koaksijalni svici. Ne ulazeći u pogonske teškoće, prednost je takva motora u vrlo jednostavnoj izradi, bolje rečeno niskoj cijeni uz serijsku proizvodnju. To, ali i neki pogonski problemi, ograničavaju mogućnost gradnje na strojeve male snage, no u praksi su se pojavile izvedbe i do nekoliko kilovata snage.

8.7. Zadaci i problemi

8.7.1. Zadaci

1. Za četveropolni motor s permanentnim magnetima snage od 20 kW, potrebno je dimenzionirati pomoćni (uzbudni) namot za magnetiziranje. O stroju su poznati ovi podaci: Permanentni magneti građeni su od materijala kao na slici

8.1–8. ili 8.1–9. Visina magneta u paru polova je $l_m = 0{,}12$ m. Magnetski napon za svaladavanje zračnog raspora u praznom hodu iznosi $V_{\delta 0} = 3400$ A, a magnetski naponi u željezu magnetskog kruga (osim permanentnih magneta) mogu se praktički zanemariti jer je stroj nezasićen. Srednja je dužina vodiča namota za magnetiziranje $l_v = 0{,}55$ m. Zadatak je da se:

a) odredi količina potrebnog bakra za izradu namota ako je trajanje magnetiziranja predviđeno na 2 [s], pri čemu se namot ne smije zagrijati za više od 50 °C.

b) izračuna broj zavoja namota po paru polova i presjek vodiča ako se namot za magnetiziranje napaja iz istosmjernog izvora s naponom od 200 [V].

2. Unipolarni stroj kao na slici 8.2–1. ima promjer rotora $D_a = 0{,}25$ m i aktivnu dužinu paketa limova $l = 0{,}3$ m. Odredite inducirani napon pri brzini vrtnje od 1500 min^{-1} ako je indukcija u zračnom rasporu 0,7 T.

3. Metadin-pretvarač s izraženim polovima bez namota na statoru napaja potrošač otpora od 2 Ω strujom od 50 A i pri tome uzima iz mreže konstantnog napona od 250 V struju od 22 A.

Kolika će biti približno struja i napon potrošača, te struja koju metadin uzima iz mreže, ako otpor potrošača povećamo na 3 Ω?

4. Amplidinu, potpuno kompenziranome u uzdužnoj i poprečnoj osi, unutrašnji je otpor namota rotora, pomoćnih polova i kompenzacijskog namota u izlaznom krugu 9,5 Ω, otpor namota rotora, serijskog i kompenzacijskog namota u poprečnom krugu 23 Ω, te otpor uzbudnog namota 350 Ω.

Karakteristika praznog hoda izlaznog stupnja ima oblik:

E(V)	220	260	290
I_2(A)	1	1,2	1,4

Karakteristika praznog hoda ulaznog stepena ima oblik:

E_2(V)	36	41	45,5
I_1(A)	0,02	0,024	0,028

Izračunajte faktor pojačanja snage amplidina za opterećenje otporom od 49 Ω i strujom od 4,5 A.

5. Za amplidin s podacima u 4. zadatku potrebno je odrediti:

a) kakav će biti napon na stezaljkama amplidina U ako promijenimo polaritet napona uzbude U_1;

b) koliki će biti napon U na stezaljkama amplidina uz isti uzbudni napon U_1 ako za pogon upotrijebimo šesteropolni asinhroni motor umjesto četveropolnoga;

c) kakav će biti napon na stezaljkama amplidina U ako promijenimo smjer vrtnje pogonskom motoru.

6. Za amplidin s pomoćnim polovima u izlaznom krugu, a bez pomoćnih polova u poprečnom krugu prema slici 8.3–3. valja nacrtati, a na temelju poznavanja fizikalnih zakona i principa rada amplidina:
a) raspored namota na statoru;
b) pojedinačno protjecanje svih namota.

8.7.2. Rješenja

1. Iz relativno oskudnih podataka valja uvodno ocijeniti potrebno protjecanje za magnetiziranje H_{mz}. Jakost magnetskog polja u permanentnim magnetima mora biti jednaka iznosu trostruke vrijednosti koercitivne sile H_c, za koju se sa slike 8.1–8. ili 8.1–9. vidi da iznosi 59 000 [Am^{-1}]. Pri takvom stanju bit će iznos indukcije u zračnom rasporu približno 30 % veći od onoga u praznom hodu, a magnetski napon u željenom dijelu magnetskog kruga (bez magneta) iznosit će, zbog znatnog zasićenja, približno 50 % onoga potrebnog za zračni raspor. Dakle, možemo približno računati:

$$\Theta_{mz} \doteq 3H_{mz}l_m + 1{,}5 \cdot 1{,}3 \cdot 2\ V_{\delta o},$$

$$\Theta_{mz} = 3 \cdot 59\,000 \cdot 0{,}12 + 1{,}5 \cdot 1{,}3 \cdot 3\,400 = 34\,500\ A.$$

a) Pretpostavimo namot s jednim zavojem $w_u = 1$ i strujom od 34 500 A. Zagrijanje pri magnetiziranju jednako je energiji gubitaka podijeljenoj toplinskim kapacitetom:

$$\vartheta = \frac{W_{Cu}}{m_{Cu}c_{Cu}} = \frac{I^2Rt}{l_v q_{Cu}\gamma_{Cu}c_{Cu}} = \frac{I^2(1 + \alpha\vartheta)l_v t}{\varkappa q_{Cu}l_v q_{Cu}c_{Cu}\gamma_{Cu}},$$

pri čemu je m_{Cu} masa bakra na paru polova, α temperaturni koeficijent otpora bakra $= 0{,}004$ [K^{-1}], q_{Cu} presjek bakra na paru polova, γ_{Cu} specifična masa bakra $= 8\,900$ [kgm^{-3}], c_{Cu} specifična toplina bakra 385 [Wskg^{-1}K^{-1}] i $\varkappa$ je specifična vodljivost bakra pri 20 °C.

Iz izraza za zagrijanje ϑ može se izračunati presjek bakra na paru polova (pazite na dimenzije!):

$$q_{Cu}\ [mm^2] = \sqrt{\frac{I^2(1 + \alpha\vartheta)t \cdot 10^6}{\vartheta\varkappa\gamma_{Cu}c_{Cu}}} = 540{,}9.$$

Masa bakra za uzbudne namote oba para polova je:

$$2 \cdot q_{Cu}l_v\gamma_{Cu}.$$

$$[m_{Cu} = 5{,}3\ kg]$$

b) Pretpostavimo da se svaki pár polova priključuje na 200 V, tj. dva para polova napajaju se paralelno:

$$U = IR = \frac{\Theta_{mz}}{w_u} \cdot \frac{(1 + \alpha\vartheta) l_v w_u^2}{\varkappa q_{Cu}}.$$

Iz toga će broj zavoja po paru polova biti:

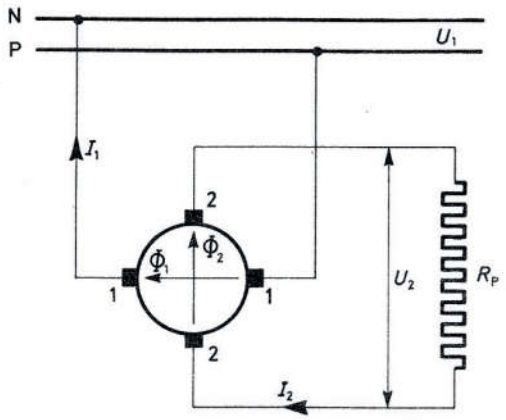
$$w_u = \frac{U \varkappa q_{Cu}}{\Theta_{mz}(1 + \alpha\vartheta) l_v}.$$

$$[w_u = 271;\ q_v = 2\ \text{mm}^2]$$

2. Magnetski tok iznosi $\Phi_{gl} = B_\delta D_a \pi l = 0{,}165$ Vs, a inducirani se napon izračunava iz jednadžbe (8.2–1).

$$[E = 4{,}13\ \text{V}]$$

3. Spojnu shemu metadin-pretvarača prikazje slika 1. U približnom razmatranju može se zanemariti unutrašnji otpor stroja te pretpostaviti da se korisnost stroja nije promijenila s promjenom tereta.



Sl. 1.

Nakon priključka stroja na mrežu konstantnog napona U_1 teče kroz četkice 1–1 i armaturni namot struja I_1. Prolaskom struje I_1 namotom armature stvara se magnetski tok Φ_1 proporcionalan struji, $\Phi_1 \therefore I_1$.

Zbog vrtnje metadin-pretvarača konstantnom brzinom n (uz pomoć nekoga pogonskog stroja) na četkicama 2–2 inducira se napon U_2 proporcionalan umnošku magnetskog toka Φ_1 i brzine vrtnje n:

$$U_2 \therefore \Phi_1 n \therefore I_1.$$

Kad je sekundarni strujni krug zatvoren potrošačem otpora R_p, napon U_2 šalje kroz njega struju I_2:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_p}.$$

Prolaskom struje I_2 kroz armaturni namot stvara se magnetski tok Φ_2 proporcionalan struji I_2, $\Phi_2 \therefore I_2$. Zbog vrtnje stroja brzinom n na četkicama 1–1 inducira se napon U'_1, koji drži ravnotežu narinutom naponu mreže U_1. napon U'_1 proporcionalan je Φ_2 i n, tj.:

$$U'_1 \therefore \Phi_2 n \therefore I_2.$$

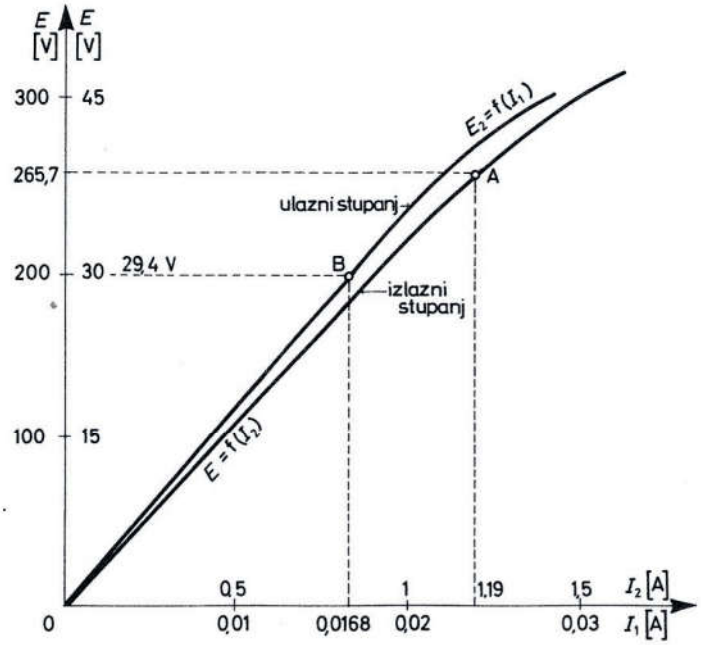
Iz razloženoga izlazi da se uz konstantan napon mreže U_1, sekundarna struja I_2 i struja mreže I_1 mijenjaju linearno s promjenom otpora potrošača R_p. Dakle $U_2 = I_2 R_p = 50 \cdot 2 = 100$ V. Nakon promjene otpora R_p dobivamo:

$$U'_2 = I_2 R'_p, \qquad I'_1 = I_1 \frac{U'_2}{U_2}.$$

$$[I'_1 = 33 \text{ A}; \qquad U'_2 = 150 \text{ V}]$$

4. Karakteristike praznog hoda ulaznog stepena $E_2 = f(I_1)$ i izlaznog stepena $E = f(I_2)$ nacrtane su na slici 2. Shema spoja amplidina s oznakama električnih i magnetskih veličina prikazana je na slici 8.3–2. Napon na potrošačkom otproniku iznosi:

$$U = IR_p = 4{,}5 \cdot 49 = 221 \text{ V}.$$



Sl. 2.

Pretpostavimo li pad napona na četkicama od 2 V, računamo inducirani napon u izlaznom krugu ($R_u = 9{,}5$ V!):

$$E = U + IR_u + \Delta U_č = 265{,}7 \text{ V}.$$

Struju u poprečnom krugu, potrebnu za induciranje napona E, otčitavamo s krivulje $E = f(I_2)$ na slici 2 (radna točka A), i ona iznosi $I_2 = 1{,}19$ A. Da poprečnom granom poteče ta struja, potrebno je da inducirani napon E_2 bude:

$$E_2 = I_2 R_{u2} + \Delta U_č = 1{,}19 \cdot 23 + 2 = 29{,}4 \text{ V}.$$

Struju u ulaznom krugu (stupnju) potrebnu za induciranje napona E_2 otčitavamo s krivulje $E_2 = f(I_1)$ na slici 2 (radna točka B), i ona iznosi $I_1 = 0{,}0168$ A. Za uzbudni napon dobivamo:

$$U_1 = I_1 R_1 = 0{,}0168 \cdot 350 = 5{,}88 \text{ V}.$$

Faktor pojačanja snage je omjer izlazne i ulazne snage:

$$k_p = \frac{UI}{U_1 I_1}.$$

$$[k_p = 10\,000]$$

5. a) Ako promijenimo polaritet napona uzbude U_1 prema shemi na slici 8.3.–3, promijenit će se smjer struje I_1 i smjer magnetskog toka uzdužne grane. Inducirani napon E_2 mijenja polaritet, a zbog toga mijenjaju smjer struja I_2 i magnetski tok poprečne grane. Uz isti smjer vrtnje E izlaznog kruga induciran magnetskim tokom u poprečnoj grani promijenit će se polaritet. [Ako amplidinu uz nepromijenjen smjer vrtnje promijenimo polaritet uzbudnog napona, mijenja se i polaritet napona na stezaljkama amplidina u izlaznom krugu.]

b) Priključkom uzbudnog namota na napon $U_1 = 5{,}88$ V uzbudna struja $I_1 = 0{,}0168$ A ostaje nepromijenjena. Inducirani napon E_2 u poprečnoj grani mijenja se linearno s brzinom vrtnje i iznosi:

$$E'_2 = E_2 \frac{n'}{n} = E_2 \frac{p}{p'} = 29{,}4 \frac{4}{6} = 19{,}6 \text{ V}.$$

Struja I'_2 koju u poprečnoj grani uzrokuje inducirani napon E_2 bit će:

$$I'_2 = \frac{E'_2 - \Delta U_č}{R_{u2}} = \frac{19{,}6 - 2}{23} = 0{,}765 \text{ A}.$$

S karakteristike praznog hoda izlaznog stupnja $E = f(I_2)$ na slici 2. uz nepromijenjenu brzinu vrtnje otčitavamo inducirani napon E'' za struju $I'_2 = 0{,}765$ A, i ona iznosi $E'' = 212$ V. Uz promijenjenu brzinu vrtnje bit će novi inducirani napon:

$$E' = E'' \frac{n'}{n} = E'' \frac{p}{p'} = 212 \frac{4}{6} = 142 \text{ V}.$$

Uz otpor potrošača $R_p = 49\ \Omega$ struja I' u izlaznom krugu iznosit će:

$$I' = \frac{E' - \Delta U_č}{R_p + R_u} = \frac{142 - 2}{49 + 9{,}5} = 2{,}4 \text{ A}.$$

Tad je napon na izlaznim stezaljkama amplidina:

$$U' = E' - \Delta U_č - I'R_u.$$

$$[U' = 117\ \text{V}]$$

c) Ako uz isti polaritet uzbudnog napona U_1 promijenimo smjer vrtnje amplidina, istim razmatranjem kao u točki a) dobivamo: Struja I_1 i magnetski tok uzdužne grane ne mijenjaju smjer. Inducirani napon E_2 u poprečnoj grani mijenja polaritet, a zbog toga mijenjaju smjer struja I_2 i magnetski tok poprečne grane. Uz promijenjeni smjer vrtnje i promijenjeni smjer magnetskog toka poprečne grane, inducirani napon E u izlaznom krugu ostaje istog polariteta.

[Ako amplidinu promijenimo smjer vrtnje uz nepromijenjen polaritet uzbudnog napona, ne mijenja se polaritet napona na stezaljkama amplidina u izlaznom krugu.]

6. Na slici 3.a nacrtan je raspored namota statora i rotora s naznakom smjera struje, i to: 1C1 – 1C2 uzdužna kompenzacija s pomoćnim polovima B1 – B2, 2C1 – 2C2 poprečna kompenzacija bez pomoćnih polova, D1 – D2 serijski namot poprečnog kruga, F1 – F2 uzbudni namot, 2A1 – 2A2 rotorski namot protjecan strujom poprečnog kruga i 1A1 – 1A2 rotorski namot protjecan strujom izlaznog kruga.

Na slici 3.b nacrtana su pojedinačna protjecanja svih namota.

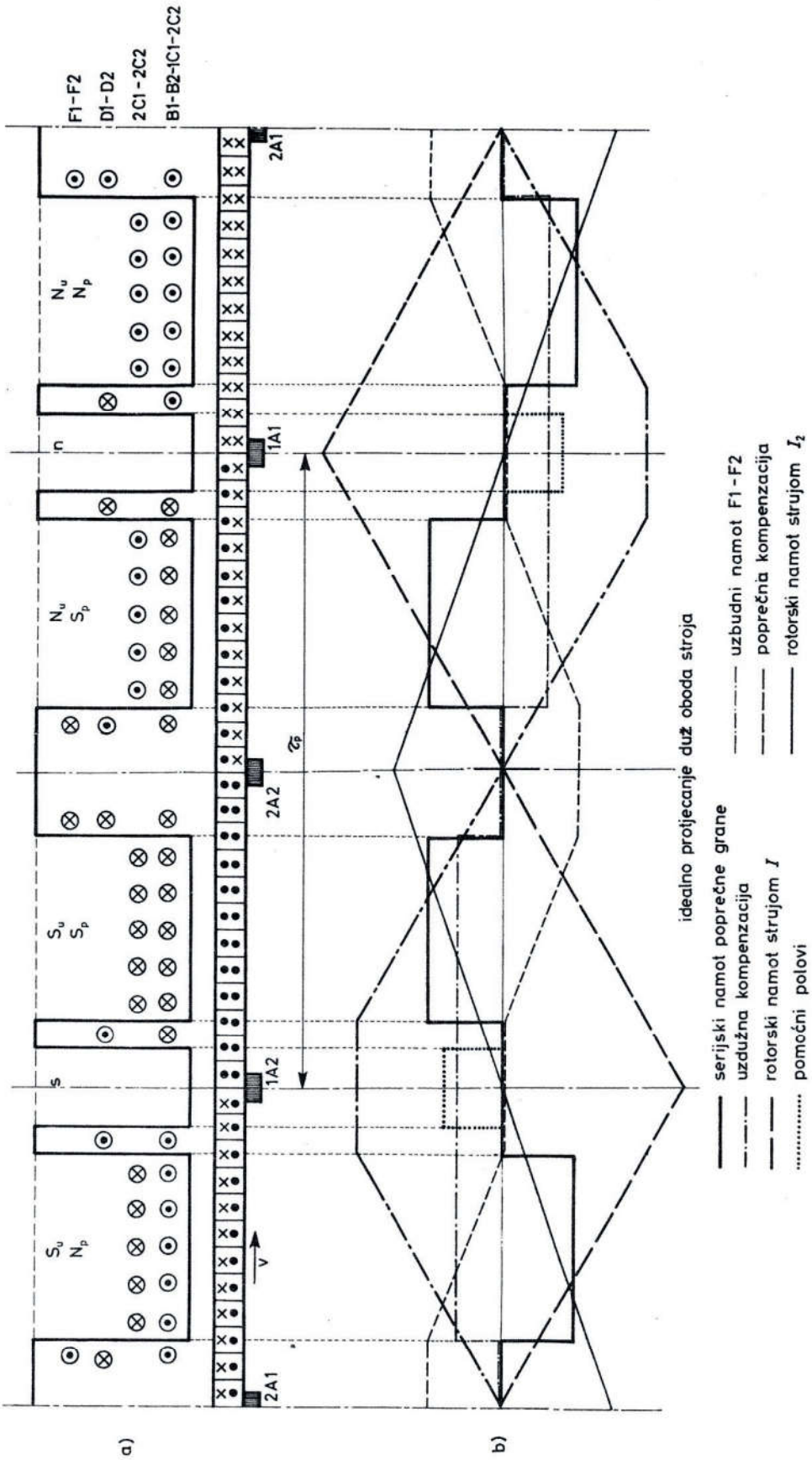
Na osnovi sheme sa slike 8.3 – 3. najprije crtamo protjecanje uzbudnog namota F1 – F2, koje djeluje na dužini $\alpha\tau_p$ i stvara u struji sjeverni i južni magnetski pol označen s N_u i S_u. Prema smjeru vrtnje određujemo smjer induciranog napona E_2 i struju I_2 u namotu rotora, a zatim protjecanje namota rotora strujom I_2 prema četkicama 2A1 – 2A2. Protjecanje serijskog namota D1 – D2 u poprečnoj grani mora djelovati u smjeru protjecanja rotora, a protjecanje kompenzacijskog namota 2C1 – 2C2 u smjeru suprotnome protjecanju rotora strujom I_2. Pri rasporedu serijskog namota treba voditi računa o tome da on ne smije svojim protjecanjem djelovati ni u jednoj komutacijskoj zoni. Zato serijski namot D1 – D2 obuhvaća samo pola polnog koraka.

Protjecanje rotora i serijskog namota strujom I_2 stvara poprečni tok sa sjevernim i južnim polom, N_p i S_p. Prema smjeru vrtnje određujemo smjer induciranog napona E i struje I u namotu rotora, a zatim protjecanje namota rotora strujom I prema četkicama 1A1 – 1A2. Protjecanje kompenzacijskog namota u uzdužnom smjeru (izlazni krug) i namota pomoćnih polova izlaznog kruga B1 – B2 – 1C1 – 1C2 mora djelovati u smjeru suprotnome protjecanju rotora strujom I.

Protjecanje uzbudnog namota F1 – F2, koje djeluje u komutacijskoj zoni četkica 1A1 – 1A2, praktički ne stvara nikakav magnetski tok u krugu pomoćnih polova izlaznog kruga jer je protjecanje namota F1 – F2 jako malo prema razlici protjecanja namota B1 – B2 – 1C1 – 1C2 i namota 1A1 – 1A2.

Iz nacrtanog rasporeda namota i njihovih protjecanja vidi se da amplidin odgovara dvama istosmjernim strojevima sjedinjenima u jedan.

[Sl. 3.a, 3.b]


F1-F2
D1-D2
2C1-2C2
B1-B2-1C1-2C2
2A1
1A1
2A2
1A2
v
a)
b)
idealno protjecanje duž oboda stroja
serijski namot poprečne grane
uzdužna kompenzacija
rotorski namot strujom I
pomoćni polovi
uzbudni namot F1-F2
poprečna kompenzacija
rotorski namot strujom I2

Sl. 3.

9. GRANIČNE SNAGE ISTOSMJERNIH STROJEVA

Granična snaga električkog stroja znači najveću trajnu snagu stroja izgrađenoga u jednoj jedinici od jednog statora i rotora, koja se može ostvariti uz postojeće tehničke i tehnološke uvjete. Mogućnost je gradnje stroja granične snage, dakle, funkcija tehničkog razvoja i stupnja tehnološkog stanja društva. Ima jakih razloga za gradnju strojeva granične snage. S jedne strane, tako, neprekidno raste potreba za energijom, čak brže od ostalih osnovnih društvenih potreba, a, s druge strane, važna je činjenica da je jedinica snage u električkom stroju to jeftinija što je stroj veći.

Električkom su stroju dijelovi izvrgnuti raznim naprezanjima. Zbog elektromagnetskih sila i gibanja pojedinih dijelova pojavljuju se mehanička naprezanja. Ona nastala uslijed razlike potencijala namota i mase stroja su električka (dielektrička) naprezanja u izolaciji, a nastala zbog raznih gubitaka u aktivnim dijelovima, pa i zbog gibanja, toplinska naprezanja. Materijali koji se odabiru za gradnju odlikuju se svojom čvrstoćom ili otpornošću na određenu vrstu naprezanja. Međutim, svako specifično naprezanje ima neku granicu za konkretni materijal, koja se ne smije prekoračiti zbog opasnosti od havarije. Ta granična naprezanja uvjetuju ograničenja pri konstruiranju stroja, i u određivanju veličine raznih specifičnih opterećenja pojedinog dijela stroja i u kompleksnom dimenzioniranju. Budući da se neprekidno razvija tehnologija materijala i stvaraju novi materijali sa sve većim graničnim specifičnim naprezanjima, i kako se razvija naša umješnost da sve skladnije oblikujemo strojeve (posebno važno u tehnici hlađenja), tako granične snage električkih strojeva s vremenom rastu.

9.1. Granični uvjeti naprezanja za granične snage

Pred sve vrste električkih strojeva postavljaju se u njihovu oblikovanju tri osnovna ograničenja, koja u osnovi izviru iz svojstva materijala. To su:

1. *Maksimalno dopuštena brzina vrtnje rotora,* zbog dosezanja granica mehaničkih naprezanja uzrokovanih centrifugalnim silama. Te su granice različite za razne materijale, različite oblike rotora i razne tehnologije gradnje.

2. *Maksimalno dopuštena specifična strujna opterećenja u bakru* koja uzrokuju dosezanje dopuštenih zagrijanja namota (izolacije). Ta specifična opterećenja s obzirom na nastajanje topline najbolje se izražavaju gustoćom struje u namotima $[\frac{A}{mm^2}]$. To ograničenje jako ovisi o načinu i sredstvima hlađenja, pa je različito za razne vrste strojeva, zbog mogućnosti upotrebe različitih sredstava za hlađenje. Upravo zbog utjecaja hlađenja često se za specifični pokazatelj uzima strujni oblog $[\frac{A}{m}]$, jer se hlađenje najčešće odvija odvođenjem topline s površine statora ili rotora, a rjeđe izravnim hlađenjem presjeka unutar bakra.

3. *Maksimalno dopuštena gustoća magnetskog polja* u željezu magnetskog kruga. Ta je gustoća ograničena zbog zasićenja željeza jer kad se prekorači neko zasićenje, nastaje isuviše gubitaka u namotima što stvaraju i održavaju magnetsko polje. Dobar je tu pokazatelj indukcija u zračnom rasporu jer je ona proporcionalna gustoći magnetskog polja u željezu. I materijali magnetskog kruga u raznim vrstama električkih strojeva su različiti kao i mogućnosti zasićivanja, pa odatle i druge granice za razne vrste strojeva.

Već se u samom opisu iznesenih triju osnovnih uzroka ograničenja granične snage stroja očituje različitost graničnih snaga za razne vrste strojeva. To se još dopunjuje izvjesnim posebnim ograničenjima specifičnima za pojedine vrste strojeva. Tako se pojavljuju velike razlike. Poznato je da sinhroni strojevi, generatori, dosežu vrlo velike snage. Danas se grade strojevi od 1800 do 2000 MVA snage, a nazire se realnost gradnje od oko 6000 do 7000 MVA u jednoj jedinici. Uzrok je tome što se:

a) rotori sinhronih strojeva mogu graditi iz materijala najveće mehaničke čvrstoće;
b) modernim hlađenjem vodikom ili vodom u zatvorenim cirkulacijskim sistemima ide na izvanredno visoka specifična opterećenja bakra;
c) mogu upotrebljavati takvi materijali magnetskog kruga koji dopuštaju visoku indukciju;
d) za gradnju rotora dadu upotrebljavati materijali, specijalno legirani čelici, koji podnose izvanredno visoka mehanička naprezanja, pa izdrže vrlo velike centrifugalne sile, što omogućuje velike obodne brzine rotora (do cca 150 $[ms^{-1}]$), odnosno brzine vrtnje stroja;
e) specifična granica za sinhroni stroj (potreba da se sinhrona reaktancija drži unutar određenih veličina) još nije dostigla današnjim veličinama stroja, iako se već pojavljuju izvjesne teškoće.

9.1.1. Posebni granični uvjeti za istosmjerne strojeve

Za istosmjerne strojeve, na žalost, ne stoje stvari ni približno tako povoljno kao za sinhrone. Samo je mogućnost indukcije u zraku približno jednaka i penje se do cca 1,1 [T]. Sa strujnim specifičnim opterećenjem, zbog ograničenja za klasične načine hlađenja, stoji znatno lošije. Dopuštene gustoće struje penju se najviše do $7-8\ [\frac{A}{mm^2}]$, a strujni oblozi, ovisno o promjeru rotora, do:

$600 \cdot 10^2 [Am^{-1}]$ za promjere rotora od 4 metra;

$530 \cdot 10^2\ [Am^{-1}]$ za promjere rotora od 2 metra.

Dalje, kako se rotor obavezno gradi od dinamo-lima, to je i dopuštena obodna brzina niska, svega 70 $[ms^{-1}]$.

Već ta smanjenja reduciraju mogućnosti granične snage istosmjernog stroja u usporedbi s izmjeničnim na mali postotak. No daljnju, mnogo drastičniju

redukciju donose specifični uvjeti svojstveni istosmjernom stroju. Tu su, uz već nabrojane, tri nova bitna ograničenja.

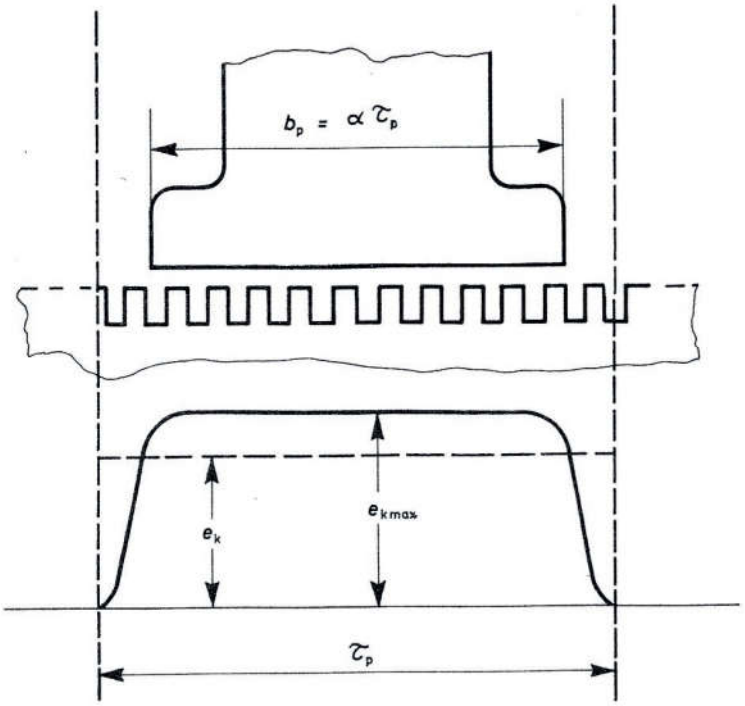
4. *Ograničenje zbog napona među lamelama kolektora.* Ako je srednja vrijednost napona među kolektorskim lamelama:

$$e_k = \frac{2pU}{k} \text{ [V]}, \tag{1}$$

gdje je p broj pari polova, U napon stezaljki, a k je broj lamela kolektora, onda će maksimalna vrijednost tog napona biti:

$$e_{kmax} = \frac{e_k}{\alpha} = \frac{2pU}{k\alpha}, \tag{2}$$

pri čemu je α prekrivanje glavnog pola (vidi sl. 1).



Sl. 1. Uz tumačenje pojma srednje vrijednosti napona među lamelama e_k i maksimalne vrijednosti napona među lamelama kompenziranoga istosmjernog stroja

Za granične snage stroj je uvijek kompenziran, pa nema iskrivljenja oblika glavnoga magnetskog toka ili je ono sasvim neznatno. Budući da granica maksimalnog napona među lamelama mora biti manja od vrijednosti istosmjernog napona koja je opasna za održanje električnog luka, to je krajnji domet maksimalnog napona među lamelama:

$$e_{kmax} \leq 26 \text{ [V]}. \tag{2.a}$$

A kako je prekrivanje pola strojeva graničnih snaga približno do 75%, granica je vrijednosti srednjeg napona među lamelama:

$$e_k \leq 20 \text{ [V]}. \tag{1.a}$$

Dapače, neki proizvođači ne idu sa srednjim naponom među lamelama višim od 18 V, ili čak i 15 V, ovisno o primjeni i režimu pogona stroja.

5. *Ograničenje zbog napona samoindukcije.* Iz iskustva je poznato da ni napon samoindukcije svitka u komutaciji ne može imati po volji visoku vrijednost. Iako napon pomoćnih polova djeluje nasuprot naponu samoindukcije, nakon nekog je iznosa ostatak napona dovoljno visok da izazove iskrenje. Iskustvo je pokazalo da velikim kompenziranim strojevima napon samoindukcije u njihovu trajnom radu ne smije biti viši od 8 V ako se želi ispravna komutacija. Za udarne terete može se kratkotrajno dopustiti i poneka iskra, pa se pokazalo da pri tome može napon samoindukcije dosezati i do 20 V. Dakle, ograničenje je:

– za trajni pogon	$e_s \leq 8$ [V];	(3)
– za kratke udarce	$e_{sud} \leq 20$ [V].	

6. *Ograničenje zbog promjera rotora.* Najosjetljiviji dio istosmjernog stroja, kolektor, izrađuje se vrlo složenom tehnologijom. U njegovu gradnju ide i spajanje s namotom armature. Dalje, veliki istosmjerni stroj zahtijeva nakon gradnje u radionici vrlo pažljivo podešavanje (zračni raspor pomoćnih polova itd.) i mjerenje, tako da se njegova gradnja praktički dovršava u ispitnoj stanici. To dovodi do toga da se veći istosmjerni stroj mora do kraja izraditi u tvornici i tek se onda transportira na mjesto pogona. Pri tome se rastavlja samo na montažne dijelove, tj. na rotor, stator, ležajeve, pričvrsnu ploču itd. Ne mogu se, dakle, graditi pojedini glavni dijelovi, posebno rotor, na mjestu pogona, kako je to npr. s gradnjom velikih sinhronih generatora u samoj montažnoj jami u centrali. Zbog tog su razloga ograničene dimenzije glavnih sastavnih dijelova istosmjernog stroja, posebno rotora, na veličine koje omogućuju transport. Pri tome je važan takozvani *željeznički profil,* koji ograničava najveću dimenziju komada prilikom prijevoza željeznicom na nešto više od četiri metra, pa je to ujedno i maksimalna moguća veličina promjera istosmjernog rotora, dakle:

$$D_a \leq 4{,}1 \text{ m}. \tag{4}$$

Moramo, dakle, za istosmjerni stroj računati s tim da u gradnji možemo ići do ovih vrijednosti pojedinih elemenata, kad je riječ o trajnom pogonu:

promjer rotora	$D_a \leq 4{,}1$ [m];
obodna brzina	$v_a \leq 70$ [ms^{-1}];
prekrivanje pola	$\alpha \doteq 0{,}75$;
indukcija u zračnom rasporu	$B_\delta \leq 1{,}1$ [T];
strujni oblog	$A \leq 60 \cdot 10^3$ [Am^{-1}];
srednji napon među lamelama	$e_k \leq 20$ [V];
maksimalni napon među lamelama	$e_{kmax} \leq 26$ [V];
napon samoindukcije	$e_s \leq 8$ [V].

U pogonima s udarnim teretom treba još da bude:

napon samoindukcije	$e_{sud} \leq 20$ [V].

S tim svim ograničenjima postale su vrlo skučene mogućnosti gradnje velikih istosmjernih strojeva.

9.2. Današnje granične snage istosmjernih strojeva

S jasnim ograničenjima koja nas danas sputavaju u gradnji velikih istosmjernih strojeva možemo provesti proračune stvarnih, danas mogućih graničnih snaga. Dimenzije stroja određuje njegova *unutrašnja snaga*, tj. snaga koja se u stroju pretvara iz električne u mehaničku, ili obrnuto. Ta je snaga:

$$P = EI = 4w_a \frac{pn}{60} \Phi_{gl} I_a, \tag{1}$$

pri čemu je E inducirani napon stroja, I_a struja (armature), w_a efektivni broj zavoja armature i p broj pari polova. Dalje, n je brzina vrtnje i Φ_{gl} je glavni (ulančeni) magnetski tok.

Razliku između te unutrašnje i stvarne snage istosmjernog stroja na stezaljkama (generator) ili osovini (motor), čine samo gubici. Za motor to su mehanički gubici i gubici u željezu, a kod generatora gubici zbog Jouleove topline u namotima. Strojevima graničnih snaga ta je razlika 2 % snage, a budući da je naša računica graničnih snaga manje točna od tog postotka, tu razliku možemo zanemariti.

Zamijenimo li u izrazu za unutrašnju snagu (1) glavni magnetski tok magnetskom indukcijom u zračnom rasporu, a struju strujnim oblogom:

$$\Phi_{gl} = \alpha \tau_p l B_\delta = \alpha \frac{\pi D_a}{2p} l B_\delta,$$

$$I_a = \frac{\pi D_a A}{2w_a},$$

pri čemu je α prekrivanje glavnog pola, τ_p polni korak stroja [m], a l je dužina željeza paketa limova stroja [m], izlazi:

$$P = \frac{\pi^2}{60} \alpha B_\delta A D_a^2 l n \; 10^{-3} \text{ [kW]}. \tag{2}$$

Kad u taj rezultat uvrstimo granične vrijednosti za prekrivanje pola, indukciju u zračnom rasporu i strujni oblog, dobivamo za maksimalnu unutrašnju snagu izraz:

$$P_{max} = 8{,}15 \; D_a^2 l n \text{ [kW]}. \tag{3}$$

Za naše razmatranje važan je izraz (2). On sadrži gotovo sve elemente koji moraju biti ograničeni, pa variranjem po dva *granična elementa* graničnih uvjeta određujemo granične snage uz graničnu vrijednost tih elemenata. Variranjem elemenata naći ćemo granične snage za sve elemente i vidjeti koje su najnepovoljnije, najmanje, jer su to onda stvarne granične snage koje se ne mogu prekoračiti.

9.2.1. Granične snage za D_{amax} i e_{smax}

Srednji napon samoindukcije (uz linearnu, otporsku komutaciju) iznosi:

$$e_s = 2v_a w_s \xi A l \text{ [V]}, \tag{4}$$

gdje je w_s broj zavoja svitka koji komutira, a ξ je koeficijent proprocionalnosti samoinduktiviteta što obuhvaća ukupno rasipanje ulančeno sa svitkom u komutaciji. Pri graničnim snagama uvijek je riječ o štapnom namotu, dakle $w_s = 1$, a koeficijent proporcionalnosti samoinduktiviteta pri tim veličinama stroja bit će:

$$\xi \doteq 4{,}5 \cdot 10^{-6} \left[\frac{\text{Vs}}{\text{Am}}\right]. \tag{5}$$

Budući da je $v_a = \dfrac{D_a \pi n}{60}$, može se (4) pisati i kao:

$$e_s = 2 \frac{D_a \pi n}{60} \xi A l,$$

iz čega dobivamo:

$$A D_a l n = \frac{60 e_s}{2 \pi \xi}.$$

Posljednji izraz uvršten u (2) daje:

$$P = \frac{\pi}{2} \alpha B_\delta D_a \frac{e_s}{\xi} 10^{-3}. \tag{2.a}$$

Uvrste li se u (2.a) granične vrijednosti za α, B, D_a, e_s i uz (5), dobivamo graničnu snagu:

$$P_{gr} \doteq 9\,500 \text{ [kW]}. \tag{3.a}$$

Ta je snaga ucrtana u dijagram graničnih snaga na slici 1. kao krivulja A. Iz istog se izraza dobiva i granična snaga pri udarnim teretima, tako da se umjesto e_s uvrštava u jednadžbu (2.a) granična vrijednost e_{sud} (20 V), pa je:

$$P_{grud} = 23\,000 \text{ [kW]},$$

koja je udarna granica predočena na slici 1. linijom A_{max}.

9.2.2. Granična snaga za D_{amax} i dopuštene vrijednosti e_k

Inducirani napon između dvije susjedne lamele iznosi $e_k = 2B_\delta v_a l w_s$, što uz $w_s = 1$ i obodnu brzinu armature izraženu brzinom vrtnje n, daje:

$$e_k = 2B_\delta \frac{D_a \pi n}{60} l.$$

Iz toga se može postaviti: $B_\delta D_a l n = \frac{60 e_k}{2\pi}$, pa uvrštenjem u jednadžbu (2) nastaje:

$$P = \frac{\pi}{2} \alpha A D_a e_k 10^{-3} \text{ [kW]}. \tag{2.b}$$

Uvrste li se granične vrijednosti za α, A, D_a i e_k, dobivamo:

$$P_{gr} = 7\,500 \text{ [kW]}. \tag{3.b}$$

Ta je granična snaga nacrtana na slici 1. kao linija B. Budući da napon među lamela e_k ne ovisi o struji stroja, udarno nam opterećenje nije ograničeno tim naponom, i prema tome nema posebne granične udarne snage zbog e_k.

9.2.3. Granična snaga za v_{amax} i dopuštenu vrijednost e_s

Potrebno je najprije izraziti snagu kao funkciju brzine vrtnje i napona samoindukcije, bez obzira na to koliki je promjer stroja. Iz jednadžbe (4), uz $w_s = 1$, izlazi:

$$Al = \frac{e_s}{2 v_a \xi}.$$

Taj izraz uvrštavamo u jednadžbu (2) pa će biti:

$$P = \frac{\pi^2}{60} \alpha B_\delta D_a^2 n \frac{e_s}{2 v_a \xi} 10^{-3}.$$

Promjer ćemo zamijeniti obodnom brzinom:

$$D_a = \frac{60 v_a}{\pi n}; \quad D_a^2 = \left(\frac{60 v_a}{\pi n}\right)^2,$$

pa dobivamo izraz za snagu:

$$P = 30 \alpha B_\delta \frac{v_a}{n \xi} e_s 10^{-3} \text{ [kW]}. \tag{2.c}$$

Kad se uvrste granične vrijednosti za e_s, v_a, B_δ i α uz vrijednost za ξ iz jednadžbe (5), granična je snaga:

$$P_{gr} = \frac{3\,080\,000}{n} \text{[kW]}. \tag{3.c}$$

Na slici 1. unesena je ta granična vrijednost kao krivulja C. Uvrsti li se u (2.c) za e_s granična vrijednost za udarna opterećenja od 20 V, za graničnu snagu pri udarcu dobivamo:

$$P_{grud} = \frac{7\,700\,000}{n} \text{ [kW]},$$

što je na slici 1. nacrtano kruvuljom C_{max}.

9.2.4. Granična snaga za v_{amax} i dopuštenu vrijednost e_k

Da se nađe ta granična krivulja, valja najprije izraziti snagu kao funkciju brzine vrtnje i napona među lamelama e_k. Ako se iz poznatog izraza $e_k = 2B_\delta v_a l w_s$ izluči $B_\delta = \dfrac{e_k}{2v_a w_s}$ i uvrsti u (2), izlazi (uz $w_s = 1$):

$$P = \frac{\pi^2}{60} \alpha A D_a^2 n \frac{e_k}{2v_a} 10^{-3}.$$

Zamijeni li se D_a^2 s $\left(\dfrac{60v_a}{\pi n}\right)^2$, prelazi prethodni izraz u:

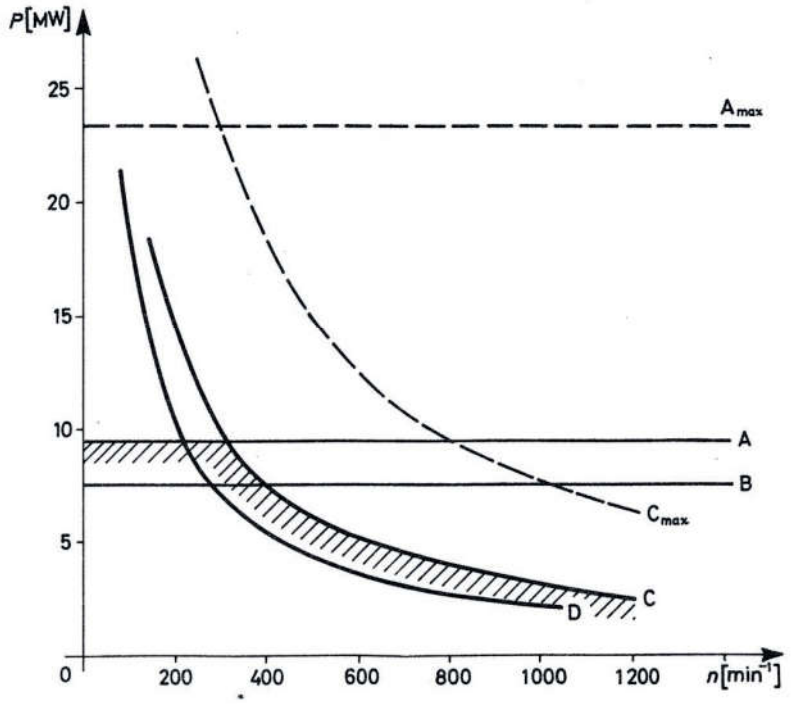
$$P = 30 \frac{e_k \alpha v_a A 10^{-3}}{n} \text{ [kW]}. \tag{2.d}$$

Uvrstimo li granične vrijednosti za e_k, α, v_a i A, granična je snaga:

$$P_{gr} = \frac{2\,450\,000}{n} \text{ [kW]}. \tag{3.d}$$

Ta je granična snaga realna za sprohodne strojeve jer oni imaju veliki dijametar. No brzohodnima se dijametar smanjuje, a za njih je i vjerojatnija potreba za graničnom obodnom brzinom. Zato je toj graničnoj snazi realnije uvrstiti za granični strujni oblog $530 \cdot 10^2$ [Am^{-1}] nego $600 \cdot 10^2$ [Am^{-1}]. S time granična snaga izlazi:

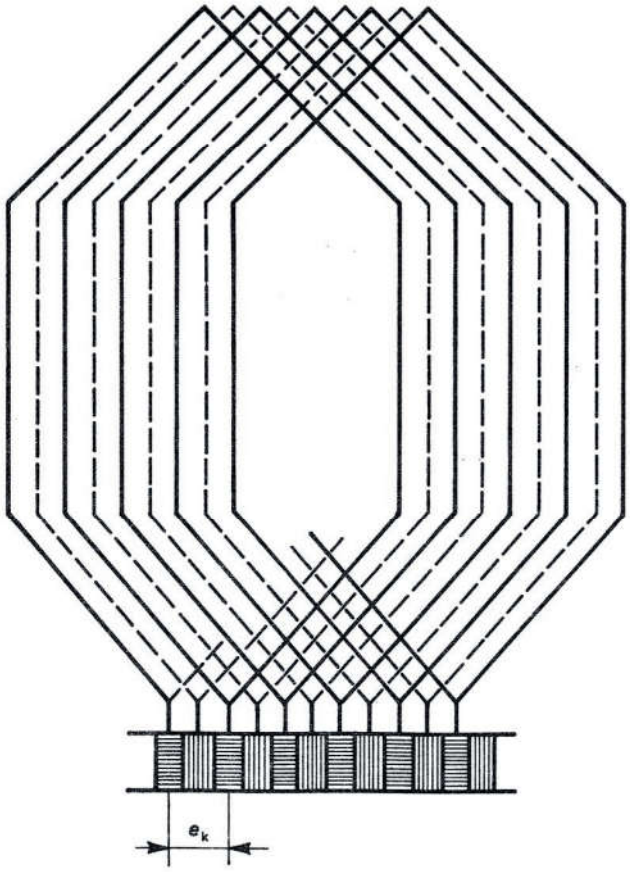
$$P_{gr} = \frac{2\,170\,000}{n} \text{ [kW]}. \tag{3.e}$$



Sl. 1. Krivulje graničnih snaga istosmjernog stroja: A – ograničenje promjerom rotora i naponom samoindukcije, B – ograničenje promjerom rotora i naponom među lamelama, C – ograničenje obodnom brzinom i naponom samoindukcije, D – ograničenje obodnom brzinom i naponom među lamelama

Zato je i taj izraz nacrtan u slici 1. kao krivulja D za graničnu snagu uz uvjet v_{amax} i dopušteno e_k.

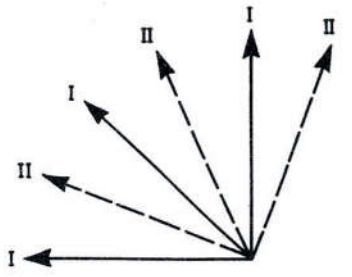
Sa slike 1, gdje su nacrtane granične mogućnosti snage uz razne uvjete koji ograničavaju gradnju istosmjernih strojeva, vidi se da odsudno ograničenje daje krivulja B za sporohodne (do brzine vrtnje od oko 300 min^{-1}), a krivulja D za strojeve s većom brzinom vrtnje, tj. za brzine vrtnje veće od 300 min^{-1}. Posebno je niska granica pri većim brzinama vrtnje. Odlučujući uvjet koji uzrokuje tako nisku graničnu snagu očito je ograničenje napona među lamelama e_k, a nema šansi



Sl. 2. Skica dvovojnoga petljastog namota koji u principu omogućuje podjelu (smanjenje) napona među lamelama zbog naizmjeničnog slijeda lamela različitih ovoja

da se dopusti povišenje tog napona jer se na stroju granične snage ne smije riskirati pojava električnog luka u obliku kružne vatre na kolektoru i slično. Ipak ima jedna mogućnost da se zaobiđe ta granica adekvatnijim rasporedom napona po kolektoru, dakako na osnovi namota koji bi to osigurao. Poznato je da viševojnim namotima po obodu kolektora slijede lamele naizmjence, a prema tome i svici, prvog ovoja, drugog ovoja, trećeg ovoja itd. pa nanovo prvog ovoja, drugoga... itd. Budući da u principu komutiraju međusobno samo svici istog ovoja, to u praksi dolazi u obzir prije svega dvovojni namot, da ne bi četkica na kolektoru morala imati veliku (trostruku, četverostruku itd.) širinu, što bi vodilo

do vrlo široke zone komutacije i zahtijevalo da se smanji prekrivanje glavnog pola, tj. što bi dovelo do smanjenja snage. Za najveće strojeve, zbog nužnosti maloga efektivnog broja zavoja armature, ne dolazi u obzir valoviti namot, pa je očito namot koji će u principu ispuniti početni zahtjev *dvovojni petljasti* namot. Osnovni raspored svitaka i lamela prikazuje slika 2. No, neće odgovarati *svaki* dvovojni petljasti namot. Jer, ako dva susjedna svitka na slici 2. imaju isti potencijal (isti vektor napona), ne bi se situacija ništa popravila. Pri tome bi napon između, recimo, prvih dviju lamela bio jednak nuli, ali bi između druge i treće bio kao i kod jednovojnoga, tj. kao da su po dva svitka i po dvije lamele jedna cjelina, a to je upravo ono na čemu smo i prije bili. Zato je prijeko potrebno da susjedne lamele dvaju ovoja imaju različite potencijale, tj. susjedni svici dvaju ovoja različite vektore napona, kako bi se razlika potencijala između dviju lamela istog ovoja podijelila, kao što u principu prikazuje slika 3. Dakle, upravo takav namot treba



Sl. 3. Naponi vektora svitaka takvog dvovojnog namota koji omogućuje podjelu (smanjenje) napona među lamelama

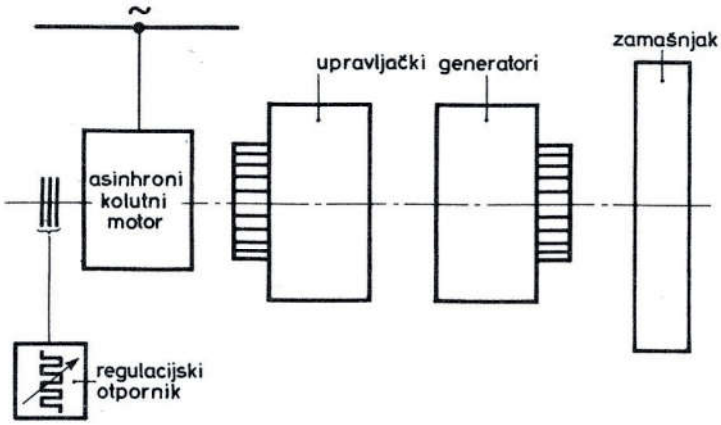
za pomicanje granice koju daje napon među lamelama. Daljnji je uvjet da takav namot omogućuje dobru komutaciju. Budući da je petljasti namot upravo onaj s najvećim stupnjem slobode u izboru broja utora, to je bez daljnjega moguće odabrati takve namote. Ostavimo to za poslije, a sada samo utvrdimo što to znači za teoriju graničnih snaga. Očito je da će se granice B i D na slici 1. podići. Podijelimo li dvovojnim petljastim namotom potencijal dviju lamela istog ovoja približno na polovicu, rastu vrijednosti obiju granica približno na dvostruko. Za takav slučaj postaju granice A i C presudne za mogućnosti gradnje stroja, što znači za sporohodne strojeve 9 500 [kW], a za brzohodne manje. Dakako i to je vrlo niska granica. Ne mijenja bitno na zaključku da se, posebno sporohodnim strojevima, vrlo pažljivim dimenzioniranjem (maksimalnim povećanjem prekrivanja, smanjenjem vrijednosti ξ na nešto manje od $4{,}5 \cdot 10^{-6}$ itd.) može dostići i 10 000 [kW], pa i nešto više.

9.3. Upotreba strojeva granične snage

Kad se u tehničkoj praksi ne bi pojavljivala potreba za strojevima granične snage pa i veće, tad to područje gotovo ne bi bilo zanimljivo ni za proučavanje ni za istraživanja u pravcu podizanja te vrijednosti. Na žalost, prema današnjem

stanju tehničkog razvoja u mnogim bi vrstama pogona trebali istosmjerni strojevi, motori, veće snage od graničnih. Spomenimo samo neke od tih pogona. U onima sa sporohodnim motorima brzina vrtnje manjih od 300 [min^{-1}] to su u prvom redu pogoni teških reverzibilnih valjačkih pruga u valjaonicama, pogoni izvoznih strojeva u rudnicima i pogoni rotacionih kopača u površinskim kopovima rudnika. K tome valja dodati pogone ventilatora aerodinamičkih tunela i pogone brodske propulzije kad oni zahtijevaju mogućnost finijeg podešavanja brzine vrtnje. Za brzohodne elektromotorne pogone brzina vrtnje većih od 300 [min^{-1}] potrebe za strojevima većim od granične snage opet je jasno izražena u valjaonicama, i to za valjanje lakih profila i posebno za valjačke stanove za čeličnu žicu i građevinski čelik. I u električnoj vuči dosegli su istosmjerni motori granične vrijednosti i osjeća se potreba za većim snagama. Slično je i za pogonske motore ispitnih stanica, i to za brzohodne i za sporohodne, pa za velike cementne peći (sporohodne) itd. Posebno je teško stanje s pogonima koji zahtijevaju veliku brzinu vrtnje. Na primjer, pri brzini vrtnje od 4000 [min^{-1}] granična snaga prema podacima prethodnog odjeljka — slika 9.2 −1. ili jednadžba (9.2 −3.c), iznosi samo oko 550 KW, a, recimo, ispitna stanica turbogeneratora trebala bi znatno veću snagu. Danas se takva pitanja rješavaju na razne načine (udvajanjem jedinica na jednoj osovini, mehaničkim reduktorima itd.), ali sva su ta rješenja skupa, neekonomična i manje pouzdana od onoga s jednim motorom kad bi ga bilo moguće izgraditi.

Kao izvor istosmjerne energije za takve pogone danas služe ispravljački mostovi ili slične naprave energetske elektronike priključene na izmjeničnu mrežu. Ipak se očuvalo u nekim pogonima (posebno reverzibilnim valjačkim postrojenjima) klasično rješenje Ilgnerovim agregatom, posebno ako je izmjenična mreža slaba (male snage) ili ako i jaku mrežu želimo očuvati od velikih udaraca snage.



Sl. 1. Blok-shema Ilgnerova agregata s dva upravljačka generatora

Ilgnerov agregat u principu je Leonardov agregat s dodatnim zamašnjakom na osovini (vidi sl.1). Sastoji se redovno od:

a) pogonskoga asinhronog kolutnog motora;
b) pripadnoga regulacijskog otpornika, koji je velikim agregatima izveden kao tekućinski (vodni) otpornik;

c) jednog ili više upravljačkih istosmjernih generatora;
d) jednoga teškoga zamašnjaka.

Ti su elementi prikazani u blok-shemi na slici. Takav Ilgnerov agregat ima obično brzinu vrtnje od 500 do 750 min^{-1}. Za te brzine vrtnje, kako vidimo iz slike 9.2–1, granična snaga upravljačkih generatora otprilike je upola manja od granične snage motora, pa se zato u Ilgnerovu agregatu upotrebljavaju dva ili više upravljačkih generatora.

Kako se razvija tehnika i tehnologija u svim granama i vrstama industrijske proizvodnje i transporta, sve više rastu veličine (snage) strojeva, a s time i potreba za pogonskim električkim strojevima sve veće snage. Relativno niske granične snage istosmjernih strojeva očito je da ometaju taj razvoj i sutra će potreba za njima biti još veća nego što je danas. Zato su sva razvojna istraživanja istosmjernih strojeva s težnjom da se povećaju granične snage posebno važna i zanimljiva za proučavanje. U idućim odjeljcima prikzat ćemo uz ostalo i neka od tih istraživanja.

9.4. Dvovojni namoti za granične snage

U odjeljku 9.2. ustanovili smo da za izvedbu istosmjernih strojeva graničnih snaga dolaze u obzir samo viševojni petljasti, prije svega dvovojni namoti. U trećem poglavlju uočili smo da su svi dvovojni petljasti namoti nesimetrični. Međutim, kako su za postizanje granične snage ti nesimetrični namoti prijeko potrebni, važno je da proučimo detaljnije njihova svojstva. U odjeljku 3.2. također smo ustanovili da su neki petljasti dvovojni namoti *potpuno nesimetrični*, a neki ipak pokazuju neka izvjesna simetrička svojstva. Te potpuno nesimetrične namote, kratkoće radi, nazivajmo u ovom poglavlju *nesimetričnima*, a one dijelom simetričnih svojstava *polusimetričnima*. U daljnjem tekstu protumačit ćemo obilježja i elemente po kojima se te dvije vrste razlikuju.

Budući da je za petljaste namote moguća upotreba bilo kojeg broja utora, a izvedbe s bilo kakvim brojem utora ne moraju dati očekivani efekt podjele napona, ili čak uzrokuju i neka druga loša svojstva stroja, potrebno je da se uvodno ograniči razmatranje na mogućnosti koje obećavaju dobra rješenja. Poznati je uvjet da zbog valovitosti napona ne smije biti premalen broj utora po polu, $N/2p > 10$. Dalje je važno da broj utora bude takav kako se ne bi mijenjao magnetski tok zbog promjene ukupnoga magnetskog otpora u zračnom rasporu pod polom. To povlači za sobom negativni uvjet da broj utora N po paru polova p ne smije biti paran:

$$\frac{N}{p} \neq 2n, \quad (n = 1, 2, 3, \ldots). \tag{1}$$

Jednako tako nije dobro da broj utora po paru polova bude razlomljen broj jer se zbog rasporeda utora pod polovima tad ne mogu postaviti spojke izjednačenja, koje bi djelovale pod svakim polnim razmakom. Ostaje pravo rješenje da broj utora po paru polova bude cijeli *neparni* broj:

$$\frac{N}{p} = 2n-1, \quad (n = 1, 2, 3, \ldots). \tag{2}$$

S takvim brojem utora moguće su i polusimetrične i nesimetrične izvedbe namota. Za sve petljaste namote poznati su uvjeti simetrije (vidi 3. poglavlje):

$$\frac{k}{p} = \text{cijeli broj}, \quad \frac{N}{p} = \text{cijeli broj},$$

pri čemu je k broj lamela, odnosno svitaka.

Može se pokazati da su to za jednovojne namote i dovoljni uvjeti jer se pod svakim parom polova nalazi jednak broj i utora i svitaka, i to u adekvatnim geometrijsko-magnetskim položajima. Viševojnim namotima, u našem primjeru dvovojnima, dolazi još uvjet za polusimetrični namot:

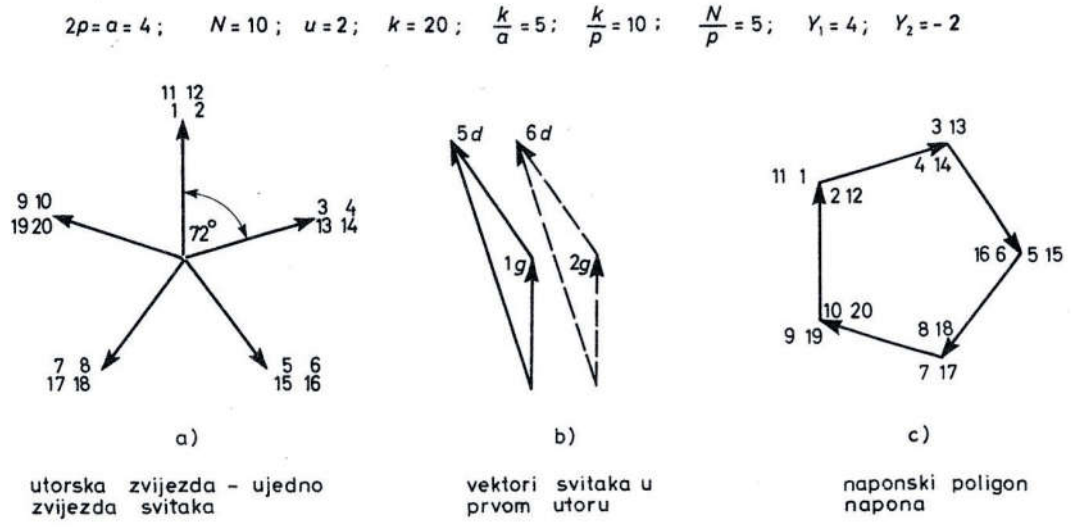
$$\frac{k}{a} = \text{cijeli broj} \tag{3}$$

jer tek taj uvjet, uz prije spomenuta dva, osigurava istu adekvatnu jednakost među granama namota različitih ovoja.

Sad je najjednostavnije načiniti pokus s četiri varijante, i to za polusimetrični i nesimetrični namot, oba u jednostavnoj (nestepeničastoj) i stepeničastoj izvedbi. Dakako, radi jednostavnosti prikazivanja uzet ćemo za primjere *školske namote* s malim brojem utora po paru polova, kakvi se ne izvode u praksi, ali daju točan uvid u naponska svojstva namota.

9.4.1. Polusimetrični nestepeničasti dvovojni namot

Za primjer uzmimo četveropolni stroj $2p = a = 4$, sa svega deset utora ($N = 10$), s dva svitka po utoru ($u = 2$), tako da je ukupni broj svitaka i kolektorskih lamela $k = 20$. Neka korak svitka bude $y_1 = 4$, a spojni korak $y_2 = -2$, pa će ukupni korak biti $y = y_1 + y_2 = 2$, što osigurava da namot bude dvovojan. Namot je i polusimetričan jer je $\frac{k}{a} = 5$, $\frac{k}{p} = 10$ i $\frac{N}{p} = 5$. Svi štapovi u jednom utoru imaju jednak vektor napona (isti utorski napon), a kut između utorskih napona iznosi $\alpha_{el} = \frac{360p}{N} = 72°$. Utorska zvijezda napona prikazana je na slici 1.a. Spoj štapova, prema zadatku, ide u prvom ovoju $1g$(gornji) – $5d$(donji) – $3g$ – $7d$ – itd., tj. svi su položaji svitaka neparni. Spoj štapova u drugom ovoju

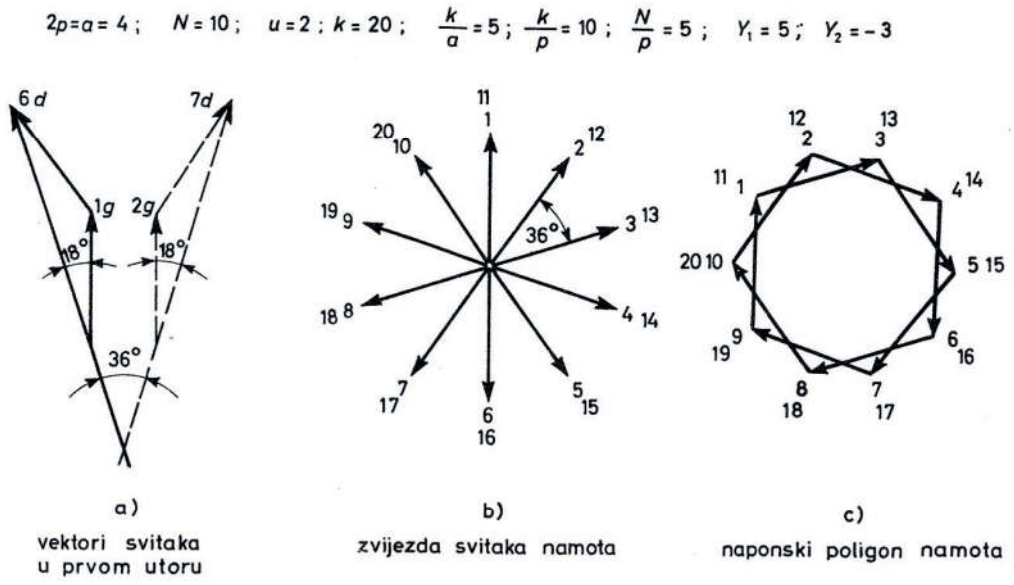


Sl. 1. Primjer (školski) polusimetričnoga dvovojnog petljastog nestepeničastog namota; tumačenje uz analizu prikladnosti za strojeve granične snage

slijedi tokom: $2g - 6d - 4g - 8d$ – itd., tj. svim parnim položajima svitaka. Nacrtaju li se vektori napona za svitke kojih su gornje strane u prvom utoru, kao što je učinjeno na slici 1.b, vidi se da su oni identični. Zbog toga je zvijezda utorskih napona ujedno (u drugom mjerilu) i zvijezda napona svitaka. Na slici 1.c nacrtan je naponski poligon svitaka namota. Iz te je slike odmah jasno da kod polusimetričnog običnog namota nema podjele napona među lamelama raznih ovoja, pa taj namot ne odgovara postavljenom uvjetu za granične snage stroja.

9.4.2. Polusimetrični stepeničasti dvovojni namot

Radi jednostavnije usporedbe uzmimo namot s osnovnim rasporedom kao u prijašnjem primjeru, tj. $2p = a = 4$, $N = 10$, $u = 2$, i $k = 20$, samo s drugim spojnim korakom i korakom svitka, da bismo dobili stepeničasti namot, tj. $y_1 = 5$ i $y_2 = -3$. Zvijezda utorskih napona odgovara u cijelosti prijašnjem primjeru, tj. slici 1.a. Zbog drukčijeg spajanja štapova hod obaju ovoja je drukčiji. Za prvi ovoj bit će $1g - 6d - 3g - 8d$ – itd., a za drugi ovoj $2g - 7d - 4g - 9d$ – itd. Nacrtaju li se vektori napona za svitke kojih su gornje strane u prvom utoru, kao što je to učinjeno na slici 2.a, vidi se da se oni ne poklapaju, već su za

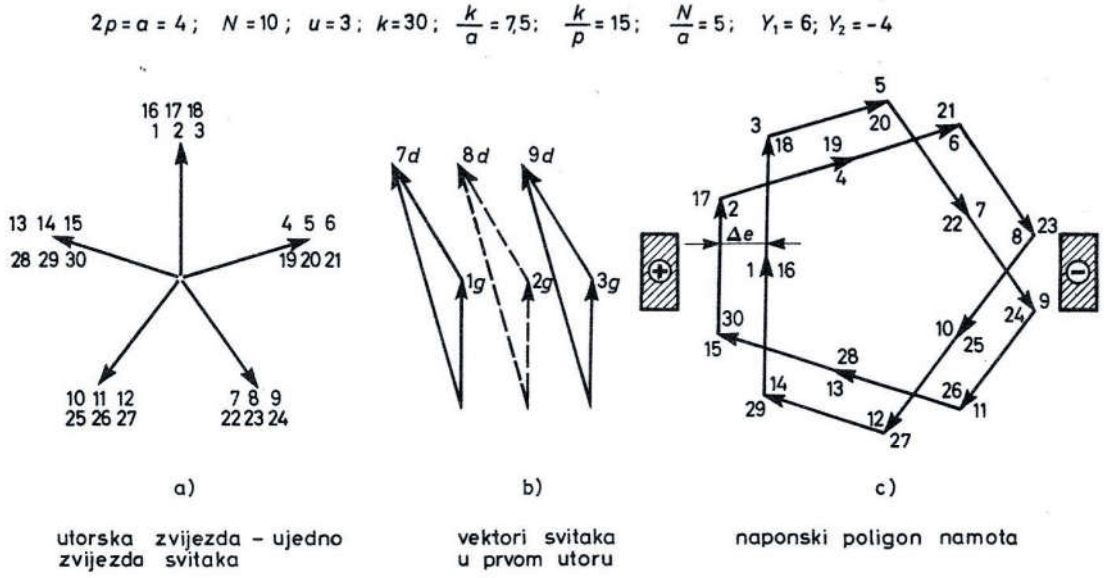


Sl. 2. Primjer (školski) polusimetričnoga dvovojnog petljastog stepeničastog namota; objašnjenje uz analizu prikladnosti za strojeve granične snage

dani primjer pomaknuti za 36 električkih stupnjeva. Prema tome će vektori u zvijezdi svitaka namota biti pomaknuti za 36° električkih što se vidi na slici 2.b. Konstruira li se naponski poligon svitaka namota (vidi sl. 2.c), vidi se da je svaki ovoj formirao svoj naponski poligon, i to tako da su ti poligoni jedan prema drugome pomaknuti za polovicu električkog kuta među utorima. Napon među susjednim lamelama, tj. među susjednim svicima raznih ovoja, jednak je približno polovici napona među svicima (lamelama) istog ovoja. Polusimetrični stepeničasti dvovojni namot zadovoljava postavljeni zahtjev podjele napona među lamelama za gradnju strojeva granične snage.

9.4.3. Nesimetrični (potpuno) nestepeničasti dvovojni namot

Da olakšamo međusobne usporedbe raznih varijanti namota, pokušajmo u ovom primjeru postaviti nesimetrični namot što sličniji dosadašnjim. To se najlakše postiže ako se samo promijeni broj svitaka po utoru. Tako za ovaj primjer uzmimo četveropolni namot s podacima: $2p = a = 4$, $N = 10$, $u = 3$, $k = 30$. Iako su $\frac{k}{p} = 15$ i $\frac{N}{p} = 5$, ipak je namot nesimetričan zbog $\frac{k}{a} = 7\frac{1}{2}$. Da namot ostane nestepeničast, određuje se korak svitka $y_1 = 6$ i spojni korak $y_2 = -4$. Kut među vektorima utorskih napona $\alpha_{el} = \frac{360 \cdot 2}{10} = 72°$. Na osnovi toga konstruira se utorska zvijezda napona kao na slici 3.a. Spoj strana svitaka prema



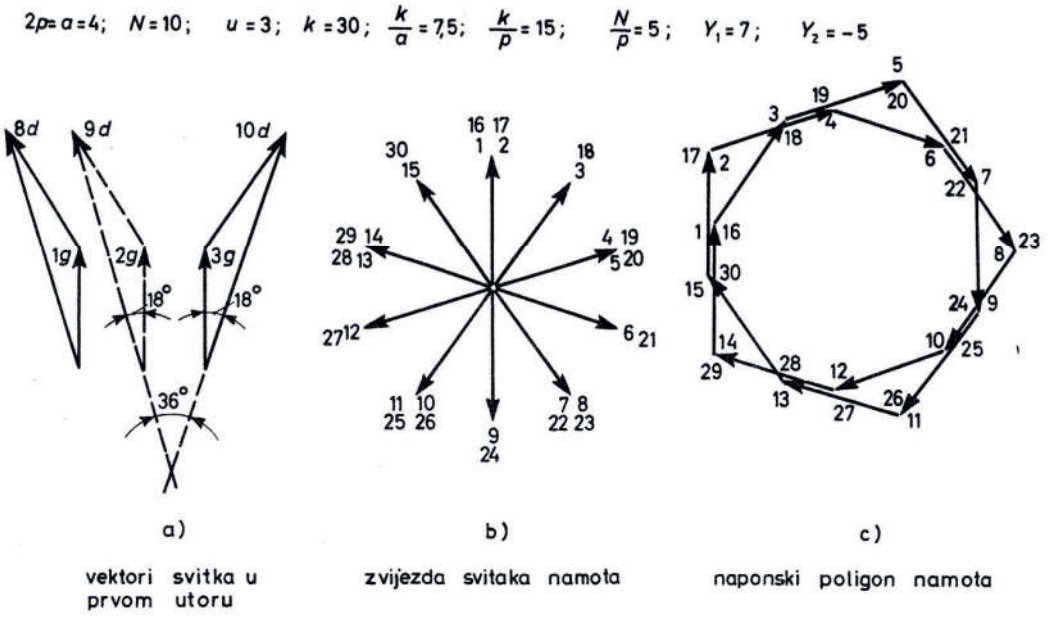
Sl. 3. Primjer (školski) nesimetričnoga dvovojnog petljastog nestepeničastog namota; objašnjenje uz analizu prikladnosti za strojeve granične snage

zadatku ide u prvom ovoju: $1g - 7d - 3g - 9d - 5g - 11d$ – itd. tj svim neparnim položajima u utorima, a u drugom ovoju svim parnim položajima: 2g – 8d – 4g – 10d – 6g, – 12d – itd. Na slici 3.b nacrtani su vektori napona svih svitaka kojih su gornje strane u prvom utoru. Vidi se da se naponi tih svitaka poklapaju, pa je zbog toga zvijezda napona svitaka jednaka zvijezdi utorskih napona, samo u drugom mjerilu. Naponski mnogokut svitaka konstruiran na osnovi utorske zvijezde, a slijedom galvanskih spojeva, daje sliku 3.c. Oba ovoja čine dva identična mnogokuta napona svitaka koji se potpuno prekrivaju, pri čemu svaki ovoj prolazi svim vektorskim položajima. Tu su potencijali lamela tako raspoređeni da potencijal svake lamele jednog ovoja leži negdje između potencijala obiju susjednih lamela drugog ovoja, približno na polovici, iako su razlike nešto veće od polovice. Time i nesimetrični nestepeničasti dvovojni namot ispunjava zahtjev podjele napona među lamelama, tj. pokazuje u osnovi prikladnost za gradnju strojeva granične snage.

9.4.4. Nesimetrični stepeničasti dvovojni namot

I ovdje je najprikladnije, radi jednostavnije usporedbe, uzeti namot s istim osnovnim rasporedom kao u prijašnjem primjeru. Dakle, četveropolni stroj s $2p = a = 4$, $N = 10$,

$u = 3$, $k = 30$, samo s drugim spojnim korakom i korakom svitka, da bi se dobio stepeničasti namot s $y_1 = 7$ i $y_2 = -5$. Zvijezda utorskih napona odgovara u cijelosti prijašnjem primjeru, tj. onoj na slici 3.a. Zbog drukčijeg spajanja strana svitaka (štapova) i hod obaju ovoja namota je drukčiji. Za prvi ovoj on ide: $1g - 8d - 3g - 10d - 5g - 12d$ – itd., a drugom ovoju: $2g - 9d - 4g - 11d - 6g - 13d$ – itd. Nacrtaju li se vektori napona za svitke kojih su gornje strane u prvom utoru, kako je to učinjeno na slici 4.a, vidi se da se oni



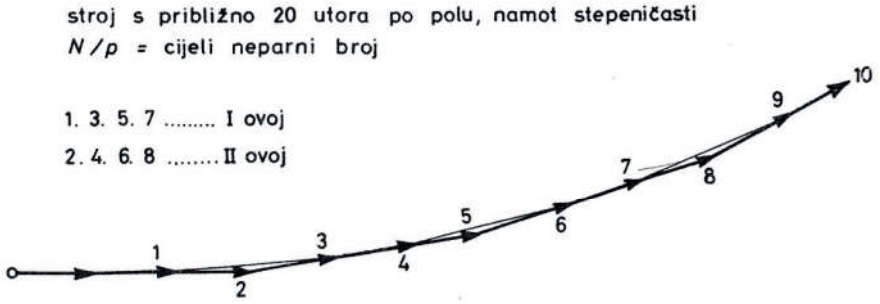
Sl. 4. Primjer (školski) nesimetričnoga dvovojnog petljastog stepeničastog namota; objašnjenje uz analizu prikladnosti za strojeve granične snage

djelomično ne poklapaju. Prva dva svitka daju identičan napon, a napon trećega odstupa za kut od 36 električkih stupnjeva, tj. za polovicu kuta među utorskim vektorima. Tako i u svakom utoru po dva svitka daju jednak vektor napona, a vektor trećega odstupa za isti kut. Zbog toga će i vektori u zvijezdi napona svitaka cijelog namota biti pomaknuti za 36° električkih, kako to prikazuje slika 4.b. Pri tome pojedinim vektorima pripada dvostruki broj položaja svitaka, u skladu s podjelom omjera svitaka od 2 : 1 u svim utorima. Zbog tog je razloga i mnokogut vektora svitaka napona nešto naoko zamršenijeg izgleda (vidi sl. 4.c), kao da je riječ o dva nepravilna mnogokuta napona pomaknuta za određeni kut. Međutim, to je samo jedan nepravilni i dvostruki mnogokut napona kojeg je svojstvo da svakim njegovim položajem (stranicom) prolazi po jedan vektor napona svitka i prvog i drugog ovoja namota. I tu potencijal pojedine lamele jednog ovoja prema potencijalima lamela susjednog ovoja čini samo dio razlike potencijala između dviju lamela istog ovoja (nešto više od polovice). Tako i nesimetrični dvovojni stepeničasti namot građen uz početni uvjet, prema jednadžbi (2), dovodi do podjele napona među lamelama istog ovoja, pa je u osnovi prikladan za gradnju strojeva granične snage.

9.4.5. Usporedba varijanti namota za granične snage

Razmatranja u odjeljku 9.2. pokazuju da podjelu napona među lamelama raznih ovoja omogućuju od dvovojnih namota polusimetrični stepeničasti, nesimetrični stepeničasti i

nesimetrični nestepeničasti, kojima je broj utora po polu jednak cijelome neparnom broju. Na školskim namotima u razmotrenim primjerima vidi se da podjela napona nije u svim primjerima optimalna u smislu podjele napona među lamelama e_k u omjeru 1/2 : 1/2. Međutim, u stvarnim izvedbama, gdje je broj utora mnogo puta veći nego u *školskim* strojevima, dobiva se (teorijski) gotovo idealna podjela kako se mnogokut s porastom broja stranica približava kružnici. Za primjer je na slici 5. nacrtan jedan dio takva mnogokuta za jedan stroj koji ima normalni broj utora.



Sl. 5. Skica dijela stvarnog namota (vektorskog mnogokuta svitaka) uz objašnjenje podjele napona među lamelama na približno polovicu vrijednosti napona među lamelama jednog ovoja

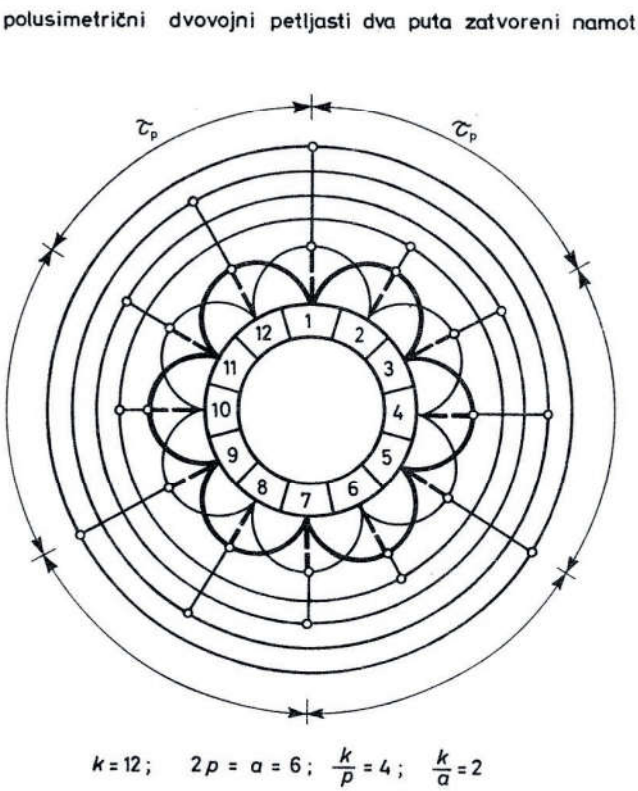
Sad bi bilo zanimljivo ustanoviti koja od tri moguće varijante obećava bolje rezultate. Ocjena ili čak i izbor može se izvršiti na temelju dvaju vrlo jednostavnih kriterija:
a) koja od izvedaba namota omogućuje bolju komutaciju;
b) koja od izvedaba daje u praksi sigurniju raspodjelu napona među lamelama.

Zapravo, oba ta uvjeta imaju stanovitu sličnost jer je i sigurna raspodjela napona u naponskim poligonima jednako tako uvjet dobre komutacije. No dobra komutacija ima i drugih preduvjeta. U principu će stepeničasti namot bolje komutirati od nestepeničastoga jer mu je, zbog manjega Hobartova faktora ξ, nešto manji i srednji napon samoindukcije e_s. No taj utjecaj nije posebno bitan zbog nevelike razlike.

Važniji je drugi uvjet, tj. bolje osigurani vektorski raspored napona. U praksi se, zbog odstupanja u izvedbi i materijalu (tehničkih tolerancija), pojavljuju razlike u magnetskim prilikama pod pojedinim polovima, pa i razlike u omskim otporima pojedinih grana namota, što sve može jako negativno utjecati na raspored napona i komutaciju. Spojke su izjednačenja oni konstrukcijski dijelovi koji osiguravaju ispravan pogon, bilo tako da pridonose pravilnom rasporedu pojedinih vektora napona, bilo da rastereću četkice od struja izjednačenja.

U svakome petljastom namotu spojkama je izjednačenja osnovna funkcija da uklanjaju naponske razlike između grana namota koje se nalaze pod raznim polovima, bez obzira na to zbog čega su te razlike nastale. Za viševojne namote, u našem razmatranju dvovojne, dolazi uz tu još i dodatna, ali važna funkcija osiguranja vektorskog položaja grana jednog ovoja namota prema drugome. To se postiže kad ima točaka istog potencijala u oba ovoja dvovojnog namota koje se mogu spojiti spojkom izjednačenja. Provjerimo u tom smislu naše odabrane varijante dvovojnog namota. Unaprijed se može zaključiti da na mogućnost postavljanja spojki izjednačenja neće utjecati činjenica da je namot izveden stepeničasto ili nestepeničasto. Ali bi mogla imati ulogu okolnost je li namot jednom ili dva puta u sebe zatvoren. Tako moramo provjeriti kako stoji stvar sa spojkama izjednačenja polusimetričnih i nesimetričnih namota, i to za jednom i dva puta u se zatvorene namote.

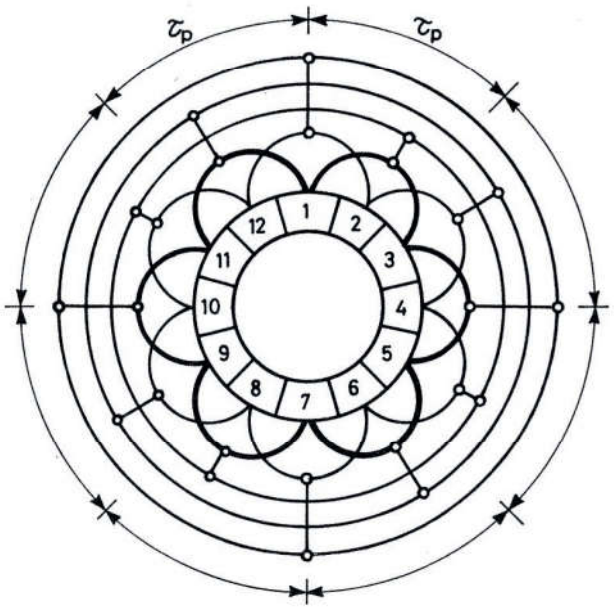
Namot je dvovojni jednom u sebe zatvoren kad mu je broj kolektorskih lamela ili svitaka neparan, i to bez obzira na sve ostale okolnosti. Jednako je tako on dva puta u sebe zatvoren pri parnom broju kolektorskih lamela. I sad pogledajmo opet primjere namota, dakako ovaj put školske, sa što manjim brojem utora, samo da slika bude jasnija. Prvo o polusimetričnim varijantama. Budući da je dvovojnome polusimetričnom petljastom namotu $\frac{k}{a}$ cijeli broj, a broj pari paralelnih grana a uvijek je parni broj zbog $a = 2p$, bit će broj lamela k uvijek parni broj. Dakle, polusimetrični je dvovojni petljasti namot uvijek dva puta zatvoren sam u sebe. Uzmimo za primjer namot s $k = 12$ i $2p = a = 6$. On će očito imati mogućnost postavljanja $\frac{k}{p} = 4$ spojke izjednačenja. Primjer pokazuje slika 6, gdje su



Sl. 6. Mogućnosti postavljanja spojki izjednačenja za polusimetrični, dva puta u sebe zatvoreni dvovojni namot

svici simbolički predočeni polukrugovima, i to debelo izvučenima za jedan, a tanko izvučenima za drugi ovoj. Normalno izvedive spojke izjednačenja prikazane su koncentričnim tanko izvučenim kružnicama. Kad se spoje točke jednakog potencijala, vidi se da svaka spojka izjednačenja spaja svitke samo jednog ovoja, što znači da nema nikakva fiksiranja naponskog poligona jednog ovoja prema drugome. To se postiže tek specijalnim spojkama izjednačenja, *Punga-spojkama,* koje prolaze s jedne strane rotora na drugi i spajaju krajeve jednih sa sredinama drugih svitaka. To je na slici 6. predočeno debelo izvučenim crtkanim linijama. Za naš primjer moguće je postaviti 12 takvih Punga-spojki. No u stroju granične snage mogu te spojke uzrokovati nove neprilike. Ako se i ne uzmu u obzir tehnološke teškoće prilikom njihova postavljanja, eventualne struje koje teku tim spojkama djeluju kao lokalna dodatna uzbuda jer se njihovo magnetsko polje zatvara jarmom rotora. Zbog svega toga Punga-spojke se izbjegavaju gdje god je to moguće, a

nesimetrični dvovojni petljasti dva puta zatvoreni namot

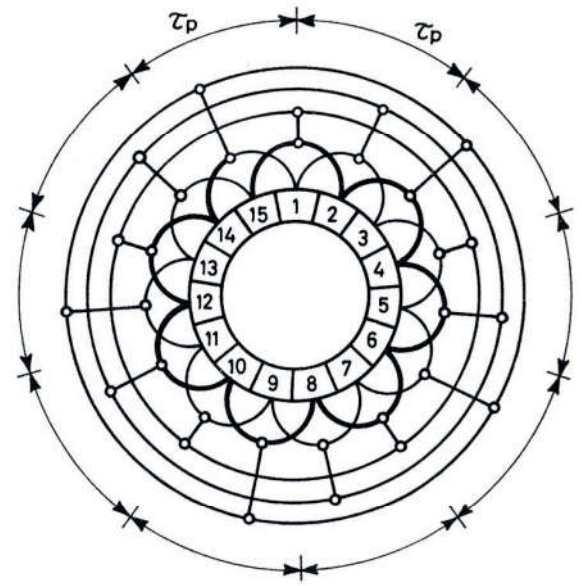


$k = 12;\quad 2p = a = 8;\quad \frac{k}{p} = 3;\quad \frac{k}{p} = 1\frac{1}{2}$

Sl. 7. Mogućnosti postavljanja spojki izjednačenja za nesimetrični, dva puta u sebe zatvoreni dvovojni namot

posebno u gradnji strojeva graničnih snaga. To dobrim dijelom obezvređuje dvovojni petljasti polusimetrični stepeničasti namot u konkurenciji s njegovim nesimetričnim rođacima, kad je riječ o gradnji strojeva granične snage. Da se u to uvjerimo, pogledajmo situaciju za nesimetrične namote. Slika 7. crtana na jednak način kao slika 6, prikazuje dvovojni nesimetrični petljasti dva puta u sebe zatvoren namot. Podaci su: $k = 12$, zbog

nesimetrični dvovojni petljasti jednom zatvoreni namot



$k = 15;\quad 2p = a = 10;\quad \frac{k}{p} = 3;\quad \frac{k}{a} = 1\frac{1}{2};$

Sl. 8. Mogućnosti postavljanja spojki izjednačenja za nesimetrični, jedanput u sebe zatvoreni dvovojni namot

čega je on dva puta zatvoren, $2p = a = 8$, $\frac{k}{a} = 1{,}5$, zbog čega je nesimetričan, i $\frac{k}{p} = 3$, zbog čega ima tri spojke izjednačenja. No kod svake od tih spojki vidimo da spaja naizmjence sad svitak jednoga, sad svitak drugog ovoja namota, na upravo najsretniji način. Slično je u jedanput zatvorenog namota s inače jednakim ostalim svojstvima. Njega u principu prikazuje slika 8. Podaci su: $k = 15$, zbog čega je on jednom zatvoren u sebe, $2p = a = 10$, $\frac{k}{a} = 1{,}5$, zbog čega je nesimetričan, i $\frac{k}{p} = 3$, zbog čega ima tri spojke izjednačenja. I tu vidimo svojstvo svih spojki izjednačenja izmjeničnog spajanja svitaka obaju ovoja, pa je i taj namot prikladan za gradnju strojeva granične snage.

Konačni rezultat razmatranja je jasan. Nesimetrični dvoslojni petljasti namot ima bolja svojstva za gradnju stroja granične snage od polusimetričnoga. Pri tom je od nesimetričnih još u prednosti stepeničasti pred nestepeničastim. Od simetričnih, ako uopće dolaze u obzir, pruža donekle zadovoljavajuća svojstva samo stepeničasti.

Sad se može dati cijeli pregled svojstava dobroga nesimetričnog dvovojnog petljastog namota za gradnju stroja granične snage.

a) Broj utora po paru polova mora biti cijeli neparni broj, i to veći od 26 ili 28, radi što manje promjene glavnoga magnetskog toka pod pojedinim polovima:

$$\frac{N}{p} = 2n - 1, \quad [n = (14),\ 15,\ 16,\ \ldots].$$

Zbog čega je osnovni uvjet za broj utora $\frac{N}{2p} \geqq 10$, ovdje, za stroj granične snage, pooštren, protumačit ćemo nešto poslije.

b) Broj svitaka po paru paralelnih grana ne smije biti cijeli broj da bi namot bio nesimetričan:

$$\frac{k}{a} \neq n, \qquad (n = 1,\ 2,\ 3\ldots).$$

c) Zbog uvjeta pod a) i b) mora i broj svitaka po paru polova biti cijeli neparni broj:

$$\frac{k}{p} = 2n - 1, \qquad (n = 1,\ 2,\ 3\ldots).$$

Dokažimo! Iz definicije $\frac{k}{p} = \frac{Nu}{p}$ izlazi:

$$\frac{N}{p} = \frac{\frac{k}{p}}{u}.$$

Budući da su lijeva strana jednadžbe, pa i nazivnik desne strane cijeli brojevi po vrijednosti, to i brojnik desne strane mora biti cijeli broj. Dalje je $\frac{k}{p} = 2\frac{k}{a}$ jer je namot dvovojan. Kako $\frac{k}{a}$ nije cijeli broj, a $\frac{k}{p}$ mora biti cijeli broj, to je moguće samo kad je $\frac{k}{a} = (n + 0{,}5)$, gdje je n prirodni cijeli broj, pa je $2\frac{k}{a} = 2n + 1$, tj. neparan broj, čime je dokazana početna tvrdnja.

d) Zbog uvjeta a), b) i c) mora i broj svitaka po utoru biti cijeli neparan broj:

$$u = 2n - 1, \quad (n = 1,\ 2,\ 3,\ 4).$$

Dokažimo za dvije moguće varijante kad je p neparno, i kad je parno. U definiciju $\frac{k}{p} = \frac{Nu}{p}$ uvrstimo alternativno obje mogućnosti.

1. p = neparno: Iz a) i c) su i $\frac{N}{p}$ i $\frac{k}{p}$ neparni pa su k i N nužno neparni. Zato i $\frac{N}{p}u$ mora biti neparno, a to je samo kad je i u neparno.

2. p = parno: kako bi se ispunili uvjeti da $\frac{N}{p}$ i $\frac{k}{p}$ budu neparni, moraju i k i N biti parni. A kako $\frac{N}{p}u$ mora biti parno, to je nužno da i u ovom slučaju u bude neparno.

e) Broj pari plova p nema bitnu ulogu jer su obje varijante, izvedba granične snage i s neparnim i s parnim brojem pari polova, moguće. Jedina je razlika u tome što je pri neparnom p riječ o jednome u sebe zatvorenom namotu, a pri parnom p o dva puta u sebe zatvorenom namotu.

Iako dvovojni petljasti nesimetrični namot pruža bolje mogućnosti izgradnje graničnih snaga, ipak dajmo, cjelovitosti radi,i sve podatke za eventualnu gradnju s polusimetričnim dvovojnim petljastim stepeničastim namotom. Jednakim načinom razmišljanja kao za nesimetrični namot dolazi se do ovih zaključaka za simetrični, koji još omogućje gradnju stroja graničnih snaga.

a) $\frac{N}{p} = 2n-1$, $[n = (14), 15, 16, ...]$;

b) $\frac{k}{p} = 2n$, $(n = 1, 2, 3, ...)$;

c) $u = 2n$, $(n = 1, 2, 3, ...)$;

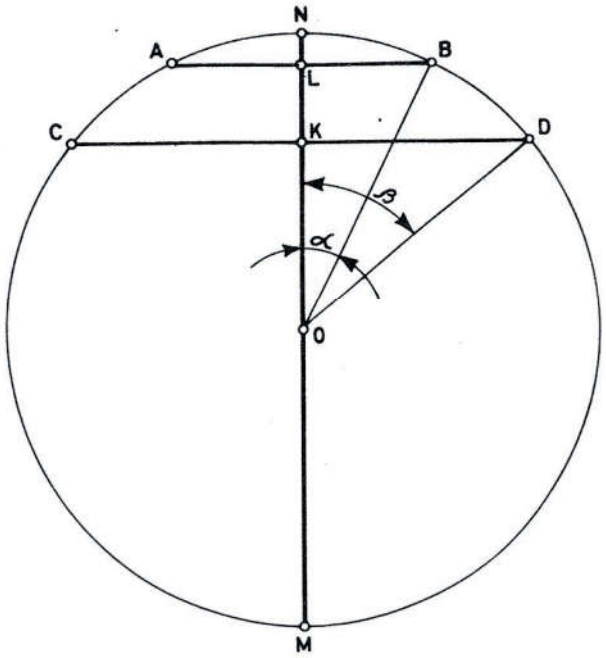
d) $p = n$, $(n = 1, 2, 3, ...)$.

9.5. Posljedice upotrebe dvovojnog namota

Dvovojni namot koji se nužno upotrebljava za izmjenični stroj granične snage, nije nikad potpuno simetričan. Zato inducirani naponi dviju paralelnih grana uključenih u istom trenutku na četkice ne mogu biti jednaki. To izaziva struje izjednačenja relativno visoke frekvencije među granama raznih ovoja, koje, ako su znatne, već i u praznom hodu mogu uzrokovati iskrenje i onemogućiti rad stroja. Relativno visoka frekvencija pojavljuje se zbog toga što je napon grane jednoga od ovoja čas veći, čas manji, pa to izaziva izmjenične struje s potpunom sinusoidom pri pomaku za jednu kolektorsku lamelu. Veličina izmjenične struje izjednačenja ovisi o visini napona koji je uzrokuje, tj. naponske razlike Δe koja maksimalno nastupa među četkicama između grana dvaju ovoja namota. U principu su te razlike napona Δe vide na slici 9.4–3.c. Na negativnoj (–) četkici leže vrhovi vektora (lamele!) 8 i 23 grane prvog ovoja te 9 i 24 grane drugog ovoja, a na pozitivnoj (+) četkici vrhovi vektora 2 i 17 grane prvog ovoja te 1 i 16 grane drugog ovoja, sve gledano za gornje paralelne grane na slici. Iskustvo govori da razlika napona Δe ne smije biti veća od neke vrijednosti, približno 1,6 V [L14], da se, uz ostale mjere koje treba poduzeti prilikom konstrukcije i gradnje stroja, omogući rad stroja. To dovodi do grubog pravila iz prethodnog potpoglavlja o potrebi velikog utora po paru polova, većem od 26 ili 28, jer što je broj utora po paru polova veći to je Δe manje. Međutim, vrijednost razlike napona Δe potrebno je u svakom primjeru izračunati. Za strojeve s jednom stranom svitaka u utoru ($u = 1$) u, recimo, gornjem sloju prvog, trećeg itd. utora ležat će strane svitaka prvog ovoja, a u gornjem sloju drugoga, četvrtog itd. utora strane svitaka drugog ovoja, pa će fazni

pomak među naponima grana biti $\left(\frac{p \cdot 360}{N}\right)$ električkih stupnjeva, iz čega se lako izračunava iznos Δe. Za strojeve s više svitaka po utoru ($u > 1$), pri čemu se ne smije zaboraviti da dolaze u obzir samo neparni brojevi za u, računati se može na osnovi slike 1. i načelnog rasporeda sa slike 9.4–3.c. Na slici 1. dužina $\overline{AB}$ označava stranu naponskog mnogokuta s manje svitaka, a dužina $\overline{CD}$ stranu mnogokuta s više svitaka, tj. $\overline{AB} = \frac{e_k}{\alpha_p} \cdot \frac{u-1}{2}$, a $\overline{CD} = \frac{e_k}{\alpha_p} \cdot \frac{u+1}{2}$, gdje je e_k srednja vrijednost napona među lamelama i α_p faktor prekrivanja pola $\frac{b_p}{\tau_p}$. Dužina $\overline{MN}$ je iznos napona stroja U, a $\overline{OB} = \overline{OD}$ je polovica tog iznosa. Tražena razlika napona Δe jednaka je dužini $\overline{LK}$, sve sa slike 1. Sad se može računati, uz pomoć odnosa na slici 1:

$$\sin\alpha = \frac{\overline{BL}}{\overline{OB}},\quad \sin\beta = \frac{\overline{KD}}{\overline{OD}},\quad \cos\alpha = \frac{\overline{OL}}{\overline{OB}},\quad \cos\beta = \frac{\overline{OK}}{\overline{OD}}.$$



Sl. 1. Pomoćna geometrijska konstrukcija za izračunavanje razlike napona Δe, mjerilo napona stroja $U = \overline{MN}$, $\Delta = \overline{LK}$

Iz toga dobivamo:

$$\Delta e = \overline{LK} = \overline{OL} - \overline{OK} = OB(\cos\alpha - \cos\beta) = \frac{U}{2}(\cos\alpha - \cos\beta).$$

Kako je $\cos\alpha = \sqrt{1-\sin^2\alpha}$, $\sin\alpha = \frac{2}{U} \cdot \frac{2e_k}{\alpha_p} \cdot \frac{u-1}{2 \cdot 2}$ i $\sin\beta = \frac{2}{U} \cdot \frac{2e_k}{\alpha_p} \cdot \frac{u+1}{2 \cdot 2}$,

izlazi konačno:

$$\Delta e = \frac{U}{2}\sqrt{1-\left[\frac{e_k}{U\alpha_p}(u-1)\right]^2} - \frac{U}{2}\sqrt{1-\left[\frac{e_k}{U\alpha_p}(u+1)\right]^2}. \qquad (1)$$

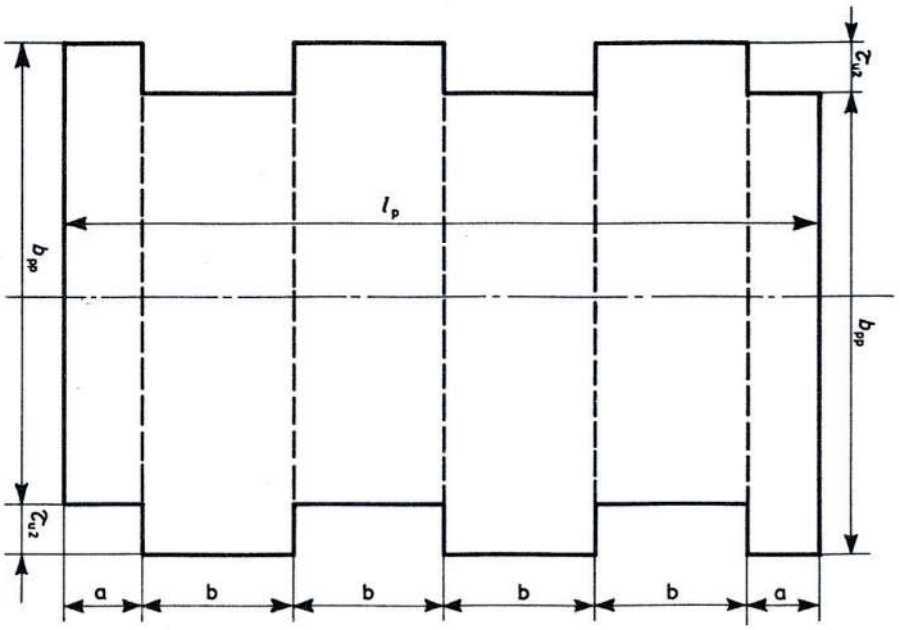
Budući da je drugi pribrojnik pod oba korijena u izrazu (1) znatno manji od prvoga, možemo približno, za praksu dovoljno točno, računati:

$$\Delta e \doteq \frac{U}{2}\left[1-\frac{e_k^2(u-1)^2}{2U^2\alpha_p^2}-1+\frac{e_k^2(u+1)^2}{2U^2\alpha_p^2}\right],$$

što, kad se sredi, daje vrijednost:

$$\Delta e \doteq \frac{e_k^2 u}{U\alpha_p^2} \tag{2}$$

i ta približna vrijednost poznata je iz literature [L14]. Potrebno je, dalje, potisnuti djelovanje razlike napona odgovarajućim skošenjem vodiča armature prema glavnome magnetskom polju. Zapravo, time bi se, bez obzira na broj utora po polu, moglo eliminirati djelovanje razlike napona Δe kad bi se samo skošenje dalo tehnološki tako izvesti da bude fizikalno potpuno korektno. Naime, skošenje utora na rotoru ne može se ostvariti zbog



Sl. 2. Skica stepenovanja (mjesto skošenja) glavnog pola radi smanjenja djelovanja razlike napona Δe. Pogled na polnu papuču iz zračnog raspora, gdje se vidi da su limovi »a« pomaknuti prema limovima »b« za polni korak τ_{u2}. Obično se izvode paketi b = 2a.

štapnog namota. A skošenje pola ne da se (ekonomski prihvatljivo) izvesti zbog kompenzacijskog namota, koji ima svaki istosmjerni stroj granične snage. To bi, naime bilo moguće samo kad bi svakome limu glavnog pola bili drukčije pozicionirani utori kompenzacijskog namota, što bi bilo nevjerojatno teško izraditi pa bi bilo basnoslovno skupo. Zato se i ide u stvarnim rješenjima s povećanim brojem utora po polu, a skošenje se izvodi grubo stepeničasto u svega dva kraka, što se izrađuje u principu sa svega jednim reznim alatom za lim pola. Skicu tako »skošenog« pola prikazuje slika 2.

9.6. Perspektive porasta granične snage istosmjernog stroja

Dosadašnje razmatranje jasno pokazuje da s rješenjem problema graničnih snaga istosmjernih strojeva ne stoji dobro. O tome još rječitije govori usporedba razvoja graničnih snaga raznih vrsta električkih strojeva. U posljednjih 30–40 godina porasla je granična snaga sinhronoga generatora približno 20 puta, s perspektivom da, prema današnjem stanju, poraste još 3–4 puta. Granična snaga istosmjernog stroja, u istome tom razdoblju gotovo da nije uopće porasla. Kako stoji s perspektivom, pokušat ćemo ocijeniti. Iz razvoja materijala za gradnju, tj. mehaničkih i magnetskih kvaliteta željeza i provodnosti bakra, ne dadu se objektivno očekivati povećanja obodne brzine v_a, indukcije u zračnom rasporu B_δ i strujnog obloga A, posebno zato što se, zbog stila gradnje, a osobito hlađenja, ne može očekivati znatniji napredak. Tu je riječ o sitnim postocima. Ostaje, dakle, napon samoindukcije e_s kao presudna granica, zapravo dobrota komutiranja. Što se u tom području radi? Odabire se šira zona komutacije da se smanji prosječna brzina promjene struje u komutaciji, tako da se uzme veće prekrivanje lamela omogućeno stepenovanjem četkica u držaču ili tandem-držačima s rascijepljenim četkicama. Odabiru se što pogodniji oblici i odnosi mjerâ utora i utorskog bakra. U neke se strojeve (obično brzohodnije generatore) ugrađuju u utore prigušni štapovi. Sve to ima za krajnji cilj da se smanji napon samoindukcije ili omogući komutiranje uz napon samoindukcije nešto viši od graničnoga. No sve te mjere mogu donijeti poboljšanja reda veličine od 10 %, i granična je snaga čvrsto »uhvaćena« u okolišu vrijednosti od 10 MW. Tako stoji s praktičkim izvedbama. No što je s istraživanjima? Jedan dio najnovijih [L27 i 28] ide u smjeru mogućnosti znatnog smanjivanja Hobartova faktora na osnovi konstrukcije istosmjernog stroja bez utora na armaturi! Osnovna je ideja tog pravca istraživanja da će rasipni magnetski tok oko svitka u komutaciji biti znatno manji ako svitak ne bude uložen u željezo. Tu koncepciju prate velike tehnološke teškoće, ali je, uz današnje stanje tehnike, moguća izvedba barem za sporohodne strojeve. Druga je neprilika u znatnom poskupljenju statora. Naime, zbog drastičnog povećanja stvarnoga zračnog (nemagnetskog) razmaka između statora i rotora, potrebna je znatno veća uzbuda, npr. [L27 i 28], dakle veća količina bakra na uzbudi, zatim više prostora za smještaj, veća visina glavnih polova, veći promjer kućišta stroja – ukratko, znatno veći, teži i skuplji stator. Što se može očekivati kao dobitak? Zaista osjetno smanjenje Hobartova faktora, koje će nesumnjivo omogućiti povišenje kritičnih granica (krivulje A i C na sl. 9.2–1). Nije potrebno da se zaključak detaljno analizira koliko bi to povišenje moglo iznositi numerički jer se ono neće moći do kraja iskoristiti, već samo do granice koju određuje napon među lamelama kolektora e_k uz upotrebu optimalnoga dvovojnog petljastog nesimetričnog namota. Budući da taj namot omogućuje na osnovi podjele e_k podizanje granice B i D sa slike 9.2–1. na praktički dvostruku vrijednost, to će nove granice sa strojem bez utora biti prema relacijama (9.2–3.b) i (9.2–3.d):

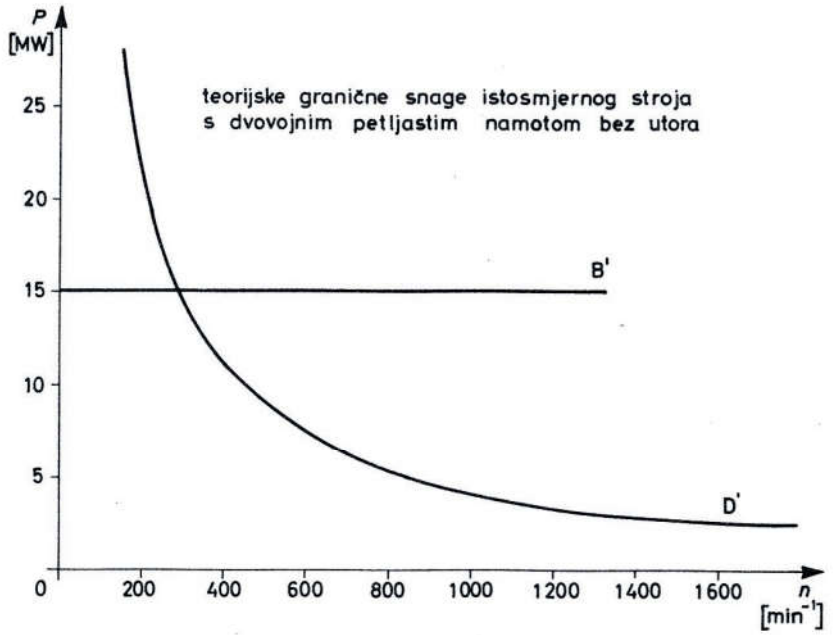
$$P_{gr} = 15\,000 \text{ [kW]}, \tag{1}$$

odnosno:

$$P_{gr} = \frac{4\,340\,000}{n} \text{ [kW]}. \tag{2}$$

Te su granice nacrtane na slici 1. kao krivulje B' i D'. One su, gledano s današnjeg stanja tehnike, krajnje granice dometa istosmjernog stroja u klasičnoj izvedbi. Zanimljivo je da se u praksi još nije pojavio ni jedan stroj granične snage bez utora na armaturi. Nije samo u pitanju tehnologija već u prvom redu cijena, pa je za to područje porasta od 50 % još uvijek jeftinije uzeti dva stroja na istoj osovini, iako ni to rješenje nije bez dodatnih troškova.

Istraživanja [L27 i 28] pokazuju zapravo da bi se s gledišta ograničenja granične snage naponom samoindukcije e_s u izvedbi stroja bez utora mogla postići granična snaga (za sporohodne strojeve) od 22 do 23 MW. Ograničenje na 15 MW sa slike 1. ili relacije (1) sad zapravo uzrokuje opet napon među lamelama e_k. Nameće se pomisao ne bi li se *trovojnim petljastim namotom* ta granica uklonila slično kao što petljasti dvovojni namot uklanja granicu od 7,5 MW, prema relaciji (9.2–3.b). Jer, kao što neke vrste dvovojnoga petljastog namota mogu »podijeliti« napon među lamelama na približno polovicu onoga pri jednovojnom namotu, tako bi mogle neke vrste trovojnoga petljastog namota »podijeliti« taj napon među lamelama na približno jednu trećinu. Tehnološke teškoće u toj izvedbi ne bi se povećale prema onima kod stroja bez utora s dvovojnim petljastim namotom. Detaljna istraživanja trovojnoga petljastog namota dat će odgovor na to pitanje.



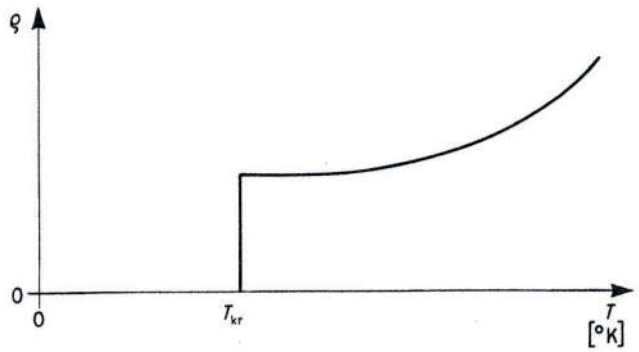
Sl. 1. Granične snage istosmjernog stroja bez utora

Za povećanje snaga istosmjernog stroja, ili barem stroja sličnih ili istih vanjskih karakteristika, moraju se očito tražiti nova rješenja izvan klasičnih konstrukcijskih i tehnoloških okvira. Izvjesna obećanja u tom pogledu pružaju novija istraživanja mogućnosti primjene supravodljivosti u gradnji električkih strojeva. Zbog toga ćemo o tome dati par najosnovnijih informacija, iako su ozbiljna praktička rješenja u svakodnevici još dosta rijetka i imaju istraživački karakter.

9.7. Perspektive »istosmjernih« strojeva uz primjenu supravodljivosti

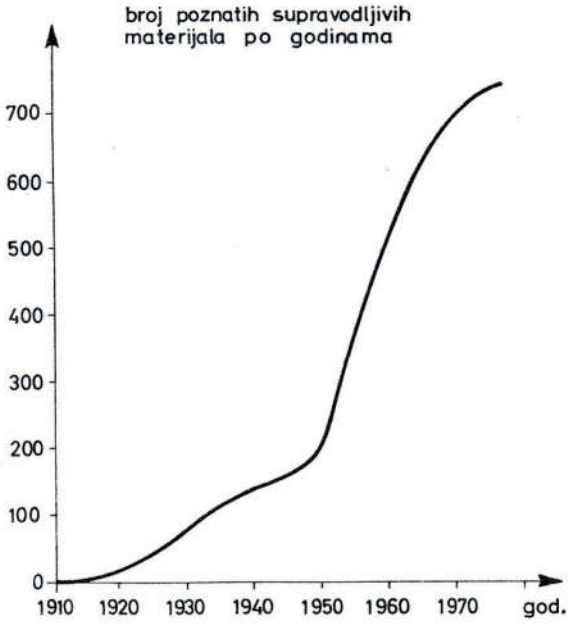
Da se ispravno ocijene tehničke i ekonomske mogućnosti upotrebe vodiča u supravodljivom stanju pri gradnji električkih strojeva, posebno istosmjernih vrsta, potrebno je u najgrubljim crtama poznavati ne toliko samu teoriju supravodljivosti koliko najvažnije činjenice koje karakteriziraju tu pojavu. U tom smislu će se ovdje iznijeti potrebne činjenice, bez dubljeg ulaženja u samu bit supravodljivosti.

Većini materijala, posebno vodiča, smanjuje se specifični otpor kad im opada temeperatura. Početkom ovog stoljeća zapaženo je da nekim materijalima pri sve dubljem hlađenju, u blizini apsolutne nule naglo opada otpor, pa konačno izgube bilo kakav mjerljivi specifični otpor ρ. Ti su materijali uglavnom neki metali, zatim slitine i ostali spojevi. Tipičnu ovisnost specifičnog otpora ρ o apsolutnoj temperaturi T prikazuje skica na slici 1, gdje T_{kr} označuje tzv. kritičnu temperaturu pri kojoj nestaje specifički otpor i



Sl. 1. Temperaturna ovisnost specifičnog otpora supravodiča

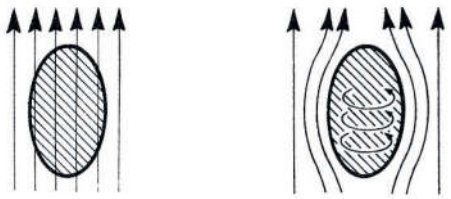
njezin je iznos karakterističan za pojedine supravodiče. Tokom vremena otkrivao se sve veći broj materijala koji pokazuju to svojstvo supravodljivosti, pa se sa slike 2. vidi da je takvih materijala sad već oko tisuću. Za svaki od njih važna je *kritična temperatura* T_{kr} pri kojoj taj materijal prelazi u supravodljivo stanje. Te su kritične temperature, iako različite za razne vodiče, ipak sve veoma niske, blizu apsolutnoj nuli i iznose samo malo Kelvinovih



Sl. 2. Broj otkrivenih supravodiča – vremenski razvoj u ovom stoljeću

stupnjeva. Druga važna karakteristika vodiča u supravodljivom stanju je reakcija na magnetsko polje. Simbolički to predočuje slika 3. Naime, mirno magnetsko polje prolazi nesmetano vodičem koji je u običnom (normalnom, nesupravodljivom) stanju, što je simbolički prikazano na slici 3.a. U supravodljivom stanju magnetsko polje kao da ne može uopće ući u vodič. U njemu se odmah razvijaju struje koje stvore protupolje. Te struje

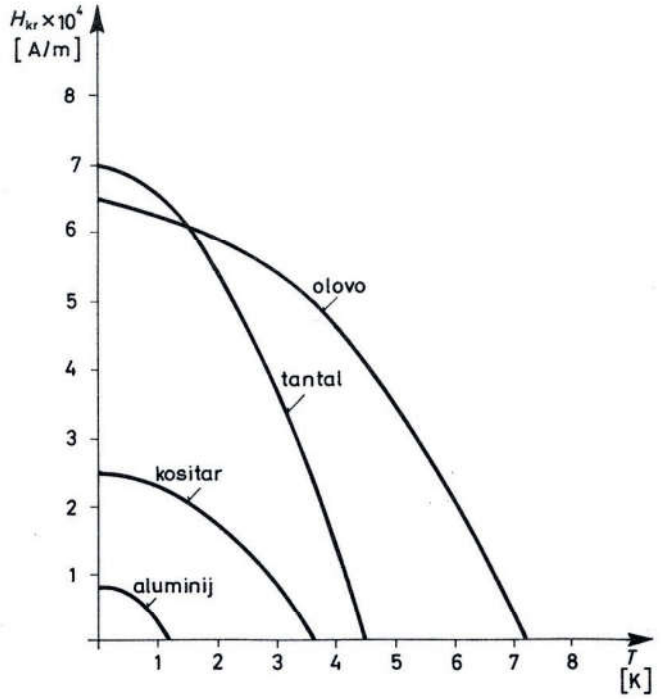
simbolički prikazuje slika 3.b. To su *kružne suprastruje, oklopne struje* ili *zaštitne struje,* kako se nazivaju u literaturi. Takvo stanje karakteristično je za relativno slaba magnetska polja. Naime, kad magnetsko polje raste i poraste više od neke kritične vrijednosti H_{kr}, magnetski tok naglo ulazi u supravodič, koji istog časa prestaje to biti, tj. skokomice poprima neki konačni (za materijal karakteristični) specifički otpor. (Preciznosti radi, spomenuti efekt vrijedi kako je opisan samo za supravodiče tipa I, a za one tipa II samo približno, tj.



Sl. 3. Skica uz tumačenje principnog ponašanja supravodiča u magnetskom polju

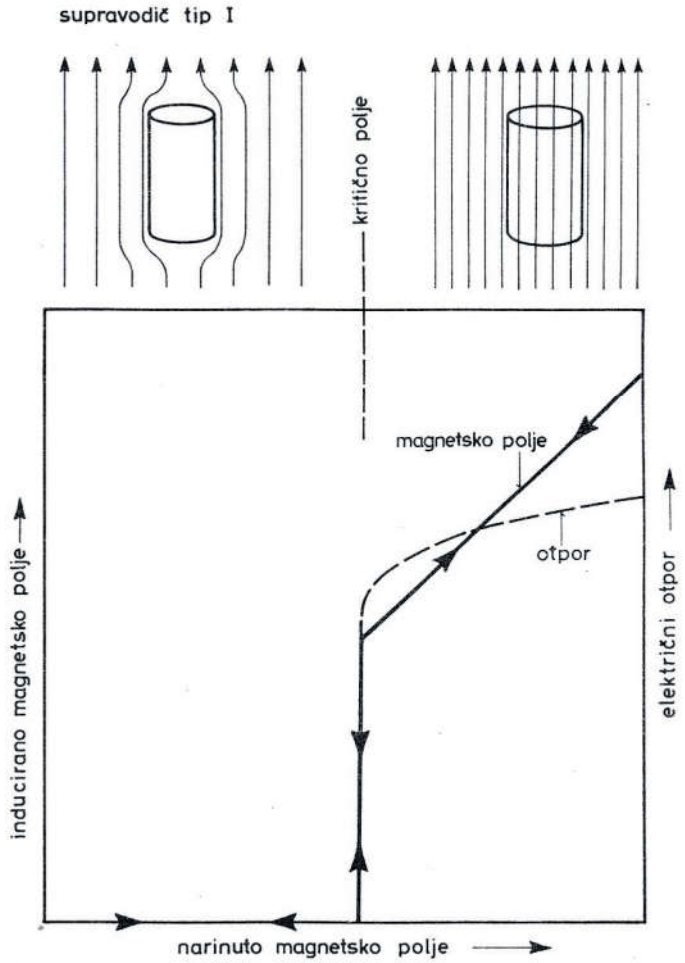
supravodljivost se gubi tek pri gornjemu kritičnom magnetskom polju, što će se sve obrazložiti u daljnjem tekstu.) Kritično magnetsko polje ovisi i o temperaturi vodiča i što je ona niža, kritično je polje veće. Za neke metale prikazuje taj odnos slika 4. Važno je utvrditi da je oblik krivulja H_{kr} (T) kako ih prikazuje slika 4. tipičan za supravodiče, pa vrijedi relacija:

$$H_{kr} = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_{kr}}\right)^2\right]. \tag{1}$$



Sl. 4. Ovisnost kritičnoga magnetskog polja o temperaturi za neke supravodiče

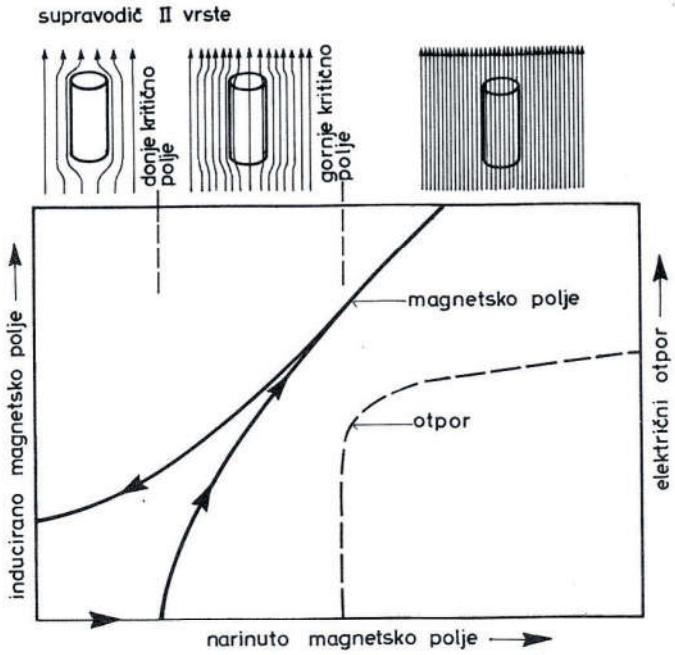
Tu je H_0 vrijednost kritičnoga magnetskog polja pri 0 [°K]. Dalje je bitno da nema razlike djeluje li na supravodič vanjsko magnetsko polje ili vlastito magnetsko polje, tj. polje uzrokovano vlastitim strujama. Iznos tih magnetskih polja za supravodiče koji pokazuju spomenuto ponašanje (najčešće su to metali) nizak je i nije ostavljao nade da će se moći na toj osnovi ostvariti jača elektromagnetska ulančenja potrebna za gradnju električkih strojeva. No s vremenom su eksperimentalno pronađeni supravodiči (najčešće slitine) nešto drukčijeg ponašanja. Tim se supravodičima nakon dosezanja kritičnog polja ne gubi odmah svojstvo supravodljivosti kad magnetski tok uspije dijelom prodrijeti u sam supravodič. Tek uz znatno jača magnetska polja opet se naglo pojavljuje otpor. Tako su klasificirane dvije vrste supravodiča. Prva, uvodno opisana, s jednim iznosom kritičnoga magnetskog polja kojem su kritične gustoće polja manje od 0,1 [T], nazvana je supravodičem tipa I ili supravodičem prve vrste. Njegovo ponašanje prikazuje simbolički slika 5, gdje su iznad kvalitativnih odnosa magnetskih polja nacrtani i shematski odnosi



Sl. 5. Načelni prikaz ponašanja supravodiča tipa I u magnetskom polju (gore) i ovisnost otpora i magnetskog polja o narinutome magnetskom polju koje djeluje na vodič (dolje)

(komadića) vodiča i magnetskog polja. Druga vrsta supravodiča, s dva kritična magnetska polja, donjim i gornjim, nazvana je supravodičem tipa II ili supravodičem druge vrste. Gustoća magnetskog polja u točki gornjega kritičnog magnetskog polja znatno je veća. Nekim vrstama (niobijeve ili galijeve slitine) doseže ona i više od 20 T, čak u najnovijim

istraživanjima i do 40 T. Budući da efekt supravodljivosti iščezava tek pri gornjemu kritičnom magnetskom polju, ta je vrsta vodiča, svojstava prikazanih na slici 6, prikladna za gradnju električkih strojeva. Dakako, prave egzaktne ocjene mogućnosti ne daje samo ovaj prikaz. Što se npr. događa kad se magnetsko polje mijenja općenito ili zbog promjene struje? I kako dolazi do ponašanja supravodiča tipa II koje se čini kontradiktorno poznatim zakonitostima? Ipak se mora razmotriti i ocijeniti supravodljivo stanje uopće.



Sl. 6. Načelni prikaz ponašanja supravodiča tipa II u magnetskom polju (gore) i ovisnost otpora i magnetskog polja o narinutome magnetskom polju koje djeluje na vodič (dolje)

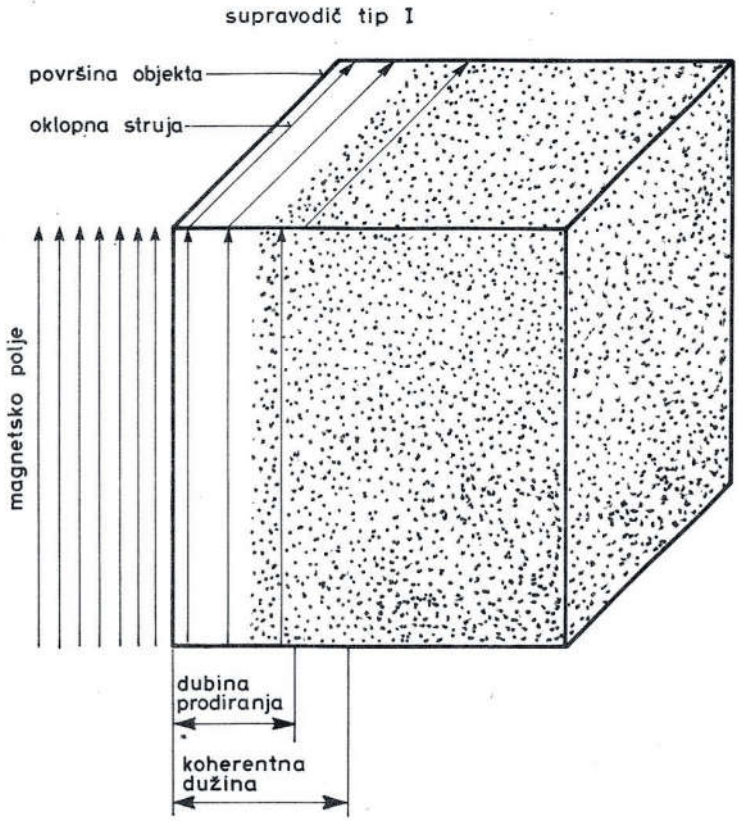
Fenomenološki je bit električkog otpora u ovome. Slobodni elektroni u metalu (vodiču) čine neku vrstu *elektronskog plina*. Slobodni elektroni se (pri normalnoj temperaturi) kreću u svim pravcima i sudaraju se i međusobno i s elektronima vezanima u kristalne rešetke uz jezgre. Suma djelovanja tih elektrona jednaka je nuli baš zbog slobode njihova kretanja i vrlo velikog broja. Ako vlada razlika potencijala u metalu (narinuti napon), tad svi slobodni elektroni poteku jednim smjerom – poteče struja. Pri tome se oni sudaraju s elektronima vezanima u kristalnim rešetkama i ta sudaranja (gubitak energije itd.) rezultiraju otporom. Veći otpor u toplijem stanju tumači se većom živahnošću titranja cijele strukture kristalne rešetke, tj. vezanih elektrona i jezgri. Kako se vodič hladi, kristalna je rešetka sve mirnija, tj. *dinamički čistija*. Otpor iščezava, prema toj slici, kad se kristalna rešetka toliko umiri da slobodni elektroni prolaze kroz nju bez sudaranja, dakako kod onih materijala gdje je ostvaren upravo taj uvjet. No ta, u najgrubljim potezima točna slika ipak ne može objasniti npr. razlike ponašanja supravodiča tipa I i tipa II, pa samo ponašanje supravodiča tipa II itd. To se danas tumači tzv. BSC-teorijom (postavljena 1957), koja nosi ime po početnim slovima prezimena svojih autora (J. Bardeen, L. Cooper i I. Schriefer). Ona zapravo objašnjava ponašanje elektrona u submikroskopskom stanju, i teško ju je i pokusom dokazati, što je dokraja uspjelo tek 1971. godine. Po toj je teoriji slobodnim elektronima, pri temperaturi nižoj od granične za supravodljivost, povoljnije (u energetskom smislu) da se slože u novo, *uređenije* stanje. Oni se sparuju u tzv. Cooperove

(Kuper) parove elektrona. Shvatiti u cijelosti formiranje tih parova nije jednostavno, ali za našu predodžbu o supravodljivosti to nije ovaj čas bitno jer se za ulaz (prelaz) u supravodljivo stanje zahtijeva samo da *dovoljno* elektrona pređe u spareno stanje. Koncentracija Cooperovih parova ovisi o temperaturi tako da se svi elektroni sparuju pri apsolutnoj nuli.

Cooperov par može se donekle smatrati novom (vrstom) česticom, s dvostrukim nabojem i dvostrukom masom elektrona, što se može ostvariti samo u metalu. Stvarni promjer Cooperova para, tj. udaljenost među sparenim elektronima, naziva se *dužinom koherencije* ili *koherentnom dužinom* (udaljenošću). Red njezine veličine je stotisućiti dio centimetra. Teorijskom predodžbom o formiranju Cooperovih parova razumijeva se da su svi takvi parovi u nekom supravodiču u jednakom stanju gibanja. Ili njihova središta mase miruju, ili se, kad supravodičem teče struja, gibaju jednakom brzinom u smjeru struje.

Nešto bi se više moralo reći i o ponašanju supravodiča u magnetskom polju nego što je uvodno rečeno.

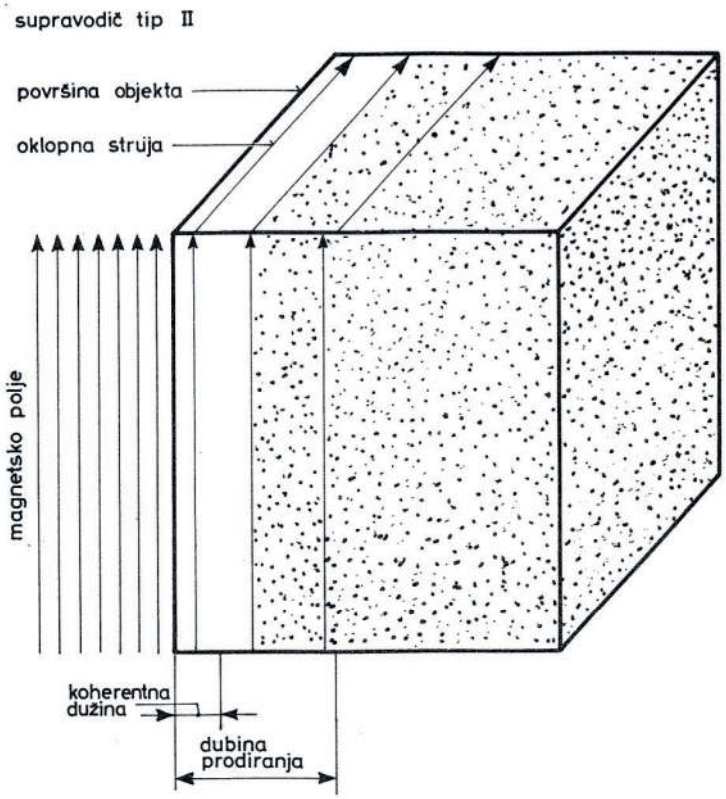
U slabome magnetskom polju supravodič djeluje kao savršeni dijamagnet i istiskuje magnetsko polje. Polje se izgubi (povuče) unutar jednoga tankog površinskog sloja. Unutrašnjost predmeta (žice) štiti se od magnetskog polja izazvanom *suprastrujom*. Debljina tog sloja, koja se naziva *dubina* (magnetskog) *prodiranja*, ovisi o temperaturi i materijalu, a njezin red veličine također je stotisućiti dio centimetra. U drugu ruku, na koncentraciju supravodljivih Cooperovih parova utječe magnetsko polje i ona se počinje smanjivati unutar dužine koherencije. Naime, ako u zoni dubine prodiranja vlada magnetsko polje, onda u toj zoni elektroni Cooperovih parova bivaju skretani i razbijaju se parovi, ali samo ako je polje dovoljno jako i ostale prilike tome pogoduju. Odnos između



Sl. 7. Odnosi dubine prodiranja i koherentne dužine za supravodič tipa I

dužine koherencije i dubine prodiranja specifičan je za konkretni supravodljivi metal i određuje pojedinosti njegove reakcije na jako magnetsko polje.

Tako je supravodiču tipa I koherentna dužina (razmak elektrona u Cooperovu paru) veća od dubine prodiranja magnetskog toka – vidi princip na slici 7. Za supravodič tipa II upravo je obrnuto, tj. dubina prodiranja magnetskog polja veća je kod koherentne dužine, kako je to u principu predočeno na slici 8.



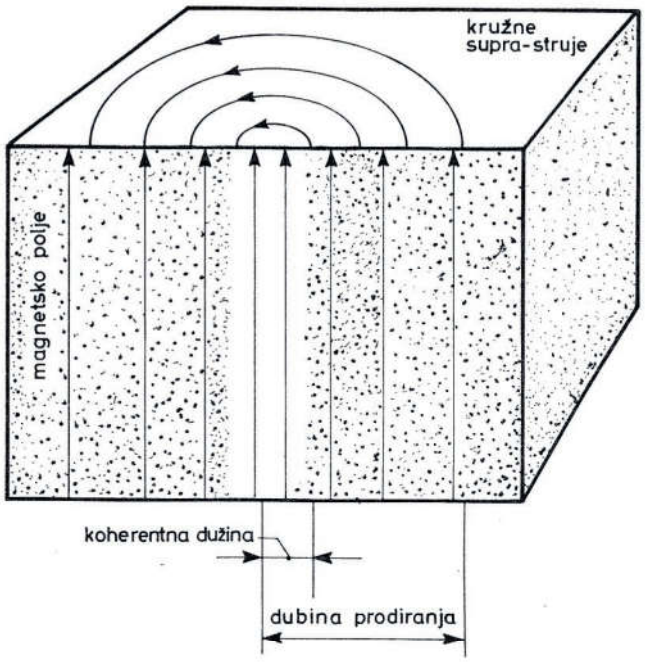
Sl. 8. Odnosi dubine prodiranja i koherentne dužine za supravodič tipa II

U tankoj površinskoj zoni, gdje se dubina prodiranja magnetskog polja i dužina koherencije preklapaju, očituje se utjecaj magnetskog polja na Cooperove parove, tako da ih nastoji razbiti. Tako, kad polje poraste preko neke mjere, razbija isuviše Cooperovih parova i supravodič prelazi u obični vodič. To je ponašanje supravodiča tipa I, i ono je lako razumljivo.

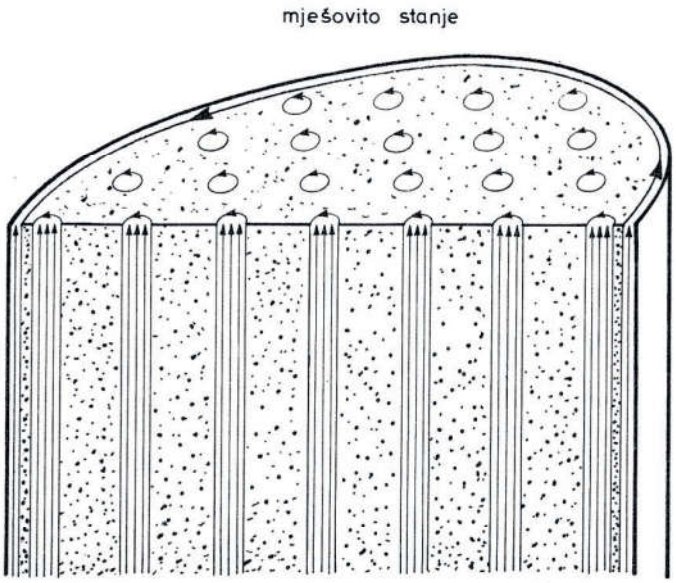
Međutim, i kad dosegne donje kritično polje, magnetsko polje koje nužno prodire u supravodič tipa II očito ne ruši supravodljivost. Jedini je logički zaključak da u takvu supravodiču postoji jedno *mješovito stanje*, da su istodobno unutar konačnog volumena vodiča i magnetski tok i supravodljivi vodič.

Mnogobrojnim istraživanjima, uglavnom u novije i najnovije vrijeme, dokazano je da je mješovito stanje supravodiča tipa II realnost. Zanimljivo je da su teorijski dokazi prethodili eksperimentalnoj potvrdi, koja je dobivena tek 1971. godine. Opisat ćemo bit toga mješovitog stanja. U presjeku supravodiča (pri magnetskom toku između donje i gornje kritične granice kad je dio magnetskog toka prodro u supravodič) nalazi se cijeli sistem sitnih vrtloga kružnih suprastruja ulančenih s pojedinim silnicama (grupama silnica) magnetskog toka. Ti su vrtlozi zapravo cijevi magnetskog toka i najmanje su moguće

vrijednosti magnetskog toka, *fluksoni*. Jedan takav vrtlog (detalj) prikazuje u principu slika 9. Silnice magnetskog su toka usmjerene paralelno s narinutim poljem, pri čemu jedan vrtlog ulančuje jedan točni (diskretni) iznos toka. To ujedno znači da se magnetski tok može mijenjati (vremenski, dakako) samo skokovito, što ima znatne posljedice na mogućnost aplikacija.



Sl. 9. Osnovni (idejni) prikaz cijevi magnetskog toka, fluksona, u supravodiču tipa II između donjeg (H_{kr1}) i gornjeg (H_{kr2}) magnetskog polja



Sl. 10. Osnovni (idejni) prikaz rasporeda fluksona u supravodiču tipa II za neko konkretno magnetsko polje između vrijednosti donjeg i gornjeg kritičnog polja

Magnetsko polje u jednome samom vrtlogu proteže se preko područja od približno dvije dubine prodiranja, s maksimalnim intenzitetom u sredini. Koncentracija supravodljivih Cooperovih parova opada unutar dužine koherencije prema osi magnetskih linija. U samoj osi metal je, u principu, normalni vodič. Međusobno djelovanje dviju linija toka odbojno je u tipičnom supravodiču tipa II. Oko svakog *otočića* toka unutar kojeg je vodič normalan (a ne supra!) teče cirkularna suprastruja. Raspored *ulančenih* vrtloga prikazuje približno slika 10.

Magnetske se linije (silnice), reprezentanti magnetskog toka, drže skupa narinutim vanjskim poljem i formiraju se u obliku kristalne rešetke, i to trokutnog rasporeda okomito na presjek vodiča. Što je veća gustoća magnetskog polja, to je i rešetka gušća. Točnije rečeno, do donjega kritičnog polja nema rešetke i cijela je suprastruja obuhvaćena tokom na površini samog vodiča. Počevši od donjega kritičnog polja nastaje i s daljnjim se porastom polja *zgušnjava trokutasta rešetka*. Pri tome se pojavljuju prvi vrtlozi uz rub vodiča i kreću se s površine prema unutrašnjosti objekta. Pri gornjemu kritičnom polju normalno vodljive jezgre počnu se prekrivati i cijela unutrašnjost objekta postaje normalni vodič. Diskretni raspored magnetskog toka u vrtloge i unutar vrtlogâ ima neželjenih posljedica. Zbog toga prelaz nekog svitka iz supravodljivoga u normalno vodljivo stanje može (što ovisi o materijalu) nastupiti pri strujama mnogo manjima od kritičnih. Taj se prijelaz događa zbog međusobnog djelovanja linija toka stvorenih u vodiču pri magnetskom polju i struji koja protječe svitkom. Linije toka u strujom protjecanom supravodiču čine silu okomitu na oboje, tj. na struju i na silnice toka. Ako tok nije *pričvršćen* za žicu, počet će se on micati. Za vrijeme toga gibanja nastupa izvjesna vrsta ugrijanja s karakterom trenja, koja lokalno zagrijava žicu i može (ali ne uvijek!) ishoditi ili uzrokovati trenutačan prijelaz vodiča u normalno vodljivo stanje.

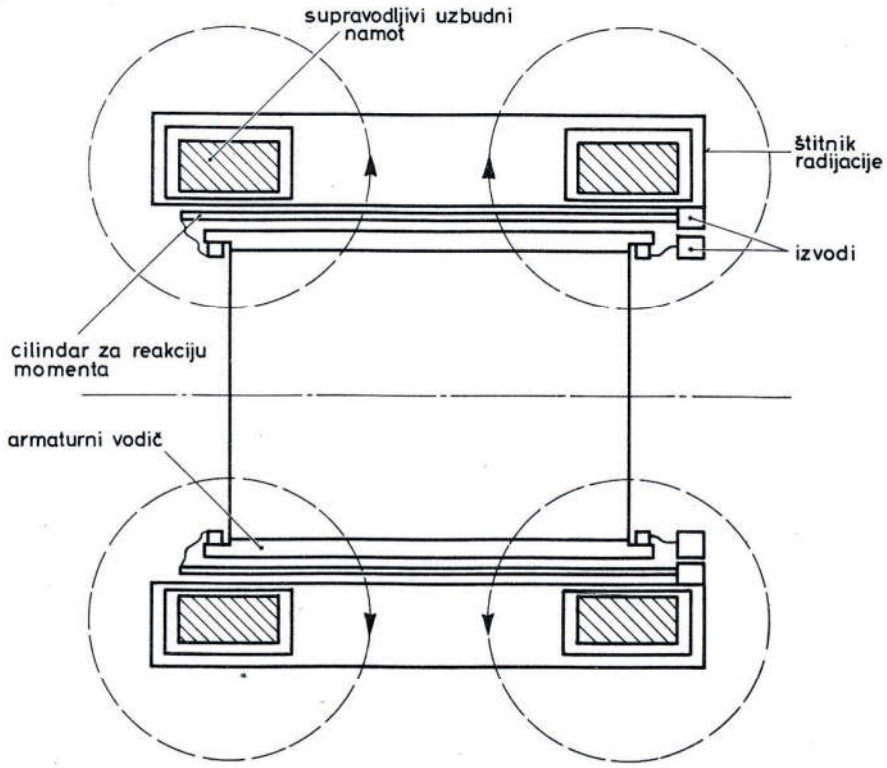
Osim već spominjanih kritične *temperature*, kritičnoga *magnetskog toka* i *struje* daljnje neprilike stvara i »kritična« promjena magnetskog toka (bolje indukcije) $\mathrm{d}B/\mathrm{d}t$ ili (što slijedi tome) struje $\mathrm{d}I/\mathrm{d}t$. Mijenja li se struja, mijenja se i vlastito magnetsko polje, tj. i *gustoća trokutaste rešetke*. Magnetski tok se »pomiče« na upravo opisani način, sa svim negativnim efektima. Tako supravodič postaje neprikladan za izmjenične struje iole većeg intnziteta. Za informaciju, po današnjem stanju tehnike moglo bi se računati s izmjeničnim strojevima uz primjenu supravodljivosti, ali samo za frekvenciju do približno 1 Hz. Dakako da i za istosmjerne strojeve promjena struje mora biti iz istog razloga postepena, da se ne izazove *preskok* u normalno stanje. I takvo se teško ograničenje postiže tek uz primjenu vrlo skupe tehnologije u izradi vodiča.

Za gradnju strojeva još je i pitanje kako ohladiti vodiče na potrebne niske temperature i kako zadržati temperaturu stalno ispod kritične točke T_{kr}. Red veličine tih temperatura je manje od –200°C, a obično svega nekoliko Kelvinovih stupnjeva. Danas nema druge mogućnosti, nego da se supravodljivi namot ili cijeli dio stroja drži u jednoj rashladnoj napravi, *kriostatu*, u kojoj je takvo agregatno stanje da se ne može brzo ni lako mijenjati temperatura. Vodič u krutom kriostatu ne može nam pomoći. Znači, on se mora držati u tekućini koje je kritična temperatura (za prijelaz u plinovito stanje) niža od kritične temperature supravodiča. Da se stekne utisak o redu veličine tehničkih teškoća, dano je u tablici nekoliko podataka o najvažnijim plinovima koji teorijski dolaze u obzir (kao tekućine) za gradnju hladionika za namote električkih strojeva.

U tablici dušik (77,3°K) i kisik (90°K) ne dolaze u obzir jer se većina kritičnih temperatura supravodiča gomila negdje oko 5°K, a druge velike grupe supravodiča oko 20°K. Dakle, moglo bi se ići na kriostate s neonom i vodikom (20 i 27°K) za vodiče s kritičnim temperaturama većima od 20 i 27 Kelvinovih stupnjeva. Međutim, upotreba neona uopće se ne razmatra jer nema supravodiča s kritičnom temperaturom od oko 27 K, a

Plin	Točka vrenja		Toplina isparavanja [kWs/kg]
	°K	°C	
Helij	4,2	–268,1	20
Vodik	20,4	–252,8	448
Neon	27,1	–246,1	85,4
Dušik	77,3	–195,9	199
Kisik	90	–183,2	214

upotreba vodika još je u dalekoj perspektivi jer su kritične struje premale za postojeće supravodiče. Tako ostaje helij za vodiče kritična temperatura kojih premašuje 5°K. U principu bilo bi dobro da sva rashladna sredstva ne mogu lako prelaziti iz tekućine u paru. Tu, na žalost, helij ima loša svojstva jer, recimo, za isparivanje 1 kg treba samo 20 kWs, za neon 85,4, a za vodik čak gotovo 450 kWs/kg. Cijela jedna rashladna tehnika bavi se tim pitanjima. No, tako niske temperature pogonskih svitaka vode do jedne daljnje neprilike u praktičkoj upotrebi. Važno je, naime, da na te uronjene namote ne djeluje moment (ili sile) direktno jer su sami svici krhki kao staklo. To smanjuje mogućnost upotrebe i za svitke koji se gibaju (ne miruju). Krhkoća je posljedica izuzetno niske temperature. Danas se svici grade praktički samo u kriostatima od tekućeg helija. Temperatura je tih svitaka praktički 4°K (–268°C) jer svi dosad nađeni supravodiči imaju neobično nisku kritičnu temperaturu, pa se ostali plinovi ne mogu upotrijebiti. To ima još jednu manu. Naime, veliki su gubici energije za održavanje hladnjaka, tj. temperature u hladnjaku – ukratko gubici zbog hlađenja.



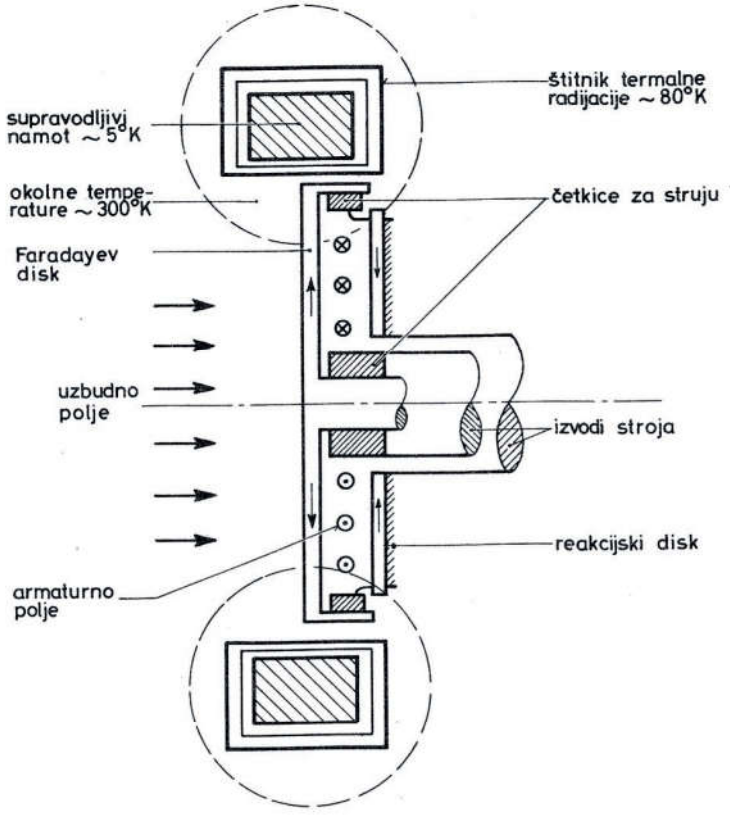
Sl. 11. Princip djelovanja supravodljivog (unipolarnog) motora u obliku bubnja

Jasno je, poslije izlaganja fizikalnih svojstava supravodiča i tehničkih mogućnosti hlađenja, da je njihova upotreba u elektrostrojarstvu još danas rijetka, i da su tehničke granice danas još vrlo uske. Ekonomske granice, tako reći, danas još nema jer je sve što se gradi još neekonomično i poduzima se praktički samo radi istraživanja. Najnoviji razvoj doveo je do upotrebe u području elektromagneta, posebno izuzetno velike snage i koncentracije energije u jedinici volumena. Danas se ulažu golemi napori i sredstva u razvoj turbogeneratora (sinhronih) za najveće snage. Iako je početak istraživanja upotrebe bio upravo na području istosmjernih strojeva, ne može se reći da se napreduje velikim koracima. Ograničimo se na podatke o izvedenim (pokusnim) strojevima i o onima upotrijebljenim u praksi, i zaključno procijenimo mogućnosti gradnje istosmjernih strojeva snage veće od graničnih (klasičnih).

Već u samom početku istraživanja primjene supravodljivosti nametnuo se odmah već napušteni unipolarni (homopolarni) stroj. Na slici 11. njegova je načelna izvedba (1. varijanta), takozvana bubnjasta izvedba, i to, dakako, u *supravodljivoj* verziji. Od klasične izvedbe ona se ne razlikuje samo time što je uzbudni namot uronjen u kriostate s tekućim helijem, koji su valjano izolirani i od prijelaza topline i od isijavanja, već i po tome što je između statora i rotora ugrađen posebni metalni cilindar koji treba da preuzme moment, bolje rečeno reakciju momenta na statorski namot.

Na slici 12. prikazana je principna skica druge varijante unipolarnog stroja u takozvanoj *tanjurastoj* izvedbi.

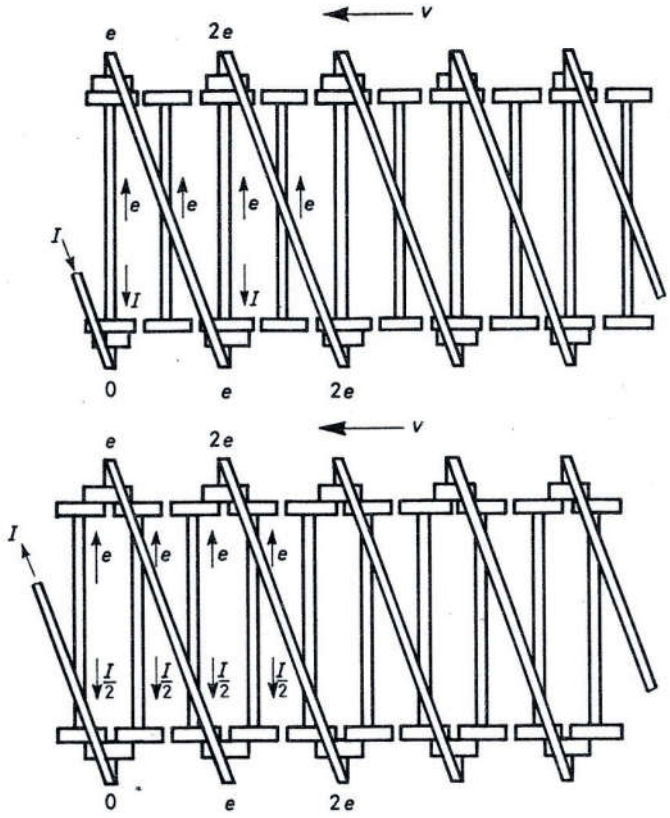
Rotor stroja je Faradayev tanjur (disk), a struje teku rotorom u radijalnom smjeru od središta diska prema njegovoj periferiji, tako da su četkice jednog polariteta na osovini, a drugoga su na periferiji tanjura. I tu je namot uronjen u kriostat (termički izoliran u dva stupnja) i posebnom je nepomičnom mtalnom pločom (diskom) zaštićen od reakcijskog



Sl. 12. Princip djelovanja supravodljivog (unipolarnog) motora u obliku diska

djelovanja momenta. Izvodi su dva cilindra (koaksijalna), od kojih je jedan spojen s četkicama na osovini, a drugi s četkicama na periferiji. U praktičkim pokusima pokazao se zasad boljim taj tip u tanjurastoj izvedbi jer ima prednosti u gradnji kriostata i održavanju temperature (gubici zbog hlađenja), pa i u samoj izvedbi rotora, a posebno u *spoju namota,* tj. prilikom određivanja odnosa između napona i struje, o čemu će uskoro biti riječi. Mana mu je u usporedbi s bubnjastim tipom u tome što gubi (ne ulančuje) dio magnetskog toka koji prolazi u zoni četkica (vidi sliku).

Prvi pokusni model građen u Engleskoj u tanjurastoj izvedbi za snagu od 1,5 kW iznenadio je graditelje jer je dao snagu od cca 38 kW, tj. više od 20 puta veći magnetski tok zbog jednako toliko puta veće moguće uzbudne struje u supravodljivom namotu. Zatim se počeo graditi prototip velikog motora na osnovi iskustava malog modela, koji bi dao cca 2 400 i kW taj je motor priredio novo iznenađenje jer je iz istih razloga dao cijelih 6 000 kW. Pri velikim snagama, gdje ima šanse da supravodljivi unipolarni stroj nađe i svoje ekonomsko opravdanje, dolazi do teškoća s naponom. Tako je i za taj *Fowler* motor bilo planirano da pri 6,45 Vs glavnoga magnetskog toka i brzini vrtnje od 200 min^{-1} dade svega 21,5 V napona. Dvostruki disk dao bi oko 43 V uz struju od približno 58 000 A. Zbog toga su oba diska bila podijeljena u radijalne izolirane segmente koji su spojeni u seriju u *segmentni namot.* Princip segmentnog namota prikazan je na slici 13. Segmenti su tu (na slici) prikazani štapovima u kojima se inducira jednaki napon, a sistem četkica i spojeva *zbraja* te napone, dok se struja mijenja u pojedinim segmentima kola od iznosa nula, kad polovica segmenata nije spojena, preko $I/2$, kad su segmenti »u komutaciji«, do I, kad opet polovica segmenata nije spojena. Mislim da je princip lako uočljiv i vidi se sa slike. Ako je

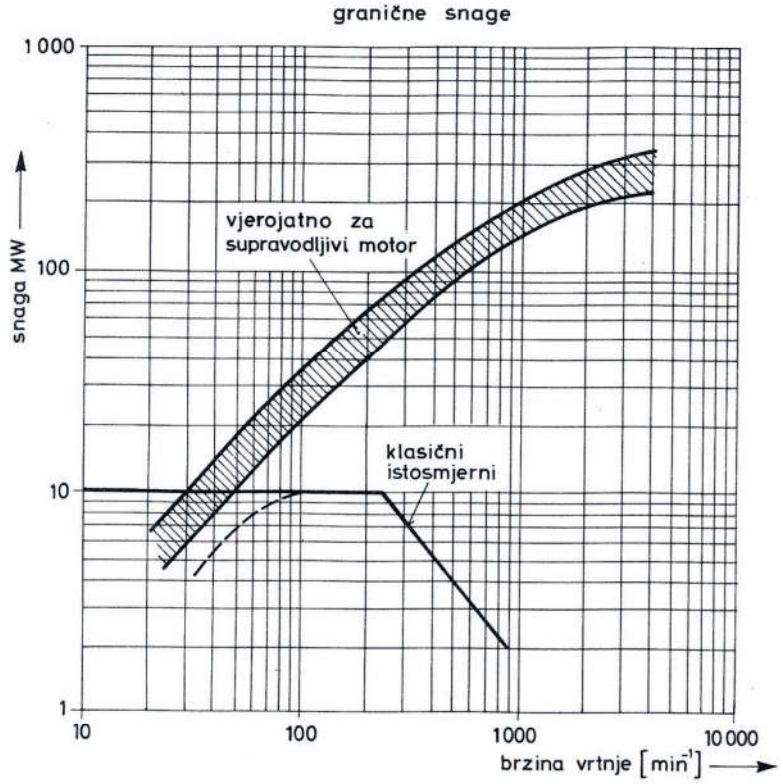


Sl. 13. Spajanje segmentnog namota supravodljivog motora (disk-izvedba), gdje su segmenti prikazani kao štapovi; gore je trenutak kad četkice prekrivaju jedan segment, a dolje kad one prekrivaju dva segmenta

broj segmenata n, napon je jednotanjuraste izvedbe $E = \frac{n}{2}e$, a dvotanjuraste izvedbe $E = 2\frac{n}{2}e = ne$. Tako je Fowler motor s deset segmenata po tanjuru bio građen za 430 V uz 5800 A (~2400 kW), što je već podnošljiv omjer napona i struje. Međutim, tu se u pitanjima ekonomičnosti jako oštro postavlja problem gubitka na četkicama. Klasični gubitak od cca 2 V po četkici odnio bi gotovo 10 % snage, pa bi korisnost tog motora postala manja od one u klasičnoga. Specijalnim izborom takvih četkica ti se gubici daju smanjiti na približno polovicu, ali ne bitno manje! A upravo i dio prednosti (ekonomičnosti) leži u smanjenim gubicima takva motora. Zato se danas intenzivno istražuje mogućnost da se smanje gubici na četkicama, pa su nađena rješenja kao spoj u živinoj kupki i slično.

U ovome supravodljivom unipolarnom motoru samo je uzbudni namot u supravodljivom stanju. Sam vodič supravodljivog namota izveden je slično vodičima drugih supravodljivih naprava. Da bi se supravodič osigurao od oštećenja, ukoliko struja prekorači kritičnu vrijednost ili kritična struja padne do vrijednosti nižih od onih što teku kroz supravodič zbog povećanja magnetskog polja na supravodič, supravodiči se *stabiliziraju*. Stabilizacija se sastoji u tome što se supravodič uklapa u strukturu prikladnoga klasičnog vodiča, od bakra, bronce, aluminija, tako da je presjek tih vodiča mnogo puta veći od presjeka supravodiča. Dogodi li se da supravodič zagrijavanjem pređe u normalno stanje, vodiči preuzimaju na sebe protok struje. Klasični je vodič, dakle, prvi sloj izolacije na supravodiču. Daljnje se osiguranje postiže tako da se supravodiči izrađuju veoma malog presjeka, kao niti promjera manjega od stotinke milimetra, što omogućuje brz odvod topline na okolni vodič.

Danas je u burnom (istraživačkom) razvoju supravodljivog područja teško govoriti o graničnoj snazi motora. To je pokazao i primjer već opisana dva prototipa, ali je očito da u



Sl. 14. Usporedbe graničnih snaga klasičnoga istosmjernog motora s vjerojatnim graničnim snagama supravodljivoga istosmjernog motora

toj izvedbi istosmjerni motor može postizati mnogo veće granične snage nego u klasičnoj. Kad se pretpostavi današnje stanje kriogenike i supravodljivih materijala i magnetski tokovi koji se dadu ostvariti u prostoru tom tehnikom, dobiva se vjerojatna vrijednost graničnih snaga, kao na slici 14. Na njoj je za usporedbu nacrtana krivulja današnjih graničnih snaga. Crtkani dio krivulje (odvaja se od porasta konstantne vrijednosti 10 MW pri manjim brzinama vrtnje) rađen je uz pretpostavku ukupne mase stroja ne veće od 30 tona. To je zbog toga što se pretpostavlja da bi u supravodljivom području bilo teško graditi kriostate za strojeve većih dimenzija, pa je i za klasični stroj, radi usporedbe, crtkano dana i ta krivulja. To samo znači da će pri sasvim malim brzinama vrtnje prednost imati klasični stroj (iako nema razloga da se male brzine vrtnje ne postižu pomoću reduktora i supravodljivog stroja). Vidi se da su pri većim brzinama vrtnje vjerojatne granične snage u supravodljivoj izvedbi deset i više puta veće od današnjih u klasičnoj izvedbi.

9.8. Zadaci i problemi

9.8.1. Zadaci

1. Valja ocijeniti kolika se maksimalna snaga može postići u trajnom radu istosmjernog stroja s promjerom motora $D_a = 3{,}8$ m i faktorom prekrivanja pola $\alpha = 0{,}74$, ako se posebno prikladnom konstrukcijom postigne vrijednost koeficijenta proporcionalnosti samoinduktiviteta od $\xi = 3{,}48 \cdot 10^{-6}$, i to:
   a) pri jednovojnome petljastom namotu;
   b) za dvovojni nesimetrični petljasti namot.
   U oba primjera željena je brzina vrtnje 220 min^{-1}.
2. Veliki istosmjerni deseteropolni motor izgrađen je s promjerom armature $D_a = 1{,}6$ m i $N = 195$ utora. Idealna dužina rotorskog paketa iznosi 0,307 m, faktor je prekrivanja pola $\alpha = 0{,}694$, a vrijednost koeficijenta proporcionalnosti samoinduktiviteta $\xi = 3{,}95 \cdot 10^{-6}$. Dvovojni petljasti namot s tri štapa po utoru je nesimetričan.

   Treba ustanoviti graničnu snagu tog motora pri brzini vrtnje od 750 min^{-1} i koliki je napon potreban za tu graničnu snagu.
3. Motor iz 2. zadatka nezavisno je uzbuđen. Koliku će graničnu snagu imati ako se slabljenjem polja podešava na brzinu vrtnje od 900 min^{-1}? Pri tome je pretpostavljeno da će motor izdržati mehaničko naprezanje zbog povećanih centrifugalnih sila.
4. Za stroj iz 2. zadatka valja izračunati kolika je razlika napona na četkicama dvaju ovoja namota Δe. Neka se razlika izračuna točnom jednadžbom (9.5–1) i približnom (9.5–2) pa neka se ustanovi kolika je relativna pogreška.

9.8.2. Rješenja

1. Vidi se sa slike 9.2–1. da će granična snaga pri željenoj brzini vrtnje ovisiti ili o uvjetu D_{amax} i e_{smax} ili o uvjetu D_{amax} i dopuštenoj vrijednosti e_k.

a) Iz relacije (9.2–2.a) izlazi:

$$P = \frac{\pi}{2}\alpha B_\delta D_a \frac{e_s}{\xi} 10^{-3} = \frac{\pi}{2}\cdot 0{,}74\cdot 1{,}1\cdot 3{,}8 \frac{8\cdot 10^{-3}}{3{,}48\cdot 10^{-6}} \doteq 11\,170 \text{ kW}.$$

Iz relacije (9.2–2.a) dobivamo:

$$P = \frac{\pi}{2}\alpha A D_a e_k 10^{-3} = \frac{\pi}{2}\cdot 0{,}74\cdot 60\cdot 10^3\cdot 3{,}8\cdot 26\cdot 10^{-3} = 6\,890 \text{ kW}.$$

[$P_{gr} = 6\,890$ kW]

b) Za dvovojni nesimetrični namot relacija (9.2–2.a) daje istu vrijednost kao za jednovojni, tj. $P = 11\,170$ kW. Budući da dvovojni nesimetrični namot raspolavlja napon među lamelama, tj. dopušta (formalno) njegovu dovstruku vrijednost, to će prema relaciji (9.2–2.b) biti:

$$P = \frac{\pi}{2}\cdot 0{,}74\cdot 60\cdot 10^3\cdot 3{,}8\cdot 52\cdot 10^{-3} = 13\,781 \text{ kW}.$$

[$P_{gr} = 11\,170$ kW]

2. Uvodno izračunajmo obodnu brzinu armature:

$$v_a = \frac{D_a \pi n}{60} = 62.83 \text{ ms}^{-1}.$$

Zbog brzine vrtnje sad će granična snaga ovisiti ili o dopuštenom iznosu srednje vrijednosti napona samoindukcije e_s ili o naponu među lamelama e_k.

Prema relaciji (9.2–2.c) dobivamo varijantu granične snage:

$$P = 30\alpha B_\delta \frac{v_a}{n} e_s 10^{-3} = 3\,886 \text{ kW},$$

pri čemu je indukcija u zračnom rasporu $B_\delta = 1{,}1$ T, a napon samoindukcije $e_s = 8$ V.

Vrijednost maksimalnoga strujnog obloga izračunat ćemo iz odnosa $e_s = 2w_s \xi v_a A l_i$, tj.:

$$A = \frac{8}{2\cdot 3{,}95\cdot 10^{-6}\cdot 62{,}83\cdot 0{,}307} = 52{,}5\cdot 10^3 \text{ Am}^{-1}.$$

S tom vrijednošću bit će iz jednadžbe (9.2–2.d):

$$P = 30\,\frac{e_k \alpha v_a A 10^{-3}}{n} = 4\,761 \text{ kW},$$

a tu smo za e_k uvrstili vrijednost od $2\cdot 26$ V (dvoslojni nesimetrični petljasti namot!). Odlučujući je, dakle, napon samoindukcije e_s! Izračunamo li iznos polnog koraka:

$$\tau_p = \frac{D_a \pi}{2p} = 0{,}5026 \text{ m}$$

i broj svih vodiča stroja $z = 2Nu = 1\,170$, inducirani je napon motora:

$$E = \frac{p}{a}\frac{nz}{60} B_\sigma l_i a \tau_p = 861{,}3 \text{ V},$$

od kojeg će potrebni narinuti napon biti nešto veći zbog pada napona na otporima kojega možemo procijeniti na približno 18 V. Još je nužno kontrolirati visinu napona među lamelama uz stvarne vrijednosti indukcije u zračnom rasporu:

$$e_k = \frac{1}{2} 2B_\delta l_i v_a = 1{,}1 \cdot 0{,}307 \cdot 62{,}83 = 21{,}2 \text{ V},$$

što je manje od dopuštenih 26 V.

[$P_{gr} = 3\,886$ kW; $U \doteq 880$ V]

3. Zbog povećane brzine vrtnje n u jednadžbi (9.2–2.c) povećat će se proporcionalno i obodna brzina armature v_a. Međutim, da dođe do povećanja brzine vrtnje, obavezno je smanjiti glavni magnetski tok (uz jednaki narinuti napon), a da se ne premaši dopuštena vrijednost napona samoindukcije, mora se smanjiti i strujni oblog A, tj. struja stroja. Daklè, u usporedbi s graničnom snagom iz 2. zadatka dobivamo:

$$P'_{gr} = P_{gr} \frac{n}{n'}.$$

[$P_{gr} = 3\,238$ kW]

4. Srednja je vrijednost napona među lamelama:

$$e_k = \frac{2pU}{k} = \frac{10 \cdot 880}{585} = 15{,}043 \text{ V}.$$

Iz jednadžbe (9.5–1) izlazi $\Delta e = 1{,}60655$ V.
Iz jednadžbe (9.5–2) izlazi $\Delta e = 1{,}60167$ V.
[$\Delta e \doteq 1{,}61$ V; $p_g = 0{,}3\,\%$]

10. IZMJENIČNI KOLEKTORSKI STROJEVI

10.1. Uvod

Izmjenični kolektorski strojevi razvili su se u dvadesetim godinama ovog stoljeća, kao izraz težnje da se električki motor prikladan za podešavanje brzine vrtnje u širem opsegu priključi na opću izmjeničnu mrežu, i to na ekonomičan način. Svi su, dakle, izmjenični kolektorski strojevi razvijeni kao motori, i nikad se nisu upotrebljavali kao generatori.

Izmjenični (beskolektorski) motori ili uopće ne mogu pri direktnom spoju na mrežu mijenjati brzinu vrtnje (sinhroni) ili je ta promjena skopčana s velikim gubicima i nepovoljnom vanjskom karakteristikom (asinhroni). A kako u doba prije postojanja ispravljača veće snage, posebno prije razvoja poluvodiča, nije bilo današnjih mogućnosti, to je za priključak istosmjernog motora na izmjeničnu mrežu bio potreban strojni pretvarač izmjenične struje u istosmjernu. U tom se cilju upotrebljavao motor-generator u Leonardovu spoju, tj. asinhroni ili sinhroni motor s istosmjernim generatorom na istoj osovini. Umjesto jednog stroja dobivaju se na taj način tri stroja i dakako, gotovo tri puta veće investicije i gubici. Razumije se da su se zato tražila jeftinija rješenja. Međutim, kod ekonomične regulacije brzine vrtnje ne može se izbjeći kolektor. Došlo se do rješenja da se kolektorski istosmjerni stroj izravno priključi na izmjeničnu mrežu. To je u principu moguće, samo i rotor i stator moraju biti sastavljeni od limova (lamelirani paket). Problem je komutacija, koja se pri izmjeničnoj struji mnogo teže odvija. Dok se za istosmjerne strojeve zahtijeva da do nazivnog tereta kolektor radi bez ikakva iskrenja, što se i postiže, kod izmjeničnih kolektorskih strojeva ne može se izbjeći iskrenje, pa je neminovno zadovoljiti se samo zahtjevom da iskrenje mora ostati u onim granicama koje još omogućuju trajan rad. Četkice izmjeničnih strojeva već u normalnom pogonu iskre, a klizna površina kolektora postaje crna. To ne izgleda lijepo, no ipak kolektor izdrži trajni pogon. Teškoće oko komutacije izmjeničnih strojeva najbolje potvrđuje činjenica da se oni mogu graditi samo do snage od cca 1 000 kW, dakle za najveće snage približno deset puta manje od graničnih snaga istosmjernih strojeva.

Iako je izmjenični kolektorski stroj skuplji od istosmjernoga za iste nazivne podatke, ipak je znatno jeftiniji od istosmjernog motora s Leonardovim agregatom. Izmjenični kolektorski stroj nije dolazio u obzir za pogone s velikim udarnim preopterećenjima ni za jako velike brzine upravljanja, ali za mirne pogone s relativno sporim upravljanjem brzine vrtnje uspješno je konkurirao istosmjernome motoru.

U početku razvoja izmjeničnih kolektorskih strojeva pojavili se jednofazni izmjenični kolektorski strojevi, u prvi tren slika i prilika nekih vrsta svojih istosmjernih rođaka, a zatim su nastale različite varijacije i vrste izvedene iz osnovne. Nešto nakon toga izumljeni su i višefazni (trofazni) izmjenični kolektorski strojevi i njihov princip rada i djelovanja bili su u usporedbi s

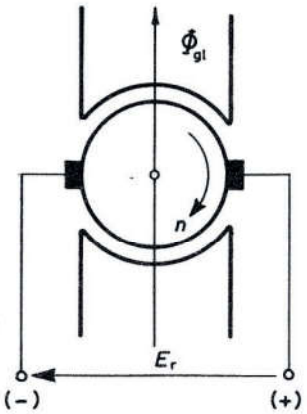
jednofaznima već prilično različiti. I trofaznih izmjeničnih kolektorskih strojeva razvijeno je mnogo vrsta. Izumljene su i kaskade sa specijalnim kolektorskim strojevima, koje su služile ne samo za podešavanje i regulaciju brzine vrtnje već i za kompenzaciju faktora snage. U to je doba razvijeno gotovo više vrsta izmjeničnih kolektorskih strojeva nego svih ostalih električkih strojeva zajedno.

No cijeli taj razvoj prekinut je relativno naglo razvojem ispravljača za veće snage, koji su zamijenili motor-generatore i omogućili priključak istosmjernoga kolektorskog motora na izmjeničnu mrežu, i to uz manje investicijske troškove i sa zadovoljavajućim gubitkom snage. Već je pojava živinih ispravljača početkom tridesetih godina, napon kojih se upravljao mrežicom (rešetkom), omogućila za strojeve većih snaga ekonomično rješenje, no pravu revoluciju u to područje donijeli su izumi suhih ispravljača, tranzistora i tiristora nakon drugoga svjetskog rata. Kako je razvojem upravljačkih mostova energetska elektronika bila u stanju da riješi problem pogona sve većih istosmjernih motora iz izmjenične mreže, tako su odumirale pojedine vrste izmjeničnih kolektorskih strojeva i činilo se da će i potpuno nestati iz upotrebe. No to se ipak nije dogodilo baš svim vrstama izmjeničnih kolektorskih strojeva. Neke od njih, prije svega one jednostavnije, proširile su se u nekim specifičnim domenama upotrebe, a posebno mali *univerzalni motori*, koji se sve više razvijaju i u današnjici. Iako je broj vrsta izmjeničnih kolektorskih motora tim razvojem danas jako sužen, one koje su preživjele i danas su tehnička stvarnost, a dio njih ima u razvoju i tehničku budućnost. U našem izlaganju ograničit ćemo se samo na one vrste (jednostavnijih) izmjeničnih kolektorskih strojeva, jednofaznih i trofaznih, koje se još proizvode i susreću u praksi, a posebno na one kojih se daljnji razvoj predviđa i s aspekta današnjega tehničkog znanja.

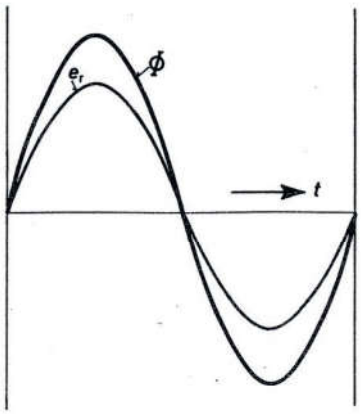
10.2. Jednofazni kolektorski motori – općenito

Osnovnu fizikalnu sliku jednofaznih kolektorskih motora gradimo najlakše na osnovi fizikalne slike istosmjernih motora jer se i oni sastoje od uzbudnih namota na statoru i armaturnog namota s kolektorom na rotoru. Izvedba je namota u principu jednaka kao u istosmjernih strojeva, a i četkice na kolektoru djeluju na jednak način kao istosmjernim motorima. Uzbudi li se takav stroj jednofaznom strujom, u njemu se stvara vremenski promjenljivi magnetski tok $\Phi(t)$ i njegov pretežni dio, glavni magnetski tok $\Phi_{gl}(t)$, ulančuje namote statora i rotora (primara i sekundara). Na načelnoj skici na slici 1. označen je glavni magnetski tok u jednom trenutku, a na slici 2. vidi se njegov vremenski tok. Vrti li se stroj nekom brzinom vrtnje n, na četkicama u neutralnoj zoni slike 1. inducirat će se prema poznatom zakonu napon zbog rotacije jednako kao i istosmjernom stroju. Tako će i on, mjeren na četkicama, imati izmjenični, vremenski promjenljivi karakter i bit će u fazi s glavnim magnetskim tokom, od kojeg je nastao, i, dakako, imat će istu frekvenciju. Na slikama 1. i 2. označen je taj napon s E_r, odnosno e_r, pri čemu indeks »r« označava njegovo porijeklo – rotaciju, pa taj napon zovemo *naponom rotacije*. No još nije jasno kako se uspostavlja trajna vrtnja u jednom smjeru. Za to

je potrebno da na stezaljke plus i minus na slici 1. narinemo izmjenični napon frekvencije jednake onoj uzbudnog napona koji stvara magnetski tok $\Phi(t)$. U tom će slučaju armaturom poteći struja izmjeničnog karaktera, koja će s glavnim magnetskim tokom stvarati moment vrtnje. Uz pretpostavku da su magnetski tok i struje armature u fazi, taj će okretni moment imati uvijek isti (započeti) smisao jer će se svaki put u vremenskom trenutku u kojem se bude promijenio smisao



Sl. 1. Princip djelovanja jednofaznoga izmjeničnog kolektorskog stroja; objašnjenje kako se zbog vrtnje rotora u izmjeničnome magnetskom polju inducira izmjenični napon na stezaljkama



Sl. 2. Vremenski tok induciranog napona rotacije i izmjeničnoga magnetskog toka u jednofaznome kolektorskom stroju

(predznak) magnetskom toku promijeniti i predznak (smisao) struji. Dakako da zakretni moment neće više biti vremenski konstantan, kako je to u istosmjernog stroja, već će mu iznos vremenski pulsirati, ali će se uvijek održavati vrtnja u započetom smjeru. Željenu istofaznost, ili barem što manji fazni pomak struje armature i glavnoga magnetskog toka, treba osigurati odgovarajućim spojem armaturnog i uzbudnog napona na mrežu. Iz dosad izloženoga o osnovnoj fizikalnoj slici jednofaznoga kolektorskog stroja moglo bi se pomisliti da se jednostavno klasični istosmjerni stroj priključuje na izmjeničnu mrežu. No to bi za veliku većinu istosmjernih strojeva urodilo lošim rezultatom jer je nužno da zbog izmjeničnog karaktera magnetskog toka cijeli magnetski krug stroja bude građen od limova, lameliran, kako bi se gubici u željezu sveli u podnošljive granice. To je jedna od bitnih razlika u usporedbi s istosmjernim strojem, a na drugu ćemo odmah naići čim nastavimo s analizom induciranih napona.

10.2.1. Inducirani naponi jednofaznoga kolektorskog stroja

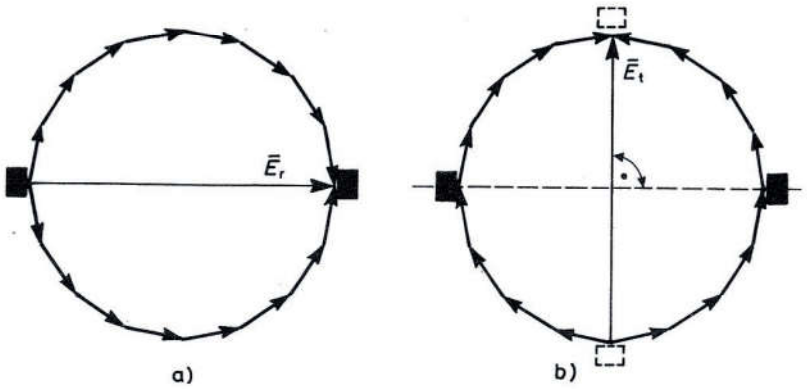
Za jednofazni kolektorski stroj vrijedi u načelu jednadžba za inducirani napon dobiven rotacijom u vodičima rotora koju smo već upoznali kod istosmjernih strojeva, tj. jednadžba (4.1–4), i prema njoj bi napon rotacije u svakom trenutku iznosio:

$$E_{r\max} = 4w_a \frac{pn}{60} \Phi_{gl}, \qquad (1)$$

Indeksom smo označili da je riječ o maksimalnom iznosu napona rotacije. No, budući da je glavno magnetsko polje izmjenično, gornja jednadžba izražava vrijednost maksimalnoga induciranog napona, a efektivnu vrijednost napona dobivamo dijeljenjem s $\sqrt{2}$, tj.:

$$E_r = 2\sqrt{2} w_a \frac{pn}{60} \Phi_{gl}. \tag{2}$$

Ako pretpostavimo sinusnu raspodjelu indukcije po obodu rotora, možemo u određenom trenutku inducirane napone rotacije u pojedinim štapovima prikazati kao vektore, a sumu induciranih napona kao poligon vektora s rezultantnim naponom u osi neutralne zone, kako je prikazano na slici 3.a. Na četkice u neturalnoj zoni djeluje puni inducirani napon E_r.



Sl. 3. Prikaz uz tumačenje induciranih napona jednofaznoga kolektorskog stroja: a) napon rotacije; b) napon transformacije

Izmjenični glavni magnetski tok koji povezuje uzbudni i armaturni namot, budući da se neprestano vremenski mijenja, inducira u svakom zavoju namota armature (bez obzira na to vrti li se armatura ili ne) još i napon uzrokovan vlastitom vremenskom promjenom po Faradayevu zakonu:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

Budući da je taj oblik induciranja napona tipičan za djelovanje transformatora, nazivamo posljedični inducirani *napon transformatorskim*. Zavoj koji leži u neutralnoj zoni obuhvaća cijeli glavni tok, pa se zbog toga u njemu inducira najveći napon transformacije. Ostali zavoji obuhvaćaju samo djelomično glavni magnetski tok i u njima se inducira proporcionalno manji napon. Pri sinusnoj raspodjeli indukcije po obodu rotora možemo prikazati napone inducirane u vodičima vektorima suma kojih daje poligon vektora prema slici 3.b. Za četkice koje normalno leže u neutralnoj zoni suma je napona transformacije jednaka nuli, a na četkice koje bi ležale u osi glavnih polova djelovao bi najveći iznos napona transformacije. Za efektivnu vrijednost napona transformacije, gledano s osi glavnog pola (crtkane četkice na sl. 3.b), možemo napisati:

$$E_t = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_a f_n \Phi_{gl}. \tag{3}$$

Pri tome je f frekvencija mreže, a f_n faktor namota. Budući da u jednadžbi (3) Φ_{gl} ima značenje maksimalnog iznosa glavnoga magnetskog toka (magnetska veličina!), a još iz četvrtog poglavlja znamo da faktor namota armaturnog namota iznosi praktički $f_n = \frac{2}{\pi}$, to za napon transformacije u osi glavnog pola izlazi:

$$E_t = 2\sqrt{2}\, w_a f \Phi_{gl}. \tag{4}$$

Jasno je iz razloženoga da napon transformacije ovisi o frekvenciji mreže, a ne o brzini vrtnje, dok napon rotacije ovisi o brzini vrtnje, a uopće ne ovisi o frekvenciji mreže. Usporedimo li relacije (2) i (4), očito je da će kad se jednofazni kolektorski motor vrti sinhronom brzinom vrtnje, pa je frekvencija u rotoru stroja $f_r = \frac{pn}{60} = f$, biti napon rotacije u neutralnoj zoni jednak naponu transformacije u osi glavnih polova, tj. $E_t = E_{rs}$. Za pogon jednofaznih kolektorskih strojeva vrlo je važna činjenica da se napon transformacije uopće ne osjeća (pa i ne djeluje) kad su četkice u neutralnoj zoni, ali se osjeća i djeluje kad su četkice izvan neutralne zone. Osim toga ima napon transformacije posebni utjecaj na komutaciju, o čemu će biti još riječi.

10.2.2. Moment jednofaznoga kolektorskog stroja

Okretni moment jednofaznih kolektorskih strojeva najjednostavnije je izračunati uz pomoć jednadžbe (4.2–3) za istosmjerne strojeve, samo valja držati na umu da je tu riječ o izmjeničnim veličinama struje armature $I_a(t)$ i glavnoga magnetskog toka $\Phi_{gl}(t)$. Možemo, dakle, pisati:

$$M(t) = \frac{pz}{2a\pi}\, \Phi_{gl}(t)\, I_a(t), \tag{5}$$

pri čemu su:

$$I_a(t) = I_a\sqrt{2}\, \sin \omega t, \tag{6}$$

$$\Phi_{gl}(t) = \Phi_{gl} \sin(\omega t - \psi). \tag{7}$$

Kut ψ označava fazni pomak između struje armature i glavnoga magnetskog toka. Polazeći od toga izraz će za trenutnu vrijednost momenta stroja glasiti:

$$M(t) = \frac{pz}{\sqrt{2}a\pi}\, \Phi_{gl} I_a \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \psi). \tag{5.a}$$

Primijeni li se trigonometrijska transformacija:

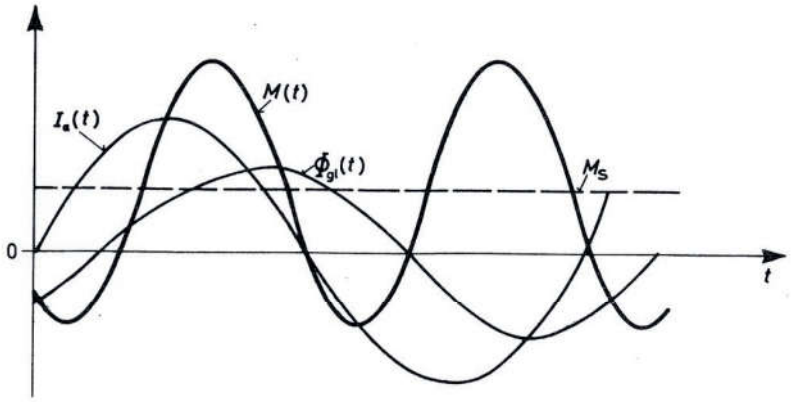
$$\sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \psi) = \frac{1}{2}\, [\cos\psi - \cos(2\omega t - \psi)],$$

dobivamo dalje za trenutnu vrijednost momenta:

$$M(t) = \frac{pz}{2\sqrt{2}a\pi}\, \Phi_{gl} I_a\, [\cos\psi - \cos(2\omega t - \psi)]. \tag{5.b}$$

Moment je motora, dakako, izmjeničnog karaktera (vidi sl. 4), a za njegov učin bitna je njegova srednja vrijednost. Ta vrijednost izračunava se na poznati način, pa izlazi:

$$M_{s\sim} = \frac{pz}{2\sqrt{2}a\pi} \Phi_{gl} I_a \cos \psi. \tag{6}$$



Sl. 4. Moment izmjeničnoga jednofaznog kolektorskog motora za opću slučaj kad su glavni magnetski tok i struja armature pomaknuti u fazi za neki kut ψ

Usporedimo li relacije (4.2–3) i (6), opravdano ćemo za istu fizičku veličinu stroja zaključiti da je efektivna vrijednost nazivne struje zapravo ekvivalent nazivnoj vrijednosti istosmjerne struje. Međutim, efektivna vrijednost glavnoga magnetskog toka mora imati $\sqrt{2}$ puta manji iznos nego što ga u istom stroju smije imati istosmjerni magnetski tok, tj. tek maksimalni iznos izmjeničnoga glavnog magnetskog toka smije biti jednak istosmjernom toku jer bi inače nastupilo nedopustivo visoko zasićenje. Istosmjerni motor radi s konstantnim maksimalnim tokom, pa dolazimo do zaključka da je, uz iste dimenzije, nazivni moment izmjeničnoga jednofaznog kolektorskog stroja $\frac{\cos\psi}{\sqrt{2}}$ puta manji od nazivnog momenta istosmjernog stroja, tj.:

$$\frac{M\sim}{M=} = \frac{\cos\psi}{\sqrt{2}}. \tag{7}$$

Jednadžba (6) vrijedi kad jednofazni izmjenični kolektorski stroj radi s četkicama u neutralnoj zoni, što, uzgred rečeno, vrijedi za najvažniju vrstu – serijski jednofazni stroj. Međutim, kad su četkice pomaknute iz neutralne zone za neki električki kut α, srednja se vrijednost momenta smanjuje, jer se smanjuje i aktivna komponenta glavnoga magnetskog toka na vrijednost $\Phi_{gl}\cos\alpha$, pa to još dodatno valja uzeti u obzir.

Izrazimo li iz jednadžbe (2) glavni magnetski tok pomoću napona rotacije E_r, i uz poznatu činjenicu da je $w_a = \frac{z}{4a}$, bit će:

$$\Phi_{gl} = \frac{60\sqrt{2}aE_r}{2pn}$$

i kad to uvrstimo u jednadžbu (6) za srednju vrijednost momenta izmjeničnog kolektorskog stroja:

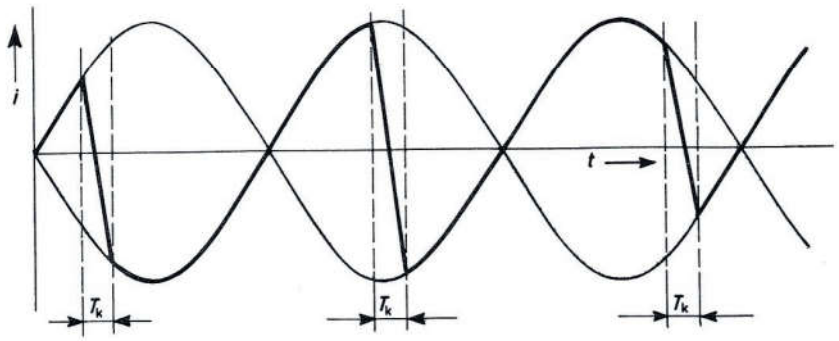
$$M = \frac{60E_r}{2\pi n} I_a \cos\psi = \frac{E_r}{\omega} I_a \cos\psi, \tag{7.a}$$

dobivamo izraz za razvijenu snagu motora jednostavnim množenjem posljednjeg izraza kutnom brzinom ω:

$$P = M\omega = E_r I_a \cos\psi. \tag{8}$$

10.2.3. Komutacija jednofaznoga izmjeničnog kolektorskog stroja

U vodiču stroja istosmjerne struje komutirala je struja prolaskom kroz neutralnu (komutacijsku) zonu iz pozitivne u negativnu, ili obrnuto. U vodiču jednofaznoga kolektorskog stroja događa se u principu ista stvar, samo što izmjenična struja određene trenutne vrijednosti komutira u izmjeničnu struju s trenutnom vrijednosti pomaka od (idealno gledano) 180 električkih stupnjeva; rekli bismo, iz dolazne u odlaznu vrijednost struje, i obrnuto. Najlakše je ući u problem uz pomoć slike 5. Trajanje komutacije redovito je mnogo kraće od



Sl. 5. Načelni prikaz komutacije jednofaznoga izmjeničnog kolektorskog stroja; oblik struje u jednom svitku

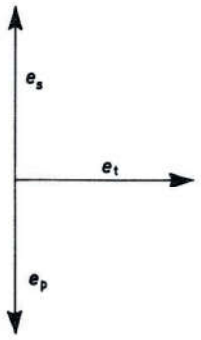
trajanja jedne periode izmjenične struje s frekvencijom od 50 Hz. U svitku koji komutira mijenja se kod izmjeničnog stroja smjer struje jednako tako kao i kod istosmjernoga. Da izmjeničnom stroju struja nakon komutacije slijedi sinusoidu, odnosno da je izmjenična, ne mijenja ništa u samoj komutaciji, pa tako dobivamo vremenski dijagram struje u jednom svitku kao na slici 5. Prilikom promjene smjera struje nailazimo na isti problem induciranog napona samoindukcije e_s kao i kod istosmjernih strojeva, ali s jednom važnom razlikom. Budući da je izmjeničnom stroju, za jednako opterećenje, efektivna vrijednost struje jednaka onoj istosmjernoga, to se pojavljuju trenuci kad izmjeničnom stroju komutira maksimalna vrijednost struje, a ta je $\sqrt{2}$ puta veća od efektivne, i zbog toga je komutacija znatno otežana. No to nije glavni uzrok otežanoj komutaciji izmjeničnog stroja. Kad se u vrijeme trajanja komutacije svitak nalazi u

neutralnoj zoni, inducira se u njemu još i napon transformacije e_t, i taj je još posebno relativno velikog iznosa jer svitak u komutaciji obuhvaća cijeli glavni magnetski tok Φ_{gl}. Iznos mu je:

$$e_t = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} w_s f \Phi_{gl}, \tag{9}$$

pri čemu je w_s broj zavoja u svitku koji komutira.

Napon samoindukcije možemo kompenzirati jednako kao i kod istosmjernih strojeva pomoću napona induciranoga djelovanjem toka pomoćnih polova e_p. Oba su napona, naime, proporcionalna struji tereta i brzini vrtnje, pa se pomoćni polovi dadu tako podesiti da je svakom teretu i svakoj brzini vrtnje zbroj obaju napona jednak nuli, pa u kratkospojnom svitku u vrijeme komutacije dobivamo načelno linearnu komutaciju. Naravno, praktički nećemo postići potpunu kompenzaciju, pa ostaje neki mali ostatni napon. Za napon transformacije u svitku koji komutira ne možemo ostvariti kompenzaciju na takav način. U svitku koji komutira napon je transformacije nezavisan od brzine vrtnje. Vektorski prikaz tih triju napona vidimo na slici 6. Napon transformacije ne da se uopće kompenzirati pa trajno utječe na komutaciju (o nekim izuzecima poslije).



Sl. 6. Vektorska slika napona u svitku koji komutira

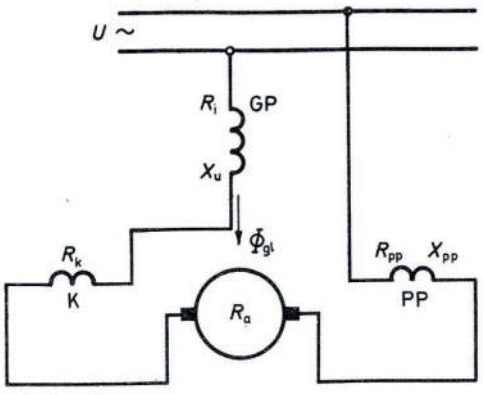
Iskustvo pokazuje da pri radu stroja ukupni nekompenzirani napon u kratkospojenom svitku ne smije prekoračiti vrijednost od 2,5 do 3 V efektivne vrijednosti. Najteže je u pokretanju motora; kad rotor stoji, nema ni napona samoindukcije ni napona pomoćnih polova, a napon transformacije prisutan je u punom iznosu. On ne smije biti viši od 3,8 V između lamela, pa kolektor mora imati veliki broj lamela. To je prva od mjera koje uopće omogućuju rad stroja. Ostale se mogu razumjeti analizom relacije (9). Broj zavoja u svitku w_s valja smanjiti na minimum, dakle na $w_s = 1$. Dalje, grade se strojevi s mnogo pari polova p da se smanji veličina magnetskog toka Φ_{gl} po polu. I, konačno, posegnulo se i za gradnjom mrežnog sistema sa smanjenom frekvencijom f. Tako se prilikom gradnje lokomotiva s izmjeničnim serijskim kolektorskim motorima, radi potrebe vrlo velike snage, nije mogao svladati problem komutacije, pa se išlo na sniženje frekvencije od 50 na $16\frac{2}{3}$ Hz, čime se napon transformacije smanjio na trećinu. To je zahtijevalo gradnju posebnih centrala i mreža za tu frekvenciju. No tek uz te uvjete uspjelo je nekad izgraditi strojeve do 1 000 kW snage. Danas za nove elektrifikacije vuče dolaze modernija rješenja pa frekvencija $16\frac{2}{3}$ Hz više ne dolazi u obzir, izuzevši područja koja su otprije vezana za postojeći sistem te

frekvencije, i to zbog golemih investicijskih ulaganja. Na osnovi ovog izlaganja jasno je da je glavni ograničavajući faktor u gradnji izmjeničnih kolektroskih strojeva mogućnost svladavanja komutacijskih problema.

10.3. Jednofazni serijski kolektorski motor

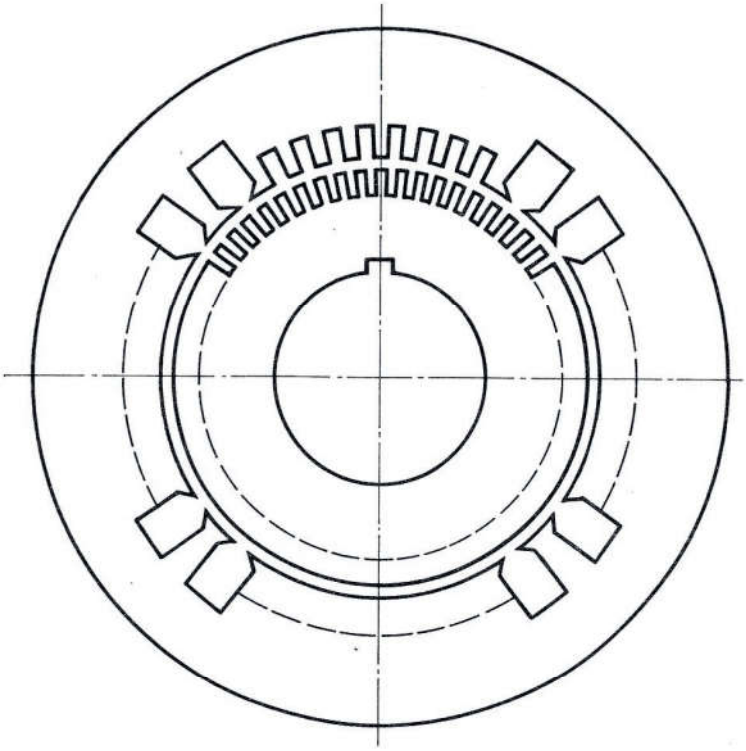
Jednofazni serijski kolektorski motori uvelike se još danas upotrebljavaju na dva područja. Kao mali »univerzalni« motori, s mogućnošću priključka i na izmjenični jednofazni i na istosmjerni napon, imaju veliku budućnost u sitnim pogonima (aparati za kućanstvo, zdravstvo, obrt itd.). To su motori malih snaga (5–300 W) s relativno visokim brzinama vrtnje, do 20 000 min^{-1}, a najmanji i više od toga. Raspon uobičajenih brzina vrtnje dosta je širok. Normalne izvedbe imaju donju granicu od oko 1 500 min^{-1}. Drugo važno područje upotrebe serijskih jednofaznih kolektorskih motora je vuča, točnije željeznička vuča, i to u onim zemljama gdje je već prije uvedena, pa je zbog golemih uloženih sredstava još uvijek najekonomičnija. To su najčešće posebne jednofazne mreže frekvencije od 16 2/3 Hz, uz upotrebu vučnih motora do nekoliko stotina, pa čak i 1 000 kW snage. Međutim, ima vučnih motora frekvencije od 50 Hz, ali to vrijedi za manji broj zemalja i ne može im se postići tako velika snaga. Masovnije upotrebe u ostalim domenama elektromotornih pogona nema, premda se pojedinačno posegne i za tom vrstom motora, kad joj stjecaj okolnosti dade prevagu nad drugim vrstama.

Kako već sam naziv pokazuje, jednofaznome serijskom kolektorskom motoru spojen je osnovni uzbudni namot glavnih polova u seriju s armaturnim namotom. Dalje, u seriju je spojen i kompenzacijski namot, praktički uvijek prisutan. Naime, dok smo u istosmjernim motorima imali kompenzacijski namot samo izuzetno i samo u najvećih strojeva, kod izmjeničnih jednofaznih serijskih kolektorskih motora dolazi on u upotrebu već za snage od cca 0,5 kW, a pogotovo kod većih. Tu je znatno veća potreba za njim. Osim suzbijanja klasične reakcije armature i njezinih posljedica (izobličenje glavnoga magnetskog toka, posebno pod krajevima polnih papuča!) kompenzacijski namot u jednofaznome serijskom kolektorskom stroju neposredno utječe na smanjenje induktivne komponente napona armature i na poboljšanje faktora snage stroja. Dakako, u seriju je vezan i namot pomoćnih polova, pa osnovnu skicu spoja prikazuje slika 1. Serijskome jednofaznom kolektorskom motoru četkice su redovno u neutralnoj zoni.

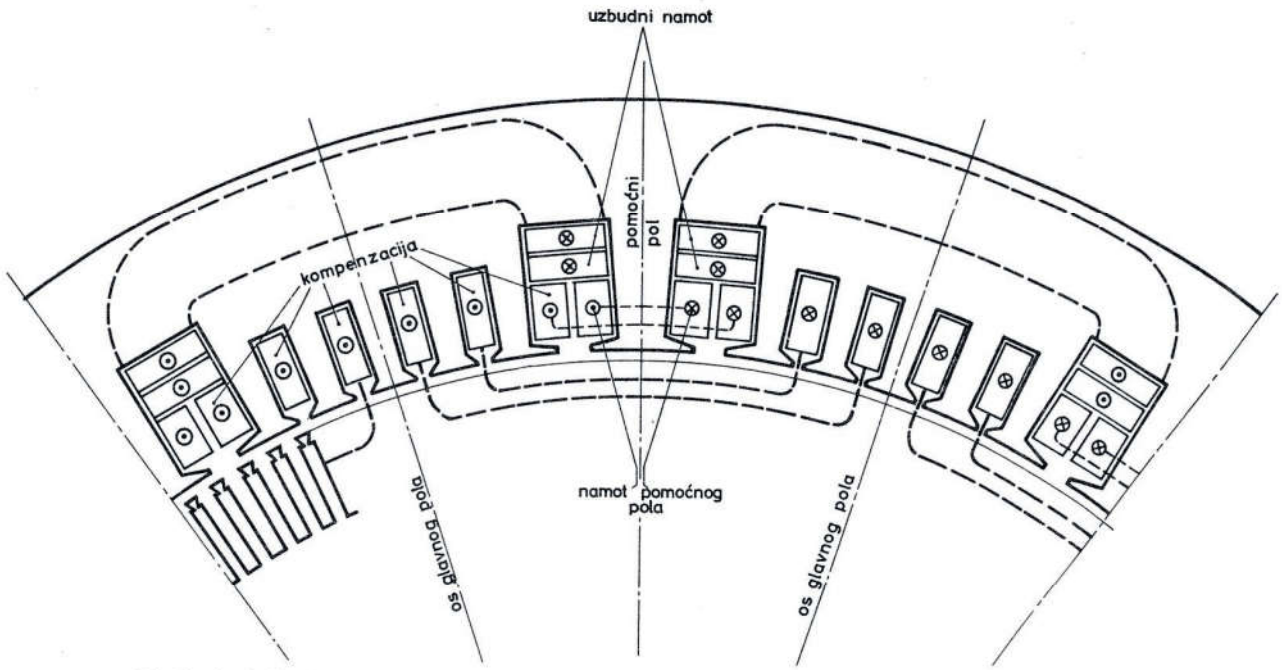


Sl. 1. Osnovni spoj jednofaznoga serijskog kolektorskog motora

Kako je prijeko potrebno da magnetski krug izmjeničnoga kolektorskog stroja bude cijeli od limova, obično se ne grade posebno izraženi magnetski polovi. Na slici 2. prikazan je rez (presjek) jednoga četveropolnog stroja, zapravo njegovi statorski i rotorski limovi, a sam smještaj svih namota načelno predočuje slika 3, i to za jedan veći vučni motor s deset polova.



Sl. 2. Rez statorskog i rotorskog lima četveropolnoga jednofaznog kolektorskog motora



Sl. 3. Smještaj namota na statoru za jedan veći serijski deseteropolni jednofazni kolektorski motor

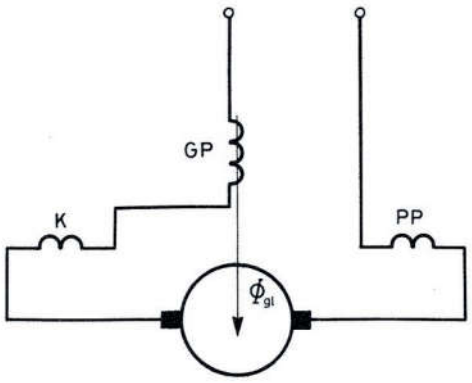
Pogledamo li osnovnu skicu spoja na slici 1, vidimo da se narinutom naponu U suprotstavlja radni otpor $R = R_a + R_i + R_{pp} + R_k$, te induktivni otpori uzbudnog namota X_u (predstavlja glavno magnetsko polje), namota pomoćnih polova X_{pp} i rasipni induktivni otpori ΣX_σ koji se pojavljuju na glavnim polovima, armaturi i kompenzacijskom namotu. Tako vrijedi da je $X = X_u + X_{pp} + \Sigma X_\sigma$. Među induktivnim otporima izrazito je najveći X_u.

Da dođemo do ekvivalentne sheme kojom se može predočiti svaki izmjenični motor, utvrdimo ovo:

Kroz sve namote teče struja tereta I. U namotu na glavnim polovima s w_u uzbudnih zavoja uzbudi ta struja i glavni izmjenični magnetski tok, s maksimalnom vrijednosti Φ_{gl} (vidi skicu na sl. 4) i njega ćemo izraziti ovako:

$$\Phi_{gl} = \frac{\sqrt{2} I L_u}{w_u} = \frac{\sqrt{2} I X_u}{2\pi f w_u}, \tag{1}$$

pri čemu je f frekvencija mreže, a L_u odgovarajući induktivitet.



Sl. 4. Skica djelovanja glavnoga magnetskog toka u jednofaznome serijskom kolektorskom motoru s četkicama u neutralnoj zoni

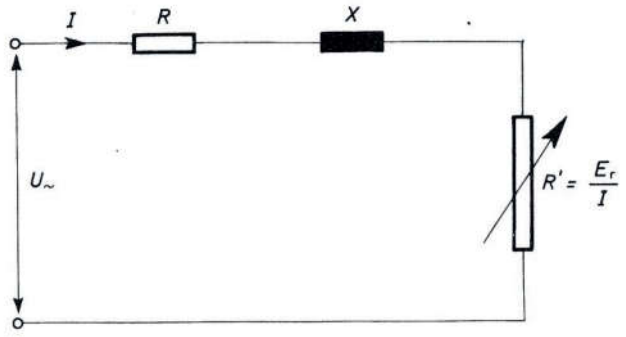
Od induciranih napona koje stvara taj magnetski tok, napon transformacije E_t na četkicama stroja u neutralnoj zoni ima iznos nula, pa se ne pojavljuje ni u ekvivalentnoj shemi jednofaznoga serijskog kolektorskog motora. Napon rotacije E_r proporcionalan je magnetskom toku Φ_{gl} i u vremenskoj je fazi s njime, a magnetski je tok Φ_{gl} i u vremenskoj fazi sa strujom stroja I(tj. $\psi = 0$). Zbog toga napon rotacije mora imati jednak vektorski pravac kao i omski pad napona, pa ga možemo u ekvivalentnoj shemi prikazivati kao omski pad napona. Prema slici 10.2–3. rezultirajući napon rotacije djeluje u neutralnoj zoni, u kojoj leže četkice, pa se napon rotacije izravno punom vrijednošću ubraja u strujni krug. Rezultirajući napon transformacije djeluje prema slici 10.2–3. u osi glavnih polova, tj. okomito na neutralnu zonu, zato se taj napon u strujnom krugu motora uopće ne pojavljuje.

Na osnovi ovog razmatranja dobivamo ekvivalentnu shemu prema slici 5, dakle u principu sličnu onoj za sekundarni krug asinhronog motora. Prema tome i za serijski izmjenični motor vrijedi kružni dijagram prema slici 6. Budući da vrh vektora IX leži na kružnici, mora se i vrh vektora I nalaziti na nekoj kružnici.

Promjenljivi omski otpor R' nadomješta u ekvivalentnoj shemi na slici 5. mehaničku snagu motora:

$$P_m = IE_r = I^2R', \tag{2}$$

što je u skladu s jednadžbom (10.2–8) jer je kut pomaka $\psi = 0$.



Sl. 5. Nadomjesna ekvivalentna shema jednofaznoga serijskog kolektorskog motora s četkicama u neutralnoj zoni

Da dođemo do analitičke jednadžbe kružnog dijagrama (geometrijskog mjesta vrhova vektora struje) ovisno o zanimljivim pogonskim veličinama stroja (prema sl. 6), tj. da ustanovimo karakter promjenljivog otpora R', najjednostavnije je krenuti od osnovne jednadžbe (10.2–2) za napon rotacije E_r, uvrstivši u nju izraz (1) za glavni magnetski tok. Tako za napon rotacije izlazi:

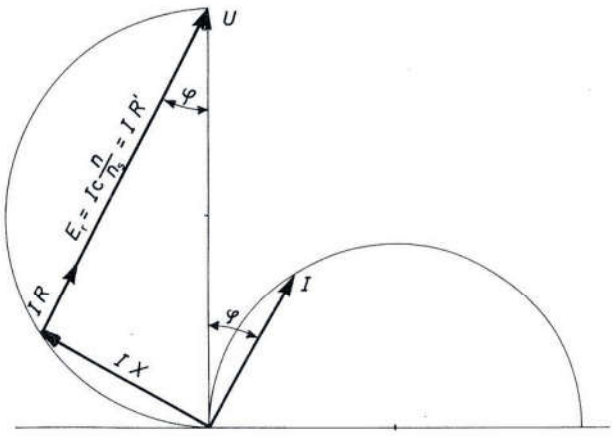
$$E_r = \frac{2}{\pi}\,\frac{p}{60f}\,n\,\frac{w_a}{w_u}\,X_u I.$$

Budući da je $\dfrac{60f}{p} = n_s$ *sinhrona* brzina vrtnje izmjeničnog stroja s p pari polova, priključenoga na mrežu frekvencije f, to izraz za E_r prelazi u:

$$E_r = \frac{2}{\pi}\,\frac{w_a}{w_u}X_u\frac{n}{n_s}I = c\frac{n}{n_s}I, \tag{3}$$

pri čemu je c konstantno za određeni stroj sve dok se zasiti željezo magnetskog kruga:

$$c = \frac{2w_aX_u}{\pi w_u}. \tag{4}$$



Sl. 6. Osnova za izvođenje kružnog dijagrama jednofaznoga serijskog kolektorskog motora

Napon U narinut na stezaljke stroja potroši se na padove napona u radnim i induktivnim otporima i na svladavanje induciranog napona rotacije

$$U = IR + \mathrm{j}IX + E_{\mathrm{r}}. \tag{5}$$

Uz pomoć izraza (3) to se dade napisati i kao:

$$U = I(R + c\frac{n}{n_{\mathrm{s}}} + \mathrm{j}X). \tag{5.a}$$

Prema tome je struja određena jednadžbom:

$$I = \frac{U}{R + c\frac{n}{n_{\mathrm{s}}} + \mathrm{j}X}, \tag{6}$$

što je zapravo jednadžba kružnice, a to se već vidi i na slici 6.

Maksimalno moguću struju (promjer kružnog dijagrama u mjerilu) dobivamo kad je vrijednost nazivnika jednadžbe (6) minimalna, a to je očito kad nestane (zbog vrtnje!) realni dio nazivnika, dakle pod uvjetima:

$$\frac{n}{n_{\mathrm{s}}} = -\frac{R}{c}$$

$$\mathrm{I}_{\max} = \frac{U}{X}. \tag{7}$$

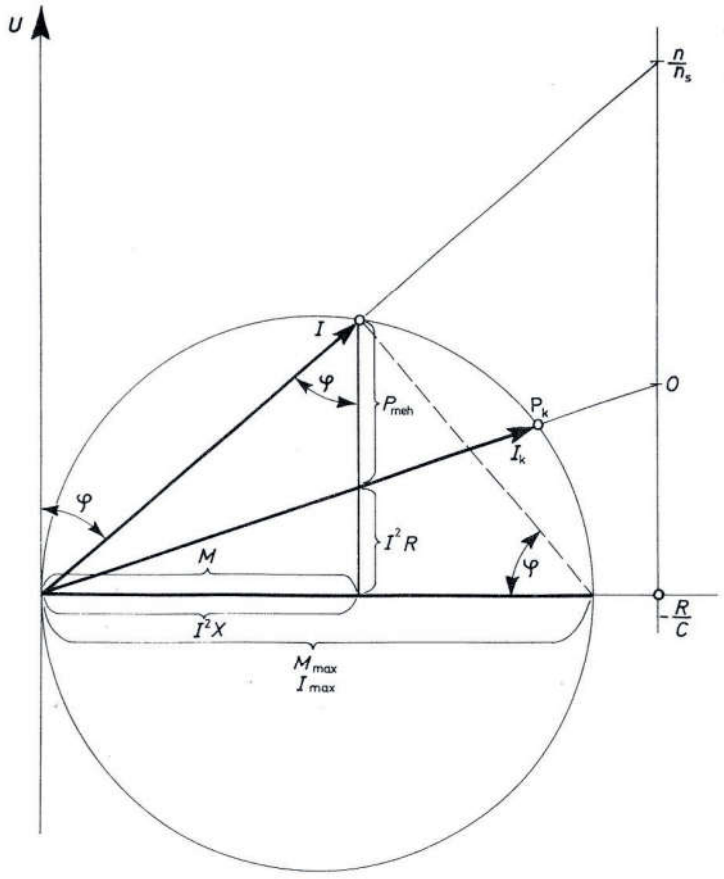
Taj je uvjet ispunjen kad rotor vrtimo u smjeru suprotnom motorskome uz brzinu vrtnje $\mathrm{n} = -n_{\mathrm{s}}\frac{R}{c}$ pomoću vanjske mehaničke snage, koja pokriva gubitke Jouleove topline u namotima i željezu motora; dakle je jednako tako kako je to i u kružnom dijagramu asinhronoga trofaznog motora.

Prikažimo kako se iz kružnog dijagrama izračunava brzina vrtnje. Nacrtat ćemo kružni dijagram (sl. 7) s promjerom proporcionalnim maksimalnoj struji prema jednadžbi (7). Zatim ćemo unijeti struju kratkog spoja I_{k}, koju dobivamo kao:

$$I_{\mathrm{k}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} \tag{8}$$

jer se stroj ne vrti, dakle je $n = 0$, prema jednadžbi (6). U produžetku apscise podignut ćemo (bilo gdje) okomicu. Na okomici je u sjecištu s produžetkom smjera struje kratkog spoja brzina vrtnje $\frac{n}{n_{\mathrm{s}}} = 0$, a u sjecištu okomice s apscisom vrijedi $\frac{n}{n_{\mathrm{s}}} = -\frac{R}{c}$. Tako se dobiva mjerilo za brzinu vrtnje svedenu na sinhronu brzinu vrtnje. Povučemo li tad u dijagramu vektor bilo koje struje i produžimo li mu smjer do okomice, bit će brzina vrtnje pri toj struji u motoru (svedena na sinhronu brzinu vrtnje n_{s}) određena u mjerilu udaljenošću od točke

$n = 0$. Konstrukcija za neki iznos struje I prikzana je na slici 7. Jedno od svojstava serijskog stroja vidi se i iz te konstrukcije. Za vrijednost struje $I = 0$ (prazni hod) bit će smjer te struje tangenta na kružni dijagram, dakle smjer vektora napona U, koji tek u beskonačnosti siječe okomicu na apscisu u točki $-\frac{R}{c}$, tj. tek pri beskonačno velikoj brzini vrtnje, što je jasno i iz jednadžbe (6).



Sl. 7. Kružni dijagram jednofaznoga serijskog kolektorskog motora

No za ocijeniti vanjsku karakteristiku jednofaznoga kolektorskog serijskog motora, važno je utvrditi opću ovisnost momenta motora i struje o brzini vrtnje. Već smo utvrdili da je kut induciranog napona rotacije i struje jednak nuli tj. $\psi = 0$, pa je moment motora prema jednadžbi (10.2–6):

$$M_{\mathrm{m}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi}\, p w_{\mathrm{a}} I \Phi_{\mathrm{gl}}. \tag{9}$$

Uvrstimo li za Φ_{gl} izraz (1), dobivamo uz pomoć jednadžbe (3):

$$\Phi_{\mathrm{gl}} = \frac{60cI}{2\sqrt{2} w_{\mathrm{a}} p n_{\mathrm{s}}}, \tag{10}$$

što uvršteno u (9) daje za moment izraz:

$$M_{\mathrm{m}} = \frac{60c}{2\pi n_{\mathrm{s}}}\, I^2. \tag{11}$$

Time je pokazana kvadratna ovisnost momenta motora o struji, jednaka kao i istosmjernome serijskom motoru. Uvrstivši za kvadrat struje iznos iz jednadžbe (5), izraz (11) prelazi u:

$$M_m = \frac{60c}{2\pi n_s} \frac{U^2}{(R + c\frac{n}{n_s})^2 + X^2}, \tag{12}$$

a za maksimalni moment (zbog $\frac{R}{c} = -\frac{n}{n_s}$);

$$M_{max} = \frac{60c}{2\pi n_s} I^2_{max} = \frac{60c}{2\pi n_s} \frac{U^2}{X^2}. \tag{13}$$

Na kružnom dijagramu (sl. 7) promjer kružnice (I_{max}) u mjerilu predočuje i maksimalni moment stroja M_{max}. Podijelimo li jednadžbu (11) jednadžbom (13), dobivamo odnos momenta i maksimalnog momenta motora kao:

$$\frac{M_m}{M_{max}} = \frac{I^2}{I^2_{max}} = \frac{X^2}{(R + c\frac{n}{n_s})^2 + X^2},$$

što je očito kvadrat sinusa kuta između struje i napona! Dakle, bit će:

$$\frac{M_m}{M_{max}} = \sin^2\varphi. \tag{14}$$

Budući da je na kružnom dijagramu maksimalni moment u mjerilu jednak maksimalnoj struji, to je u tome istom mjerilu moment motora za neku struju I jednak iznosu njezine jalove komponente. Sve je to naznačeno na kružnom dijagramu na slici 7. Sad se i faktor snage $\cos\varphi$ može iz jednadžbe (14) izraziti uz pomoć omjera momenata:

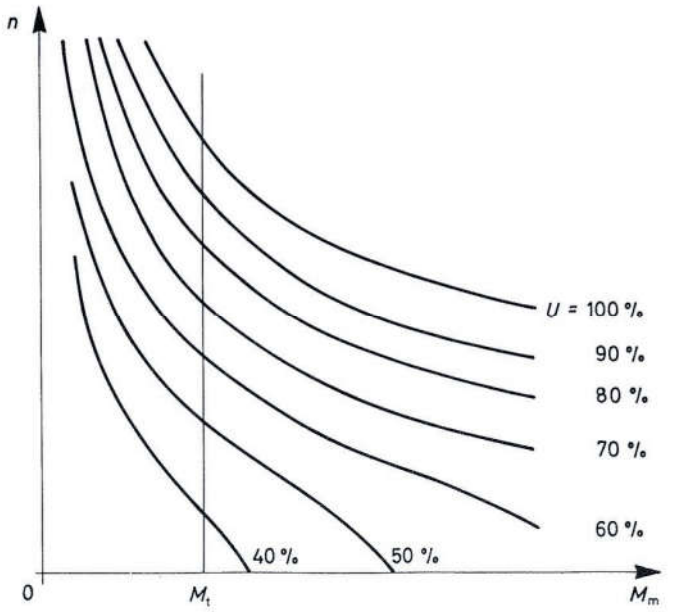
$$\cos\varphi = \sqrt{1 - \sin^2\varphi} = \sqrt{1 - \frac{M_m}{M_{max}}}. \tag{15}$$

Iz kružnog dijagrama dade se još toga uočiti. Analogno kao za kružni dijagram asinhronog motora radna komponenta struje u određenom mjerilu odgovara radnoj snazi koju motor uzima iz mreže i koja se vektorom struje kratkog spoja I_k dijeli na gubitke Jouleove topline u namotima stroja (I^2R) i na mehaničku snagu motora P_m:

$$P_m = IE_r = c\frac{n}{n_s} I^2. \tag{16}$$

Međutim, za moment se motora odmah dobiva izraz (11), čim se jednadžba (16) podijeli kutnom brzinom vrtnje ω. Za nazivni napon motora dobivamo vanjsku karakteristiku (100%) prikazanu slikom 8. Podešavanje brzine vrtnje ostvaruje se promjenom iznosa narinutog napona. Proporcionalno promjeni napona U mijenja se promjer kruga u kružnom dijagramu, a time se mijenjaju i

karakteristike momenta prema slici 8. U tom dijagramu ucrtan je neki konstantni moment tereta, pa vidimo da se brzina vrtnje dade vrlo lijepo podešavati promjenom napona. Budući da je riječ o izmjeničnom naponu, to se napon vrlo jednostavno mijenja pomoću regulacijskog transformatora.



Sl. 8. Vanjske karakteristike jednofaznoga serijskog kolektorskog motora $n = f(M_m)$, pri konstantnim iznosima narinutog napona

Valja istaknuti da su sva dosadašnja razmatranja izvršena uz pretpostavku da nema zasićenja u željezu i da su naponi i struje sinusnog oblika. Zasićenje mnogo utječe na rad ovih motora i njihovu komutaciju. Međutim, osnovne karakteristike i načelni odnosi raznih veličina ostaju u biti nepromijenjeni, pa nam omogućuju i dalje dobar uvid u fizikalnu sliku djelovanja i u funkcionalne odnose motora.

Jedna od vrlo važnih pogonskih osobina svakoga izmjeničnog motora, pa onda i jednofaznoga serijskog kolektorskog, jest njegov faktor snage $\cos\varphi$, kao mjerilo kolikom jalovom snagom on opterećuje vodove i aparaturu energetskog i prenosnog sistema. Već se iz slike kružnog dijagrama dade naslutiti da dobar faktor snage (visoki iznos $\cos\varphi$) ima taj motor samo uz visoke brzine vrtnje, a $\cos\varphi = 1$ imao bi tek uz beskonačno veliku brzinu vrtnje. Ta se slika još bolje uviđa iz vektorskog dijagrama jednofaznoga serijskog kolektorskog motora nacrtanoga za konstantnu struju i za razne brzine vrtnje (vidi sl. 9). Taj način gledanja na problematiku motora ima svoj temelj u činjenici da stroj može raditi uz konstantnu struju, jer je to osnova njegova zagrijavanja, pa će uz male brzine vrtnje moći davati malu (malo E_r!), a uz veće brzine veću snagu. Motor će pri tome razvijati praktički konstantan moment, prema jednadžbi (12). Zaključak je da će stroj pri malim brzinama vrtnje opterećivati mrežu velikim iznosom jalove struje i snage. Važno je sad iz fizikalnih svojstava stroja zaključiti kako valja graditi stroj

da ta mana dođe što manje do izražaja. Da bude $\cos\varphi$ što veći, treba da kut φ bude što manji, dakle i njegov tangens što manji. Sa slike 9. vidi se da je:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{IX}{I(R + c\frac{n}{n_s})} = \frac{X}{R + c\frac{n}{n_s}}, \tag{17}$$

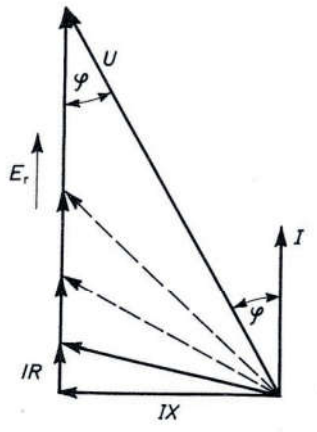
dakle morao bi induktivni otpor X biti što manji. Zanemarimo li veličinu pada napona na radnom otporu prema idnduciranom naponu rotacije, bit će:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{Xn_s}{cn}, \tag{17a}$$

iz čega se vidi da ćemo mali tangens φ postići uz veliku brzinu vrtnje, što uvodno znamo. Daljnji uvid steći ćemo samo analizom konstante $\frac{Xn_s}{c}$, pa razvojem c iz jednadžbe (4) izlazi:

$$\operatorname{tg}\varphi \doteq \frac{X}{c}\frac{n_s}{n} = \frac{\pi}{2}\frac{w_u}{w_a}\frac{X}{X_u}\frac{n_s}{n}. \tag{18}$$

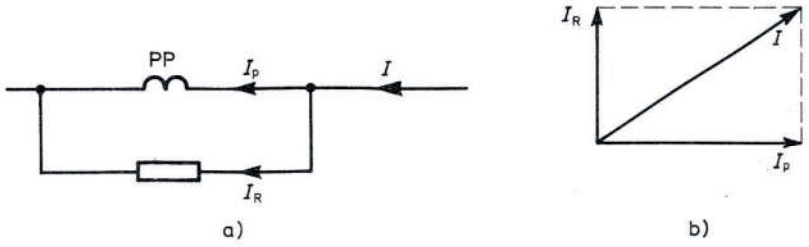
Iz tog se izraza dobiva da se malenoj vrijednosti $\operatorname{tg}\varphi$ može pridonijeti postizanjem malog omjera broja zavoja uzbudnog namota prema broju zavoja armaturnog namota, što, između ostaloga, znači gradnju s manjim magnetskim naprezanjem željeza (manjim zasićenjem) i povećanjem toplinskog naprezanja armature (povećanje strujnog obloga zbog većeg broja zavoja armature). Nešto će se tom cilju pridonijeti i gradnjom uz što manje rasipne induktivne otpore, jer to smanjuje faktor $\frac{X}{X_u}$ u jednadžbi (18). No najviše ćemo postići gradnjom stroja za nižu frekvenciju jer se proporcionalno smanjuje i sinhrona brzina vrtnje n_s, pa eto drugoga vrlo važnog razloga zašto se nekad u vuči odlučilo za smanjenu frekvenciju, od $16\frac{2}{3}$ umjesto 50 Hz, uz prije objašnjeni razlog o smanjenju napona transformacije u kratkospojnom svitku.



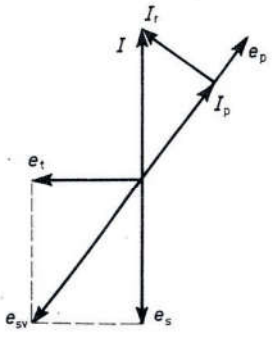
Sl. 9. Vektorski dijagram serijskoga izmjeničnog kolektorskog motora uz konstantnu struju i za razne brzine vrtnje

10.3.1. Komutacija jednofaznoga serijskog kolektorskog motora

Gotovo da se ne bi imalo što dodati onome rečenom o komutaciji jednofaznih kolektorskih motora općenito da nema jedne mogućnosti olakšanja tog problema jednofaznome serijskom kolektorskom stroju. Spoji li se jedan radni otpor paralelno namotu pomoćnih polova kao na slici 10.a, neće više pomoćnim polom teći struja I, nego manja I_p, jer će se struja I podijeliti na granu kroz namot pomoćnog pola i granu kroz otpor R_p. No i faze tih struja neće biti jednake jer je otpor namota pomoćnog pola pretežno induktivan, a otpor otpornika R_p pretežno radni (vidi sl.10.b). Da bi namot pomoćnih polova ipak imao potrebno protjecanje, povećat će mu se broj zavoja (i eventualno smanjiti presjek vodiča), što će općenito održati, ako ne i pojačati, razlaz u fazi struja kroz namot pomoćnih polova i kroz otpor R_p. Zbog faznog pomaka kompenzirat će se struja kroz pomoćni pol i dio (ako ne cijeli iznos) napona transformacije e_t u svitku koji komutira, jer se i ona pomaknula u fazi. Pojava se može jasno razumjeti sa skice na slici 11. Na žalost, ta mjera nije univerzalna jer vrijedi potpuno samo uz određenu struju (vrtnju) motora, tj. određeni napon samoindukcije e_s, a u svim ostalim slučajevima kompenzacije ona je nepotpuna, djelomična. Posebno je nemoćna u samom pokretanju stroja.



Sl. 10. a) Spoj otpornika paralelno namotu pomoćnih polova
b) Podjela struja prema spoju pod a)



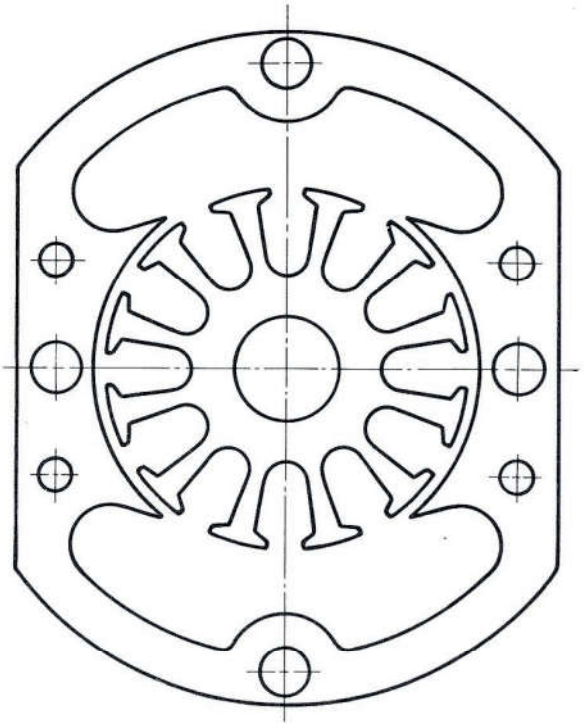
Sl. 11. Vektorski dijagram napona u svitku u komutaciji za spoj prema slici 10; e_{sv} je ukupni inducirani napon u svitku, zbog rotacije i transformacije

10.4. Univerzalni motor

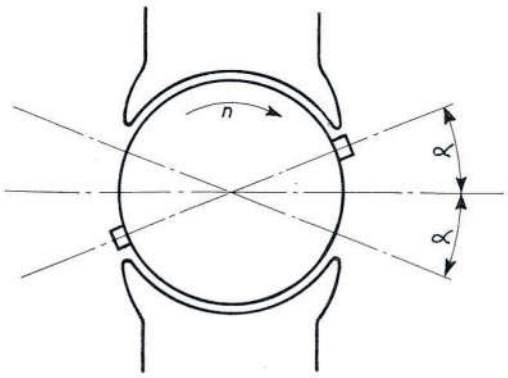
Mali univerzalni motori u biti su kolektorski motori koji se mogu priključiti i na istosmjerni i na izmjenični izvor napona. Zbog male cijene, dobrih pogonskih svojstava i jednostavnog održavanja, nalaze oni upotrebu u stotinama vrsta sitnih elektromotornih pogona. Zato se i danas snažno razvijaju i njihovo značenje kao električkih strojeva neprestano raste.

Naziv *univerzalni motor* potječe od svojstava tog motora, koji može u svom radu biti napajan i istosmjernom i izmjeničnom strujom.

To je zapravo serijski jednofazni izmjenični kolektorski motor male snage, bez kompenzacijskog namota i bez namota pomoćnih polova, pa onda i bez pomoćnih polova (vidi sl. 1). Svi su ti elementi izostavljeni radi smanjenja troškova proizvodnje (cijene motora), a u izvedbi s malim snagama postaje komutacija podnošljiva i bez njih. Tako je kad je riječ o motorićima snage od nekoliko desetaka ili nešto više od 100 W. Nešto većim univerzalnim motorima može se komutacija popraviti, ili se ona omogućuje pomakom četkica za neki kut α suprotno smjeru vrtnje (vidi sl. 2). Tim se pomakom uspostavlja neka vrsta kompenzacijskog namota, smatramo li zavoje armaturnog namota u zoni kuta 2α kompenzacijskim namotom, čime se stvaraju povoljniji uvjeti za komutaciju takvog motora. Posljedica je toga da se takvi motori upotrebljavaju samo za jedan smjer vrtnje. Univerzalni motori grade se redovno u dvopolnoj izvedbi (sl. 1), a s odgovarajućim pomakom četkice i za snage do nešto više od 1 kW [L 32].



Sl. 1. Rez lima univerzalnog motora

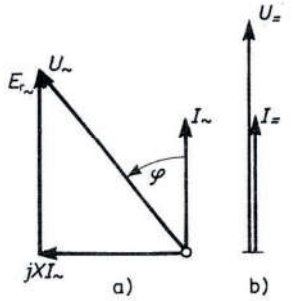


Sl. 2. Pomak četkice (većeg) univerzalnog motora radi stvaranja boljih komutacijskih prilika

10.4.1. Osnovna fizikalna slika

Teorija univerzalnih motora može se u cijelosti svesti na teoriju izmjeničnih kolektorskih serijskih motora kad su oni priključeni na izmjeničnu jednofaznu mrežu, ali i na teoriju istosmjernih serijskih motora priključenih na istosmjernu mrežu. Budući da im namoti mogu termički podnijeti jednaku efektivnu

vrijednost istosmjerne i izmjenične jednofazne struje ($I_= = I_\sim$), to se oni pokušavaju graditi i za jednaku efektivnu vrijednost istosmjernog i izmjeničnog nazivnog napona ($U_= = U_\sim$). Pri tome je motor u izmjeničnom pogonu znatno zasićeniji, pa se katkad izrađuju s otcjepima uzbudnog namota, tako da se u izmjeničnom pogonu uzbuđuju s nešto manjim brojem zavoja uzbudnog namota, kako ne bi bili prezasićeni i imali prevelike gubitke u željezu. Do načelnih razlika u vanjskoj karakteristici motora s jednakim uzbudnim namotom priključenoga alternativno na jednofaznu izmjeničnu ili istosmjernu mrežu, lako dolazimo iz sasvim pojednostavnjenoga vektorskog dijagrama na slici 3. Radi jednostavnosti



Sl. 3. Naponski dijagrami univerzalnog motora: a) priključenoga na jednofazni izmjenični napon; b) priključenoga na istosmjerni napon

zanemarimo najprije omski otpor svih u seriju spojenih namota. Tad na slici 3.a dobivamo vektorski dijagram univerzalnog motora priključenoga na izmjeničnu jednofaznu mrežu, što je u skladu sa slikom 10.3–6, tj. s vektorskim dijagramom jednofaznoga serijskog kolektorskog motora, uz učinjenu pretpostavku $R = 0$. Na slici 3.b odgovarajući je vektorski dijagram kakav ima istosmjerni serijski motor, a do njega dolazimo zamislimo li istosmjernu mrežu izmjeničnom s frekvencijom $f = 0$. Sa slike 3.a jasno je da je napon rotacije univerzalnog motora priključenoga na izmjeničnu mrežu:

$$E_{r\sim} = U_\sim \cos\varphi, \tag{1}$$

gdje je φ kut pomaka napona i struje. Sa slike 3.b napon će rotacije (inducirani napon u rotorskom namotu) univerzalnog motora priključenoga na istosmjernu mrežu biti:

$$E_{r=} = U_=. \tag{2}$$

Moment motora za obje alternacije možemo pisati:
za izmjeničnu

$$M_\sim = \frac{E_{r\sim} I_\sim}{\omega} \doteq \frac{30 U_\sim I_\sim \cos\varphi}{\pi n}; \tag{3}$$

za istosmjernu

$$M_= = \frac{E_{r=} I_=}{\omega_=} \doteq \frac{30 U_= I_=}{\pi n_=}. \tag{4}$$

U jednadžbama (3) i (4) s n je označena brzina vrtnje i s ω kutna brzina, a indeksi se odnose na vrstu mreže na koju je motor priključen. Zanemarimo li pojave zasićenja, jednake će efektivne vrijednosti strujâ $I_\sim$ i $I_=$ i naponâ $U_\sim = U_=$ za jednake vrijednosti momenata $M_= = M_\sim$ dati odnos brzinâ vrtnje:

$$n_\sim = n_= \cos\varphi. \tag{5}$$

Po toj jednostavnoj relaciji univerzalni motor uz jednak moment i istosmjerno priključenje ima veću brzinu vrtnje, što znači i veću snagu. Razlika je to manja što je brzina vrtnje veća, jer znamo da se jednofaznome serijskom motoru povećava faktor snage $\cos\varphi$ kako brzina vrtnje raste. U praktičkom pogonu taj se zaključak nešto mijenja uglavnom zbog utjecaja zanemarenih veličina. Pri tome već znatno utječe i pretpostavka da je radni otpor zanemariv ($R = 0$), ali je mnogo važniji utjecaj zasićenja jer smo zapravo zbog $E_{r=} = E_{r\sim}$ pretpostavili i za glavne magnetske tokove $\Phi_{gl\sim} = \sqrt{2}\,\Phi_{gl=}$, pa će u izmjeničnom pogonu zasićenja biti znatno veća. Rezultat toga može se procijeniti iz slike 4. za tri motora približno jednake snage građena za tri različite nazivne brzine vrtnje. Razlike brzina vrtnje su manje za veće nazivne brzine vrtnje, a da se pri većim nazivnim brzinama vrtnje i malim opterećenjima karakteristike čak i sijeku, tj. da brzina vrtnje uz izmjenični priključak može postati veća nego pri istosmjernom priključku, posljedica je različitih prilika zasićenja uz jednake efektivne vrijednosti struja $I_\sim$ i $I_=$.

Onim univerzalnim motorima kojima želimo jednaku brzinu vrtnje uz jednake veličine istosmjernog i izmjeničnog narinutog napona, potreban je za priključak istosmjernog napona na uzbudnom namotu poseban otcjep s većim brojem zavoja. Time uz isti moment dobivamo jače magnetsko polje i zato manju brzinu vrtnje, tj. jednaku onoj uz priključak na izmjenični napon. U slučaju kad možemo zanemariti omske padove napona i utjecaj zasićenja, bit će:

$$w_{u=} \doteq \frac{w_{u\sim}}{\cos^2\varphi}, \tag{6}$$

$$I_= \doteq I_\sim \cos\varphi, \tag{7}$$

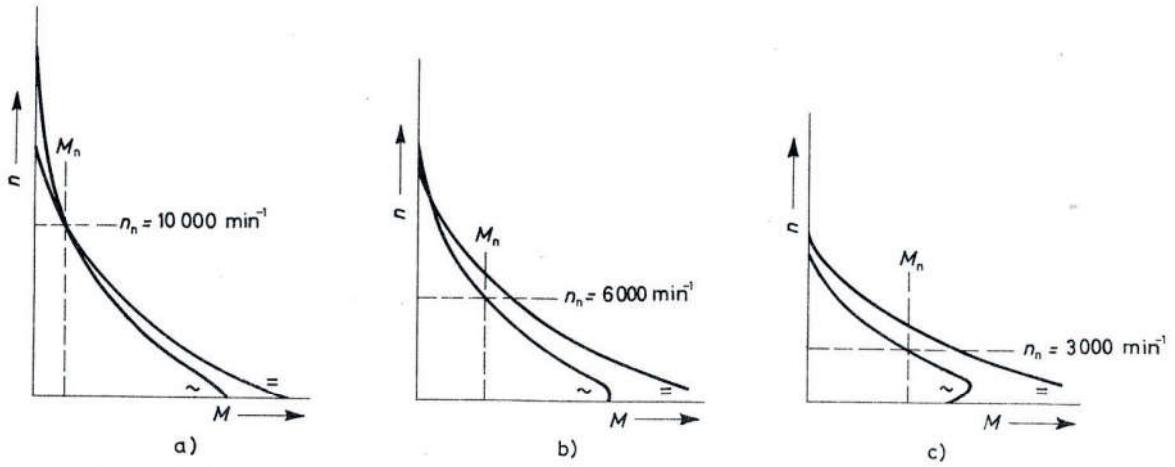
pri čemu je w_u broj zavoja uzbudnog namota.

Budući da se danas univerzalni motor gotovo isključivo upotrebljava kao izmjenični kolektorski stroj, jasno je da se u pristupu razjašnjenjima prilazi redovito pretpostavljajući priključak na izmjeničnu mrežu. Kako je taj pristup i teorijski složeniji, to se ponašanje univerzalnog motora kao istosmjernoga razumije odmah kao pojednostavnjena slika ponašanja izmjeničnoga. Zbog pretežno izmjenične upotrebe i područje je brzinâ vrtnje uvijek visoko ($\cos\varphi$!), tj. grade se strojevi za velike brzine, i do 40 000 min^{-1}. Donja granica brzine vrtnje negdje je oko 1 500 okretaja u minuti.

10.4.2. Neki tehnički parametri

Gledajući sliku 4. pojavljuje se pitanje zašto univerzalni motor rasterećen u praznom hodu ne teži k pobjegu, već ima konačnu vrijednost brzine vrtnje u praznom hodu. Tome je glavni razlog što su u praznom hodu mehanički gubici koji se pokrivaju iz momenta motora jako visoki (red veličine 15—20 % izlazne snage), tako da motor nikad nije u idealnome praznom hodu, već njime uvijek teče struja da bi se stvorio potreban moment za pokrivanje mehaničkih gubitaka, pa i dijela

gubitaka u željezu, i struja za pokrivanje općih gubitaka. Krenuvši od te konstatacije pozabavimo se malo pitanjima gubitaka snage za strojeve vrlo male snage općenito i za gubitke univerzalnog motora posebno, zbog velikog značenja



Sl. 4. Vanjske karakteristike univerzalnih motora raznih nazivnih brzina vrtnje: a) za $n_n = 10\,000$ min^{-1}; b) za $n_n = 6\,000$ min^{-1}; c) $n_n = 3\,000$ min^{-1}

tog motora u domeni malih strojeva. Iz zakona sličnosti (zakona rasta) o strojevima znamo da im snaga raste približno s četvrtom potencijom rasta njihove linearne dimenzije (uz konstantnu indukciju B kao uzročnika magnetskih naprezanja u stroju i uz konstantnu gustoću struje namota Γ kao uzročnika strujnih naprezanja). Gubici u željezu, budući da su proporcionalni masi (volumenu) željeza, i gubici u namotu (proporcionalni masi bakra), rastu s trećom potencijom porasta linearne dimenzije. Zbog toga, kako snaga stroja raste, udio gubitaka u primljenoj i predajnoj snazi sve je manji, a korisnost η sve veća. Gledajući strujne krugove stroja, padovi napona na radnim otporima sve su manji prema induciranim naponima kako veličina stroja raste, tj. sve je manji udio padova napona u ukupnom naponu narinutome na strujni krug. Obratno, kad snaga stroja postaje sve manja, udio gubitaka u primljenoj snazi (i onih u bakru i onih u željezu) sve je veći i korisnost η sve je manja, a jednako su tako i padovi napona sve veći u odnosu prema induciranim naponima. To znači da su idealizirane predodžbe strojeva s nekim zanemarenim padovima napona u vektorskim prikazima, i nekim zanemarenim gubicima snage u promatranju velikih strojeva, mnogo bliže stvarnom stanju u tim strojevima nego što je to s onima male snage. A kad je riječ o strojevima vrlo male snage, kakav je univerzalni motor, te približne idealizirane predodžbe jedva da kvantitativno imaju neku vrijednost, već daju samo osnovno fizikalno ponašanje, koje se teško može iskoristiti za neko konkretno računanje i određivanje stanja. Zato se u konkretnoj analizi rada univerzalnog motora ne zanemaruje ni jedna vrsta gubitaka, pa analizu valja početi bilancom snage motora. Posljedica činjenice da se ni gubici u željezu ne mogu zanemariti dovodi to toga da će se i oni pojaviti i u vektorskom dijagramu.

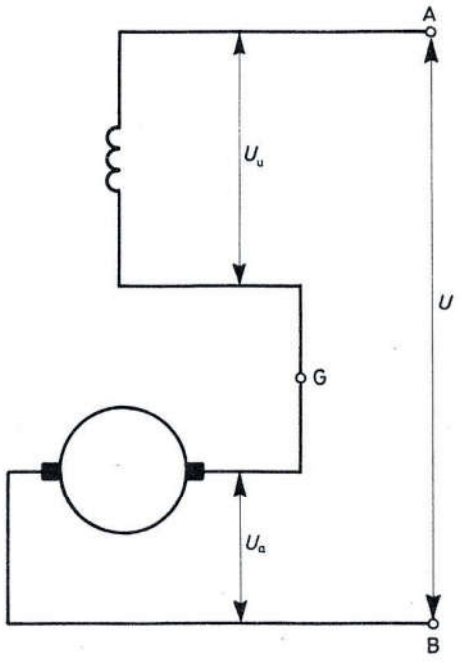
No prije nego započnemo samu analizu i točnije upoznavanje kvantitativnih svojstava i odnosa u stroju, moramo na žalost, ustanoviti da se to ne može

dovoljno dobro učiniti na temelju proračuna pojedinih veličina (gubitaka, padova napona itd.), kako je to uobičajeno za motore već nešto većih snaga od onih univerzalnoga, već se sama analiza provodi na temelju ispitivanja gotovog motora [L 32, 63]. Od više činjenica koje utječu na to stanje spomenimo samo neke važnije. Tehničke netočnosti izrade i kvalitete materijala (tehničke tolerancije) znatno više utječu na netočnosti računskih rezultata malih strojeva nego što je to izraženo u velikih. Promjena kvalitete materijala zbog tehnoloških postupaka izrade ima također neusporedivo veći utjecaj, posebno za magnetski krug stroja, tako da je i inače složeni postupak računanja gubitaka u željezu univerzalnog motora toliko nepouzdan da zna izmijeniti cijelu sliku ponašanja. Metode analize stroja na temelju eksperimentalnih metoda (ispitivanja) daju barem za ispitivani stroj točniju sliku, pa su očekivana odstupanja za drugi primjerak jednakog stroja u snošljivim granicama. Ovdje nećemo opisivati sam postupak pojedinih ispitivanja (osim izuzetno), već ćemo se koristiti samo rezultatima. No budući da se ni dio za sliku potrebnih elemenata ne može lako ni ispitati, pokazat ćemo novije metode [L 63] kombinacije pojedinih rezultata ispitivanja i grafičkog konstruiranja, recimo, potpunoga vektorskog dijagrama napona, no o tome poslije.

10.4.3. Točniji prikaz ponašanja univerzalnog motora

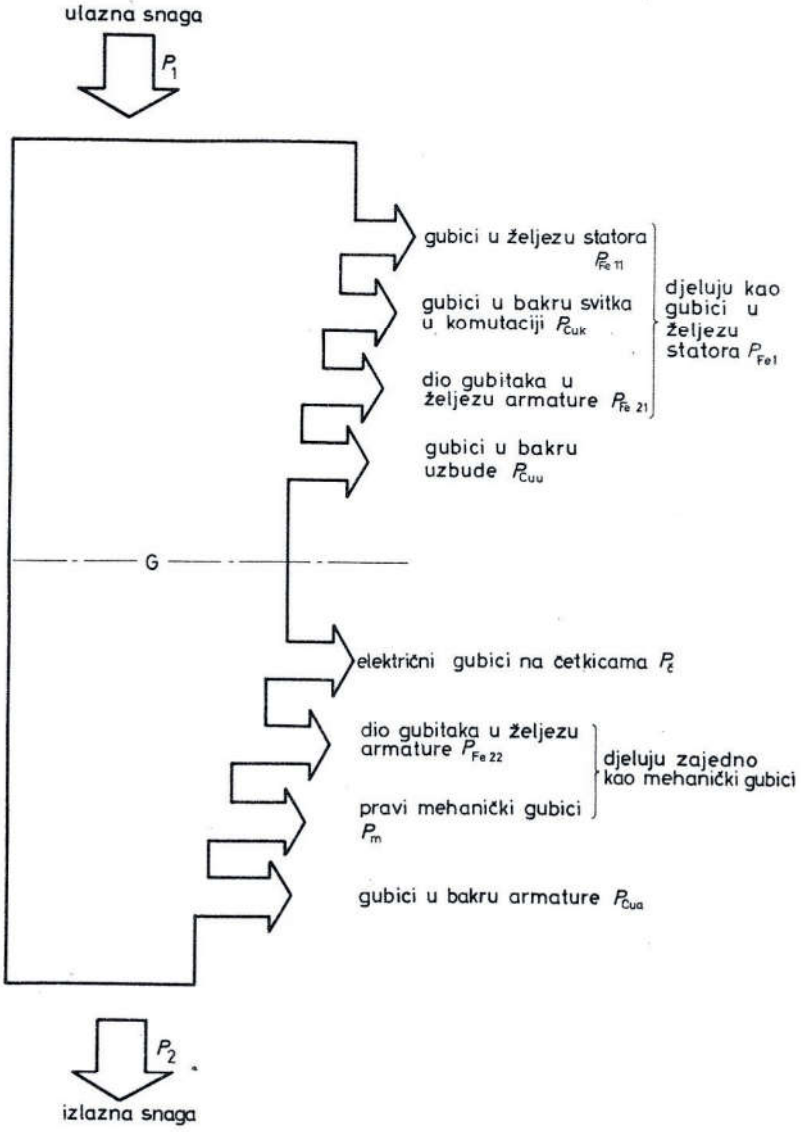
Iz upravo obrazloženog utjecaja gubitaka na točniju predodžbu o stroju lako je razumjeti da se razlaganje počinje slikom bilance snage, kakva je uobičajena za motore izmjenične struje. Pri tome valja uvodno odrediti podjelu stroja na primarni dio, stator, i sekundarni dio, rotor. Slika 5. prikazuje shemu stroja prema kojoj se primarni dio (galvanski) nalazi između točke A i G, a sekundarni između G i B. Prema tome napon na uzbudi (primaru) U_u i napon na armaturi U_a vektorski zbrojeni daju napon U narinut na motor:

$$U = \overline{U}_a + \overline{U}_u. \tag{8}$$



Sl. 5. Raspodjela narinutoga izmjeničnog napona na univerzalni motor U na napon uzbudnog (primarnog) dijela U_u i armaturnog (sekundarnog) dijela U_a motora

Slikom 6. predočena je bilanca snage motora. Od ulazne snage P_1, odbivši gubitke koje snosi primarni dio, tj. odbivši gubitke P_{Fe11} (gubici koji djeluju kao gubici u željezu statora) i P_{Cuu} (gubici u namotu uzbude), dolazi se do snage predane sekundaru (rotoru). Odbivši od te snage električne gubitke na četkicama $P_{\text{č}}$, gubitke u bakru armaturnog namota P_{Cua} i gubitke koji se oduzimaju od osovine, tj. prave mehaničke gubitke P_{m} i dio gubitaka u željezu armature P_{Fe22} koji djeluju na jednak način, dobivamo stvarnu (predanu) snagu stroja P_2. Takvu raspodjelu gubitaka na primarni dio (do točke G na sl. 6) i na sekundarni dio (od točke G do snage P_2 na sl. 6) valja dakako i fizikalno obrazložiti. Pitanje dodjele gubitaka primaru ili sekundaru jasno je samo po sebi već iz slike 5. za prave mehaničke gubitke P_{m}, električne gubitke na četkicama $P_{\text{č}}$, gubitke u bakru namota P_{Cuu} i P_{Cua}, pa i za prave gubitke u željezu statora P_{Fell}. Teškoće općenito čine gubici u željezu armature i gubici u bakru dijela armaturnog namota koji



Sl. 6. Dijagram snage (bilanca snage) univerzalnog motora priključenoga na izmjeničnu mrežu

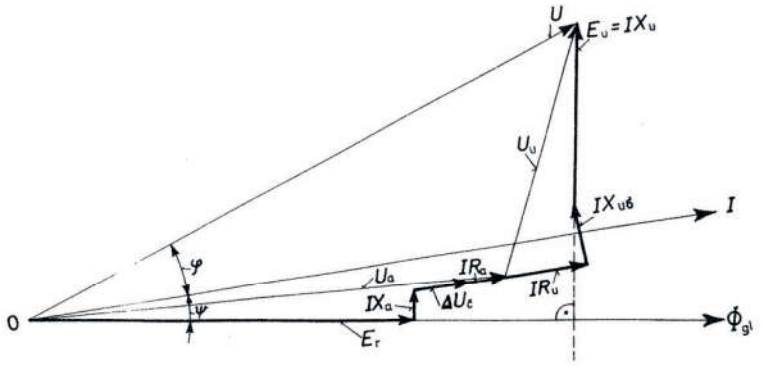
komutira P_{Cuk}. To je zapravo posljedica toga što se u principu snaga prenosi iz primara u sekundar na dva načina – galvanskim putem (dominantno), ali i magnetskim putem, prolaskom glavnoga magnetskog toka kroz zračni raspor. Tako se postavlja pitanje kojim se putem dovodi snaga kratko spojenom svitku u komutaciji. Očito je da će struju u tom svitku uzrokovati kompleksan napon sastavljen od napona samoindukcije i napona transformacije, pri čemu je drugi dominantan. Lakše ćemo se odlučiti ako uočimo činjenicu da kratkospojni svitak u komutaciji čini neku vrstu kratko spojenoga sekundara transformatora kojem je primarni dio uzbudni namot. Tako sve gubitke u bakru svitka u komutaciji P_{Cuk} pripisujemo primaru jer njihov najveći dio djeluje na jednak način kao npr. gubici vrtložnih struja u željezu statora, koji su dio gubitaka u željezu primara P_{Fe11}. Još je teže razlučiti gubitke u željezu armature. Za njihov dio stvoren zbog vrtložnih struja može se jednako tako reći da djeluje kao kratko spojeni sekundar (tercijar) transformatora kojem je primar uzbudni namot na statoru. S druge strane, gibanjem rotora djeluje na česticu željeza u armaturi sistem frekvencija složen od frekvencije mreže f i frekvencije $\frac{pn}{60}$ nastale vrtnjom rotora. Zato su razmatranja i proračuni tu dosta zamršeni, a točnija podjela gubitaka na one koje pokriva stator P_{Fe21} i one što ih pokriva rotor (koji koče motor!) P_{Fe22} gotovo je nemoguća. No načelna podjela gubitaka prema slici 6. očito je pravilna. Ovo kratko tumačenje djelovanja gubitaka jasno pokazuje već prije spomenutu nužnost kvantitativne analize djelovanja univerzalnog motora na temelju ispitivanja, a ne proračuna veličina.

Uzevši za osnovu bilancu snage na slici 6, može se u principu nacrtati vektorski dijagram napona na slici 7, pri nekoj brzini vrtnje n. Na osi apscisa (realna os) nanijeta je efektivna vrijednost struje I motora, a pod kutom φ nacrtana je efektivna vrijednost napona U složena od naponâ U_u i U_a prema jednadžbi (8). Za napone U_u (uzbude) i U_a (armature) vrijedi:

$$U_u = E_u + R_u I + \mathrm{j}X_{u\sigma} I, \tag{9}$$

$$U_a = E_r + R_a I + \Delta U_č + \mathrm{j}X_a I, \tag{10}$$

pri čemu su R_u i R_a omski otpori namota uzbude i namota armature, $X_{u\sigma}$ i X_a otpori rasipnih induktiviteta namota uzbude i namota armature, $\Delta U_č$ pad napona



Sl. 7. Vektorski dijagram napona univerzalnog motora priključenoga na izmjeničnu mrežu (četkice u neutralnoj zoni)

na četkicama, E_r inducirani napon rotacije armature i $E_u = IX_u$ napon samoindukcije u uzbudnom svitku, jednak produktu struje i induktivnog otpora X_u koji predstavlja glavni magnetski tok Φ_{gl}.

Za inducirani napon rotacije E_r znamo da vrijedi jednadžba (10.2–2), tj.:

$$E_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{p}{a} \frac{nz}{60} \Phi_{gl}, \tag{11}$$

a za napon samoindukcije uzbudnog svitka:

$$E_u = \sqrt{2}\ \pi f w_u \Phi_{gl}. \tag{12}$$

Pri tome je p broj pari polova, a broj pari paralelnih grana, z ukupni broj vodiča armature i w_u broj zavoja uzbudnog namota. Smjer vektora napona rotacije E_r ujedno je i smjer vektora glavnog magnetskog polja Φ_{gl} (kako je i prikazano na sl. 7), pa je smjer samoinduciranog napona E_u okomit na njega. Nastali kut ψ tako je kut (električkog) pomaka između glavnog polja Φ_{gl} i struje I. Ako sad sve vektore sa slike 7. projiciramo na realnu os (smjer struje I), dobivamo množeći te projekcije (napone!) strujom I sve snage, odnosno gubitke snage, kako to prikazuje slika 8. Pomoću slike 8. uvjerit ćemo se da vrijedi:

$$P_1 = UI\cos\varphi, \tag{13}$$

$$P_2 + P_m + P_{Fe22} = E_r I\cos\psi, \tag{14}$$

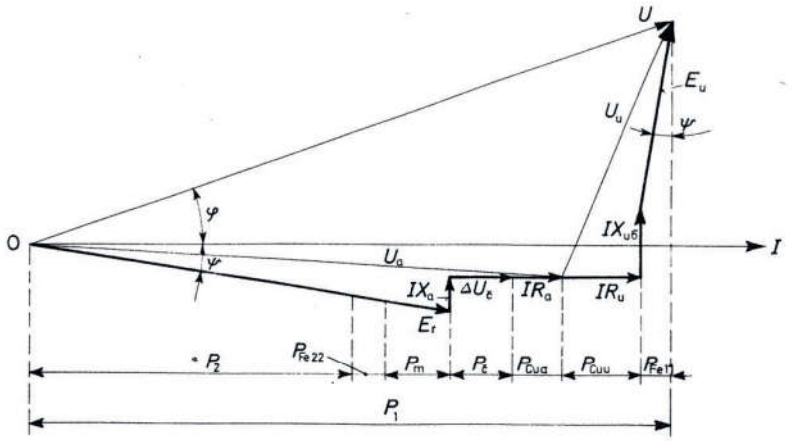
$$P_{Cua} = I^2 R_a, \tag{15}$$

$$P_{Cuu} = I^2 R_u, \tag{16}$$

$$P_č = \Delta U_č I, \tag{17}$$

$$P_{Fe11} = E_u I\sin\psi. \tag{18}$$

Dijagrami na slikama 7. i 8. nacrtani su za univerzalni motor s četkicama u neutralnoj zoni. Za motor s četkicama pomaknutima za kut α nasuprot smjeru

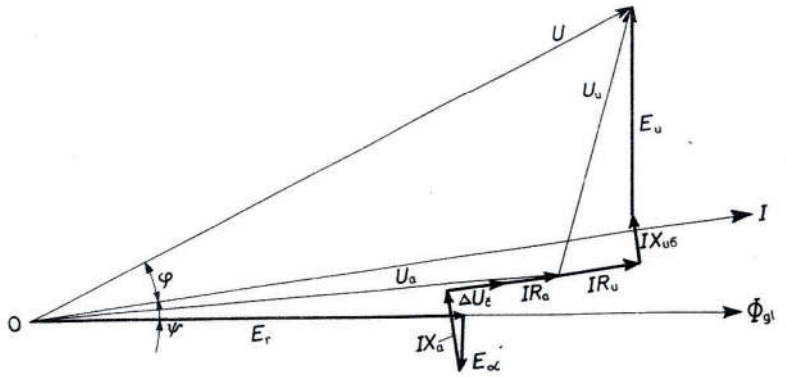


Sl. 8. Raspored snaga i gubitaka univerzalnog motora priključenoga na izmjeničnu mrežu, prema dijagramu napona na slici 7. i bilanci snage sa slike 6.

vrtnje, kao na slici 2 (veći motori), vrijedio bi vektorski dijagram napona na slici 9. Razlika je prema dijagramu na slici 7. u tome što se pojavio novi vektor, E_α, tj. vektor napona transformacije za vodiče zahvaćene kutom 2α (vidi sl. 2). Budući da je taj napon nastao jednakim djelovanjem glavnoga magnetskog toka kao na uzbudni svitak, to mu je i smisao jednak, a predznak (smjer) određen je smislom pomaka četkica.

Iznos mu je, dakle:

$$E_\alpha = \sqrt{2}\ \pi f\ \frac{4\alpha}{360}\ \frac{z}{4a}\Phi_{gl}. \tag{13}$$



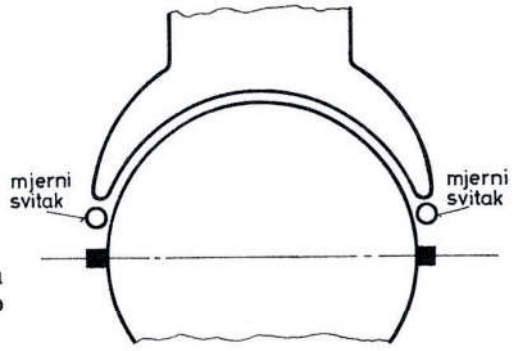
Sl. 9. Vektorski dijagram napona univerzalnog motora priključenoga na izmjeničnu mrežu (četkice pomaknuti iz neutralne zone nasuprot smjeru vrtnje za neki kut α)

Tako je vektorskim dijagramima i slikama 7, 8. i 9. univerzalni motor realno fizikalno opisan, i za potrebe je prakse kvantitativno prikazan.

10.4.4. Konstrukcija vektorskog dijagrama

Kratkim razmatranjem vektorskog dijagrama na slici 7. ili 9. vidimo zašto ga ne možemo nacrtati na temelju proračuna. Veličine X_a (rasipni otpor armature namota), X_u (rasipni otpor uzbudnog namota) i kut ψ teško se mogu izračunati na osnovi komutacijskih podataka. No polazeći od mjernih podataka moguće je spretnim kombinacijama konstruirati vektorski dijagram napona kao na slici 7. ili 9, pa onda, ako je potrebno, odrediti i veličine X_a, X_u i ψ. Ima više mogućnosti (metoda) da se iz mjernih podataka konstruira naponski dijagram. Ovdje će se pokazati jedna od njih, i to za naponski dijagram prema slici 9, jer je on složeniji, pa kad je poznat put njegova određivanja, onda je poznat i put za njegov jednostavniji oblik, tj. prema slici 7. Dalje, za prikaz odabranom metodom eliminira se i problem točnog mjerenja pada napona na četkicama, što je za univerzalni motor donekle specifično (o tome poslije), ali se zahtijeva da se mjerenjem ustanovi iznos glavnoga magnetskog toka Φ_{gl}. Taj se u načelu može, pri određenom teretu (struji), odrediti pomoću mjerenja napona posebnoga mjernog

svitka, kao na slici 10, smještenoga u stroj blizu krajeva polnih papuča tako da obuhvaća samo glavni magnetski tok. Iako se očekuje sinusni napon na mjernom svitku, dodatkom se filtra za više harmoničke članove dade izlučiti osnovni harmonik mjerenog napona, pa se iz njega dobiva osnovni harmonik toka.



Sl. 10. Smještaj pomoćnoga mjernog svitka za snimanje mjernog napona izazvanoga samo glavnim magnetskim tokom Φ_{gl}

Dakle, mjere se za određeni teret: brzina vrtnje n, glavni magnetski tok Φ_{gl}, naponi U, U_a i U_u, struja I i ulazna snaga P_1 ili kut faznog pomaka φ. Posebno se mjere radni otpori R_a i R_u. Tad se konstruira vektorski dijagram u fazama, kao na slici 11.

1. Crta se vektor struje I i za kut φ pomaknuti napon U (u mjerilu). Šestarom se crtaju njegove komponente U_a i U_u. Ta je faza prikazana slikom 11.a.

2. Na vrh vektora napona U_a dodaje se vektor IR_u pada napona na radnom otporu uzbude paralelno s vektorom struje I. Na vrhu vektora IR_u crta se pomoćni pravac, okomica na struju I (vidi sl. 11.b).

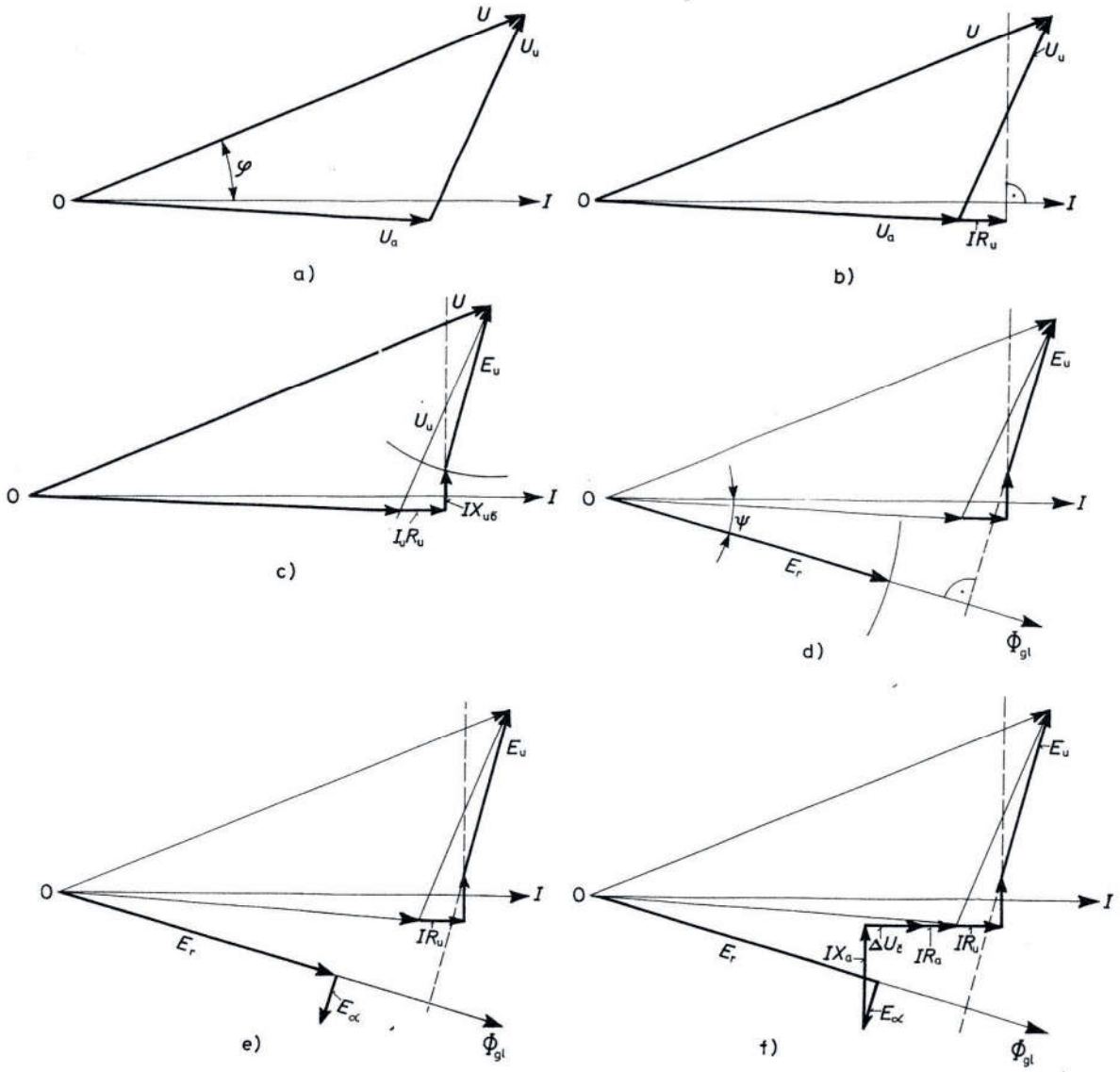
3. Izračunava se iz jednadžbe (12) iznos E_u i s tim se iznosom u mjerilu iz vrha vektora U pomoću šestara odsiječe točka na pomoćnom pravcu, koja je početak vektora E_u i vrh vektora $IX_{u\sigma}$ (vidi sl. 11.c).

4. Produžuje se smjer pravca vektora E_u (unatrag) i na taj se produžetak vuče okomica iz ishodišta. Smjer te okomice je smjer vektora glavnoga magnetskog toka Φ_{gl}, pa se konstrukcijom dobiva kut ψ između struje I i glavnoga magnetskog toka Φ_{gl} (vidi sl. 11.d). Također se u istom smjeru pruža iz ishodišta vektor napona rotacije E_r iznos kojeg se izračunava iz jednadžbe (11), što se također uočava na slici 11.d.

5. Iz vrha vektora E_r vuče se vektor E_α, izračunat pomoću jednadžbe (13). Njegov je smjer paralelan sa smjerom vektora E_u, ali mu je suprotan pri pomaku četkica protivno smislu vrtnje (usporedi sa sl. 11.e).

6. Prvo se iz vrha vektora E_α vuče okomica na smjer struje I. Zatim se produžuje (unatrag) pravac vektora IR_u. Udaljenost od vrha vektora E_α do presjecišta je iznos vektora IX_a, tj. induktivni pad napona na rasipnome induktivnom otporu armatornog namota. Udaljenost od vrha vektora IX_a do početka vektora IR_u je pad napona na armaturnom otporu R_a i na četkicama,

dakle $IR_a + \Delta U_č$. Nakon izračunavanja pada napona IR_a nacrtaju se vektori I_aR_a i $\Delta U_č$ i konstrukcija je gotova, kao na slici 11.f ili na slici 9.



Sl. 11. Konstrukcija vektorskog dijagrama napona prema slici 9, po fazama; objašnjenje uz tekst o postupku

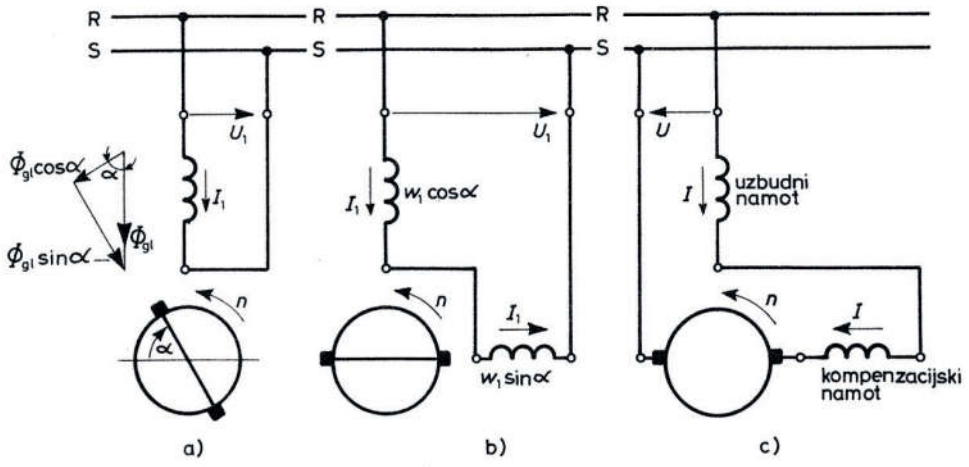
Jedna je od prednosti ovog načina konstrukcije vektorskog dijagrama u tome što se do samog završetka postupka ne koristi podatkom o padu napona $\Delta U_č$, koji može biti dosta promjenljiv. Naime, četkice za (posebno veće) univerzalne motore obično se posebno izrađuju i u principu je pad napona na njima veći nego kod ostalih kolektorskih motora; više od 3, pa čak i do 12 V [L 63], a uz to je za pouzdan podatak o njemu potrebno točnije i dugotrajnije mjerenje. Osim prikazanog načina analize univerzalnog motora (crtanjem vektorskog dijagrama) mogući su i drugi. Jedan od njih prikazan je u [L 63], za okolnosti kad se dijagram konstruira bez poznavanja glavnoga magnetskog toka $Φ_{gl}$ (nema mjerenja posebnim mjernim svitkom, vidi sl. 10), ali se raspolaže pouzdanom vrijednosti pada napona na četkicama $\Delta U_č$.

10.5. Repulzioni motor*

Praktičko značenje repulzionog motora danas je malo. Iz područja tkaonica, dizala i kranova potisnule su ga druge vrste motora i danas se još upotrebljavaju samo repulzioni motori malih snaga, i to u pogonima s jednofaznom mrežom i gdje su snage univerzalnih motora premalene, a jednofazni su asinhroni motori, zbog maloga prekretnog momenta i velike struje pokretanja (kratkospojne struje), nepoželjni. Nekad su se gradili do približno 100 kW snage. Ipak ih ne valja izostavljati iz knjige (udžbenika!) o kolektorskim strojevima jer, između ostaloga, proširuju naš uvid u fizikalna zbivanja u električkim strojevima. No zbog toga ćemo od priličnog broja vrsta obraditi samo jednostavni repulzioni motor, i to osnovne principe njegova djelovanja.

U usporedbi s jednofaznim kolektorskim serijskim strojem slične karakteristike, repulzioni motor ima važnu prednost u izuzetno jednostavnom podešavanju brzine vrtnje, ali mu je značajna mana otežano komutiranje.

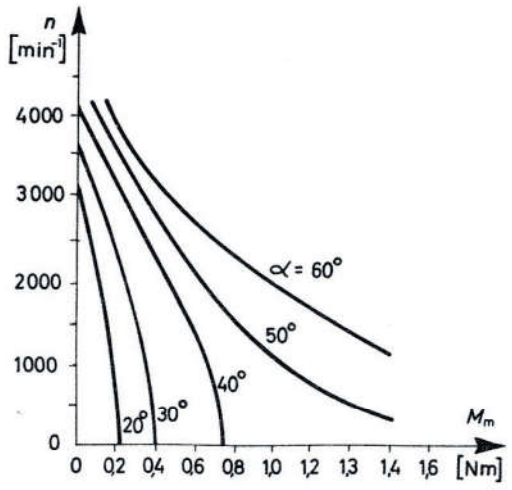
Repulzioni (jednostavni) motor sastoji se od jednofazno namotanog statora (primara), pri čemu namot može biti porazdijeljen u utore, ali i namotan na izražene polove, i kratkospojenoga kolektorskog namota rotora, jednakoga namotu istosmjernog stroja. Međutim, sistem četkica repulzionog motora dade se zakretati iz položaja neutralne zone i radni kut (električki) α iznosi približno od 55 do 75° (vidi sl. 1.a). Uz sinusno napajanje glavni magnetski tok uspostavljen statorskim namotom Φ_{gl} možemo zamisliti sastavljenim od dviju komponenata, one paralelne s osi četkica, $\Phi_{gl}\sin\alpha$, i one okomite na os četkice, $\Phi_{gl}\cos\alpha$. Okomita komponenta $\Phi_{gl}\cos\alpha$ djeluje jednako kao uzbudni glavni magnetski tok u jednofaznome serijskom kolektorskom motoru i možemo je zvati uzbudnim magnetskim tokom. U daljnjem razlaganju prikladno je promatrati statorsko magnetsko polje rastavljeno u dvije komponente, $\Phi_{gl}\cos\alpha$ i $\Phi_{gl}\sin\alpha$, kao da je statorski namot podijeljen u dvije fiktivne međusobno okomite komponente s brojem zavoja $w_1\cos\alpha$ i $w_1\sin\alpha$, pri čemu su četkice u neutralnoj zoni. Na slici 1.b vidi se takva predodžba i stroj tako građen imao bi u svemu zasigurno jednaka svojstva kao i onaj prema slici 1.a. Dakle, na slici 1.b nadomjesna je shema za stroj po slici 1.a. Na slici 1.c nacrtana je shema jednofaznoga serijskog kolektorskog stroja. Iz usporedbe dane na slikama 1.b i c razaznaje se razlika



Sl. 1. Repulzioni motor: a) spojna shema uz tumačenje djelovanja glavnoga magnetskog toka; b) nadomjesna spojna shema; c) usporedba s jednofaznim serijskim kolektorskim motorom

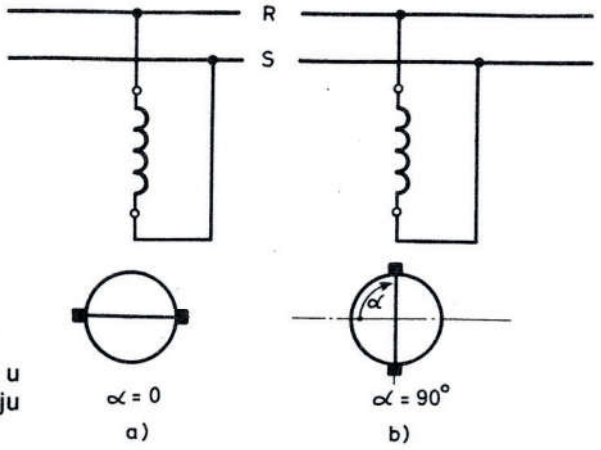
*Naziv repulzioni motor potječe od jednoga zastarjelog i napuštenog tumačenja njegove fizikalne slike.

između repulzionog i jednofaznoga serijskog kolektorskog motora. Serijskome je snaga privedena rotoru *galvanskim* putem (spojem), a repulzionom *transformatorskim* djelovanjem preko magnetskog polja. Namot s $w_1 \sin\alpha$ zavoja je primar, a armaturni je namot sekundar transformatora. Privedemo li nekom potrošaču snagu transformatorskim putem, znamo, prema teoriji transformatora, da se načelno prilike potrošača ne mijenjaju u usporedbi sa stanjem pri izravnom priključku na mrežu (isključujući utjecaj prenosnog omjera), tj. on se u principu ponaša kao da mu je ispred stezaljki priključen neki vrlo mali otpor. Sad postaje jasno zašto se repulzioni motor u pogonu mora ponašati približno jednako jednofaznome serijskom kolektorskom, i da je njegova vanjska karakteristika tipično serijskog karaktera. Na slici 2. prikazana je porodica karakteristika repulzionog motora. Vidi se jasno da se brzina vrtnje podešava promjenom *transformatorskog prenosnog omjera*, tj. promjenom kuta zakreta četkica – i to je već spomenuta prednost pred jednofaznim serijskim kolektorskim motorom.



Sl. 2. Porodica vanjskih karakteristika jednoga repulzionog motora male snage

Pri kutu zakreta $\alpha = 0$ (vidi sl. 3.a) cijeli je glavni magnetski tok uzbudni i stroj miruje u praznom hodu uz struju armature $I_a = 0$. To je položaj praznog hoda s momentom motora jednakim nuli. Međutim, ta se struja ne smije dopustiti dulje od koje sekunde jer je četkicama kratkospojeni svitak protjecan velikom strujom zbog visokog napona transformacije koji je u svitku (transformatorski) induciran cijelim glavnim magnetskim poljem Φ_{gl}. Pri kutu zakreta $\alpha = 90°$ (vidi sl.3.b) uzbudna komponenta nastala djelovanjem glavnoga magnetskog toka jednaka je nuli, a transformatorska je komponenta jednaka



Sl. 3. Položaj četkica repulzionog motora: a) u praznom hodu ($\alpha = 0°$); b) u kratkom spoju ($\alpha = 90°$)

cijelome magnetskom polju Φ_{gl}. To je kratki spoj (transformatora!) repulzionog motora u kojem teče vrlo velika struja, ali opet nema zakretnog momenta jer nema induciranog napona E_r. Čak i da vanjskim utjecajem vrtimo rotor u tom stanju, napon rotacije ostao bi jednak nuli jer armaturni namot ne ulančuje nikakav glavni magnetski tok.

Sad je zanimljivo pitanje kako motor pokrenuti u rad i kakav je općenito pokretni moment. Odgovor odmah dolazi krenemo li od općeg izraza (10.2–7.a) za moment jednofaznih kolektorskih strojeva:

$$M = \frac{1}{\omega} E_r I_a \cos\psi .$$

Napon rotacije E_r proporcionalan je brzini vrtnje i glavnome magnetskom toku, dakle struji koja ga stvara (uz nezasićen stroj), a glavni je magnetski tok pri nekom kutu četkica proporcionalan $\cos\alpha$. To znači da je:

$$E_r \therefore n I_1 \cos\alpha .$$

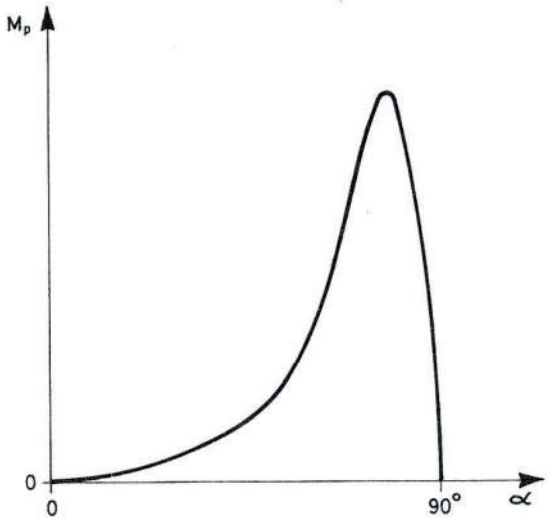
Transformatorski izazvana struja u armaturi I_a proporcionalna je $I_1 \sin\alpha$. Kut između struja I_1 i I_a približno je 180° (bio bi točno 180° u idealnom transformatoru!), pa je iznos $\cos\psi$ vrlo blizu 1. Na osnovi toga može se uz dovoljnu točnost pisati:

$$M \therefore I^2 \sin\alpha\cos\alpha$$

i nakon transformacije $2\sin\alpha\cos\alpha = \sin 2\alpha$ izraz će za moment biti:

$$M = k I_1^2 \sin 2\alpha, \qquad (1)$$

gdje je k konstanta koja sadrži sve proporcionalnosti. Već smo vidjeli da se u mirovanju u praznom hodu ($\alpha = 0$) struja mijenja od vrlo male vrijednosti (zbog transformatorskog djlelovanja kratkospojenog svitka), gotovo od nule, do velike struje kratkog spoja, ($\alpha = 90°$). Zato se i moment u mirovanju mijenja, prema jednadžbi (1), u skladu sa skicom na slici 4. Zbog toga se motor dade pokrenuti zakretom četkica iz praznog hoda ($\alpha = 0$), ili zakretom četkica iz kratkog spoja ($\alpha = 90$), a može se uz unaprijed podešeni kut α(prije priključka na mrežu) pokrenuti s dovoljno visokim početnim momentom. Taj treći način gotovo da najmanje napreže stroj. Kad se stroj zaleti, četkice se podese na ispravan pogonski kut. Iz razloženoga lako je zaključiti da repulzioni motor razvija vrlo visoki potezni moment (2–4 puta veći od nazivnoga) uz relativno niske struje pokretanja. Smjer vrtnje mijenja se zakretanjem četkica na suprotnu stranu. Sa slike 2 (crtane za stroj male

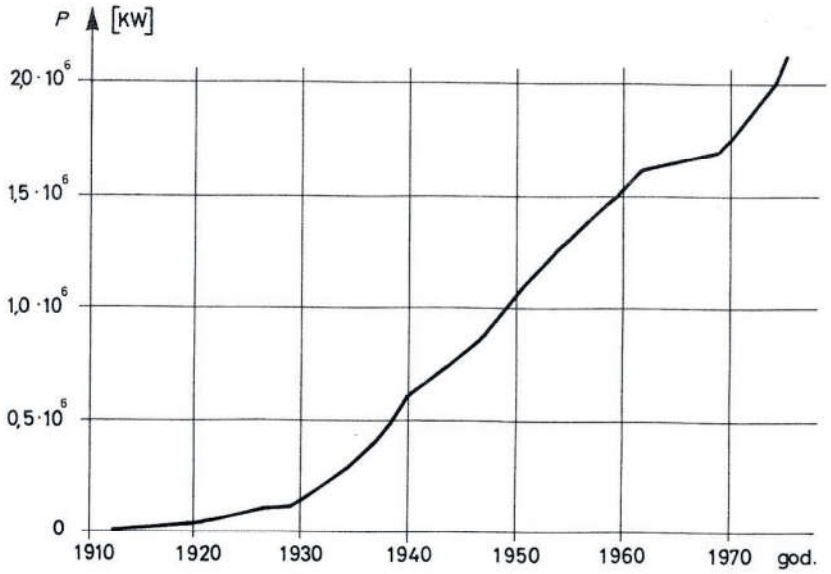


Sl. 4. Ovisnost pokretnog momenta repulzionog motora u stanju mirovanja o kutu zakreta četkica

snage) vidi se da nije pouzdan pogon s niskim opterećenjem i malom brzinom vrtnje, što zahtijeva mali kut pomaka četkica α. Većem je stroju to svojstvo još izraženije, pa je tu i opasnost pobjega kao i kod svakoga serijskog stroja. Iz tog je razloga radno područje određeno dijapazonom kuta α spomenutim u uvodnom dijelu izlaganja.

10.6. Trofazni kolektorski strojevi – općenito

Trofazni kolektorski motori razvili su se nakon jednofaznih. Poriv tome razvoju bila je želja da se dobiju motori koji će u relativno širokom rasponu brzina vrtnje raditi ekonomično i sa zadovoljavajućom vanjskom karakteristikom. Poznato je da asinhroni motori rade u vrlo bliskom okolišu sinhrone brzine vrtnje. Trofaznome asinhronom kolutnom motoru može se, doduše, podešavati brzina vrtnje na manju od sinhrone, ali će naizbježiva posljedica, uz omekšanje vanjske karakteristike, biti veliki gubitak energije i neekonomičan rad. Nužnost da se sva energija koja se privede sekundaru asinhronog motora kao električna energija pretvori u toplinu, pa da stroj uz, recimo, polovicu sinhrone brzine vrtnje izgubi približno od 55 % do 60 % privedene energije, bila je osnovni razlog razvoja trofaznih kolektorskih motora. Tome valja dodati mogućnost motorskog rada takvih strojeva i s nadsinhronim brzinama vrtnje, što je klasičnima izmjeničnim nemoguće, a u nekim okolnostima i mogućnost pogona s većim faktorom snage $\cos\varphi$ od onoga u asinhronog motora. Tako je dvadesetih i tridesetih godina, pa i nakon toga, razvijen veliki broj vrsta trofaznih kolektorskih motora. Oni su bili manje ili više kompliciranog sastava i vrlo skupe gradnje, ali su udovoljavali postavljenim zahtjevima, tj. nisu imali mane asinhronih motora. Razvoj poluvodičke tehnike i energetske elektronike, omogućivši priključak istosmjernih motora na izmejničnu mrežu, uzrokovao je nestanak mnogih vrsta trofaznih kolektorskih motora iz tehničke upotrebe. Ipak, zadržali su se oni jednostavniji, a



Sl. 1. Ukupna snaga isporučenih trofaznih kolektorskih motora firme ASEA od 1912. do danas

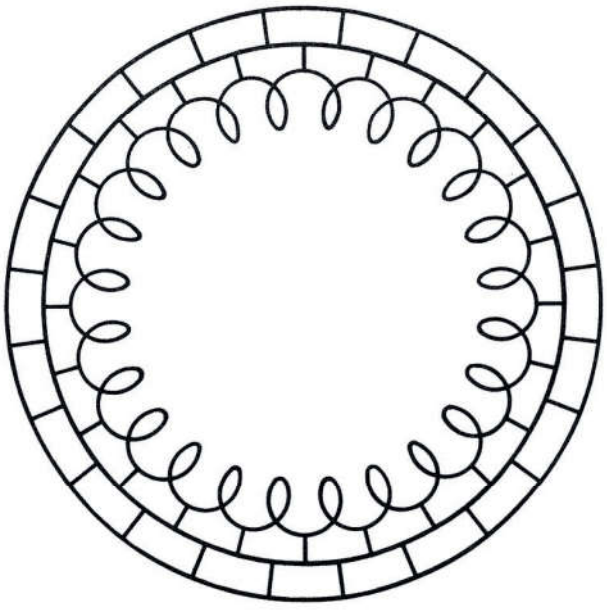
jedna njihova vrsta, trofazni poredni rotorski napajani motori, ne samo da se održala već doživljava i svoj daljnji tehnički razvoj. Uzrok je tome što je ona u određenim, manje ili više specifičnim vrstama elektromotornih pogona još uvijek optimalno rješenje. Tako se pojavljuju i nove, modernije konstrukcije takvih motora. Za ptvrdu toga prikazan je na slici 1, preuzetoj iz literature [L 61], dijagram proizvodnje takvih motora firme ASEA objavljen prilikom izlaska na tržište s novom serijom trofaznih porednih rotorski hranjenih motora. U daljnjem ćemo se izlaganju ograničiti, i to ukratko, na one vrste trofaznih kolektorskih motora koje se još susreću u pogonima, a nešto temeljitije samo na trofazni kolektorski poredno hranjeni motor.

10.6.1. Osnovni pristup i principi djelovanja

Dok su se jednofazni kolektorski motori razvili kao modifikacija istosmjernih strojeva, trofazni kolektorski motori, da tako kažemo, vuku svoje porijeklo iz trofaznih asinhronih motora. Zato se i njihova teorija najjednostavnije postavlja krene li se od asinhronih trofaznih motora. Vrlo grubo bi se moglo reći da su to asinhroni motori koji imaju jedan armaturni namot s kolektorom ili im je on dodan.

Primarni im je namot uvijek normalni trofazni namot, kao asinhronim strojevima. On ne mora biti uvijek na statoru. Kako ćemo poslije vidjeti, rotorski napajanome porednom, tzv. *Schrageovu* motoru primarni se namot nalazi na rotoru.

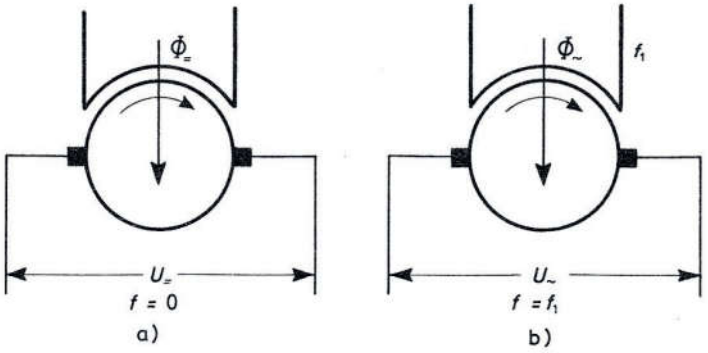
Kolektorski namot uvijek je na rotoru jer se kolektor mora okretati dok četkice stoje. S kolektorskim namotom već smo se upoznali u istosmjernim strojevima. Između armaturnog namota istosmjernog stroja i trofaznoga kolektorskog namota nema nikakve razlike; to je niz svitaka izvedenih na lamele i na određen način spojenih u zatvoren namot prema slici 2. U svakom se utoru



Sl. 2. Shematski prikaz namota armature istosmjernog stroja, a ujedno i kolektorskog namota trofaznoga kolektorskog stroja

inducira napon, koji možemo prikazati vektorom, a zbroj svih tih u seriju spojenih napona u zatvorenome kolektorskom namotu daje poligon svih vektora napona koji, uz pretpostavku beskonačnog broja utora, oblikuje kružnicu. Kad se takav kolektorski namot okreće s rotorom u nepomičnome magnetskom polju, tj. u magnetskom polju statora koje je uzbuđeno istosmjernom strujom, u kolektorskom se namotu inducira izmjenični napon frekvencije $f = pn/60$, a u neutralnoj se zoni na dijametralno postavljenim četkicama dobiva istosmjerni napon u veličini promjera poligona vektora induciranih napona (vidi sl.3.a). Pri tome je s n označena brzina vrtnje, a s p broj pari polova stroja.

Kad stator uzbudimo izmjeničnom strujom frekvencije f_1, dobivamo na četkicama, pri okretanju rotora bilo kojom brzinom vrtnje, opet napon frekvencije f_1 (vidi sl. 3. b).



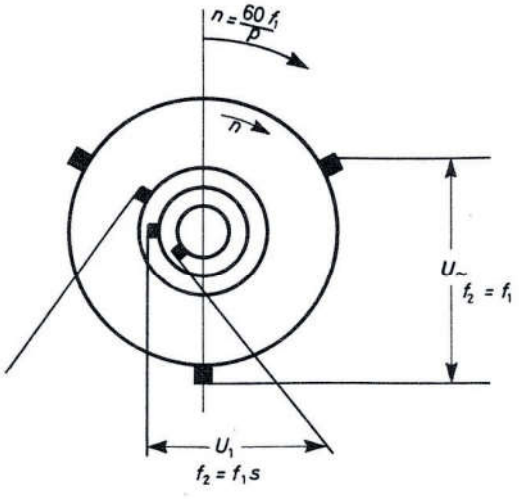
Sl. 3. Objašnjenje o frekvencijama primara i sekundara: a) istosmjernog stroja; b) izmjeničnoga jednofaznog kolektorskog stroja

Frekvencija napona između četkica na kolektoru uvijek je jednaka frekvenciji statorskih namota, i to svim vrstama kolektorskih strojeva, jer je upravo razloženo zapravo primjer za jednofazne kolektorske strojeve, ali u cijelosti vrijedi i za trofazne.

Kad stator stroja uzbudimo trofazno umjesto jednofazno, nastaje okretno magnetsko polje. Kako nam je poznato iz teorije asinhronih strojeva, tada će se u rotorskom namotu, pa naravno i u kolektorskome, inducirati izmjenični napon s frekvencijom klizanja (vidi sl. 4):

$$f_2 = sf_1, \tag{1}$$

pri čemu je s klizanje.



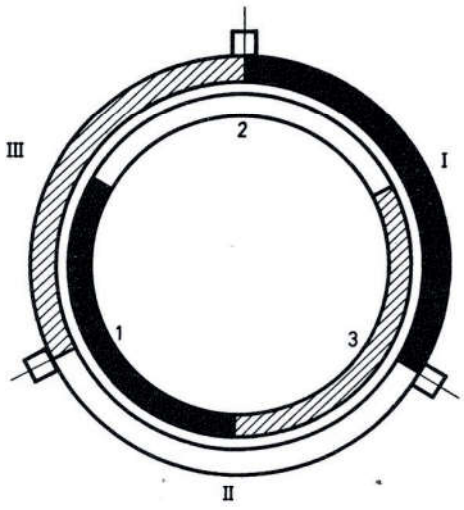
Sl. 4. Objašnjenje o frekvencijama primara i sekundara trofaznoga kolektorskog stroja

Ako tad iz rotora oduzimamo napon preko *kliznih koluta*, dobivamo (preko četkica) na kliznim kolutima izmjenični napon frekvencije klizanja f_2. Međutim, oduzimamo li iz rotora, odnosno iz kolektorskog namota, napon preko četkica na *kolektoru*, dobit ćemo napon primarne frekvencije f_1.

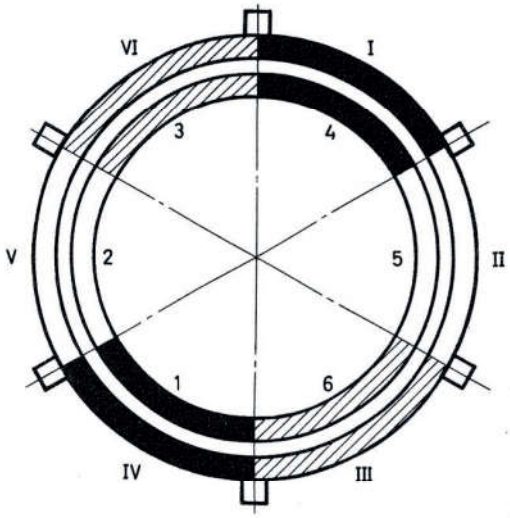
U principu je to prikazano na slici 4. Razložena je zapravo vrlo važna spoznaja da kolektor služi kao pretvarač frekvencije, i to one u armaturnome namotu u frekvenciju mirnog (nepomičnog) dijela stroja, ili obratno. Tako se u principu dadu galvanski spajati četkice kolektora s namotima u mirnom dijelu stroja, i tako se mogu ostvariti sva rješenja (vrste) trofaznih kolektorskih strojeva, o kojima će biti riječi u kasnijem izlaganju.

Trofazni kolektorski motori obično se tako grade da su im četkice pomične i pojedinačno i grupno, tj. cijeli sistem četkica.

Ako dvopolnom stroju postavimo na kolektor tri četkice pod kutom od 120°, dobivamo na njima trofazni napon. U kolektorskom namotu nastaje trofazna struja između četkica, kao da imamo spoj normalnoga izmjeničnog namota u trokut. Budući da je kolektorski namot uvijek dvoslojan, na obodu ćemo rotora dobiti strujni oblog triju međufaznih struja prema slici 5. No može se u principu na kolektor postaviti i šest četkica kao na slici 6., i to će poslužiti na dva načina. Prvi je da se po dvije četkice spajaju na jednu fazu mirnoga izmjeničnog namota; jedna na početak, a druga na završetak. Takav se spoj upotrebljava na rotorski napajanome trofaznom kolektorskom porednom motoru. Druga je mogućnost kad se spoj između kolektora i mirnog namota izvede preko transformatora koji na primaru (sekundaru) ima šest faza, a na sekundaru (primaru) tri faze. Pri tome se osim boljeg faktora namota nego u trofaznom spoju postiže i mogućnost gradnje kraćeg kolektora jer se jedan red četkica u trofaznom spoju pretvori u dva reda četkica u šesterofaznom . Takav se spoj osobito upotrebljava kad je mirni dio stroja izveden s visokonaponskim namotom, pa se spoj s kolektorom (uvijek niskonaponski!) ostvaruje preko međutransformatora.



Sl. 5. Raspodjela dvopolnoga kolektorskog namota u tri fazna namota uz pomoć četkica



Sl. 6. Raspodjela dvopolnoga kolektorskog namota u šest faznih namota pomoću šest redova četkica (dijametralni namot)

Veličina napona koji se inducira u kolektorskom namotu ovisna je, kao i asinhronom motoru, o razlici brzine vrtnje okretnog polja i brzine vrtnje rotora, tj. o klizanju:

$$E_2 = sE_{20}. \tag{2}$$

Naponi koje dobivamo iz rotora preko kliznih koluta ili preko kolektora ne razlikuju se međusobno po svojoj efektivnoj vrijednosti, već samo u frekvenciji, kako smo to već prije ustanovili.

Utvrdili smo za asinhrone strojeve da se snaga okretnog polja P_{op}, koja iz statora prelazi zračnim rasporom u rotor, mora nužno u rotoru razdijeliti na električnu snagu gubitaka i na mehaničku snagu na osovini u omjeru:

$$\frac{P_{el}}{P_m} = \frac{sP_{op}}{(1-s)P_{op}} = \frac{s}{1-s}. \tag{3}$$

Nedostaci podešavanja brzine vrtnje asinhronim strojevima sastoje se u tome da povećavanjem klizanja raste električna snaga klizanja u rotoru P_{el}, koja se zbog razlike u frekvenciji napona mreže i napona rotora, prema jednadžbi (1), ne može vraćati u mrežu, nego se mora beskorisno uništavati u dodatnim otporima, koje ukapčamo u rotorski krug. Upotrebom kolektorskog namota možemo preko kolektora dobivati napon rotora iznosa proporcionalnog klizanju, ali s frekvencijom mreže, pa je tako omogućeno da snagu P_{el}, tj. snagu koja se asinhronom motoru beskorisno troši na regulacijskim otporima, vratimo u mrežu.

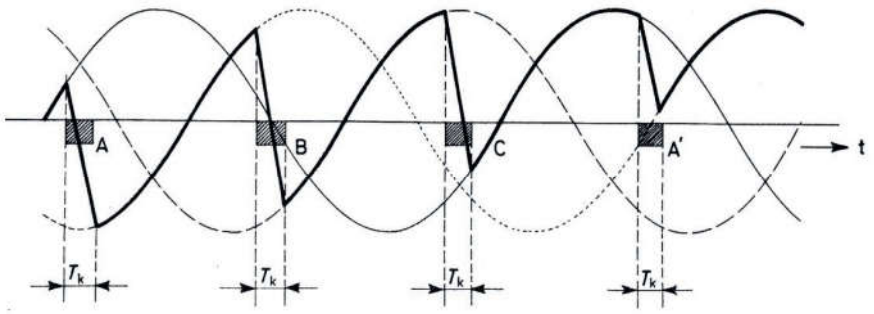
Preko kolektora možemo u sekundarni krug dodavati još i snagu iz mreže i time postići negativno klizanje, odnosno podešavanje brzine vrtnje i iznad sinhrone.

Zbog svega toga trofazni je kolektorski stroj u principu asinhroni stroj koji ima kolektorski namot, a kolektor mu služi kao pretvarač frekvencije, čime je obrazloženo uvodno tumačenje o osnovnom pristupu uz pomoć teorije asinhronog stroja.

10.6.2. Komutacija trofaznih kolektorskih strojeva

Kod trofaznih kolektorskih strojeva posebno je težak problem komutacije. Brzina vrtnje im se podešava pomakom četkica, a pomoćni im se polovi, kad bi ih i bilo, ne bi mogli pomicati. Zato trofazni kolektorski motori i nemaju pomoćnih polova, pa se problem komutacije rješava prikladnim dimenzioniranjem stroja. Mora se uzeti veliki broj lamela na kolektoru, tj. mali broj zavoja između lamela, i tako sniziti napon komutacije na snošljivu veličinu. Ipak moramo računati na to da će na kolektoru i pri manjem, a pogotovu pri nazivnom opterećenju nastati iskrenje, ali ono smije biti samo tolikog intenziteta pri kojem se neće ni u trajnom radu ugroziti kolektor. Zato postavljamo zahtjev da to iskrenje kolektor mora podnositi u trajnom radu.

Zbog teškoća komutiranja postaje jasna činjenica da se trofazni motori ne mogu graditi za toliko velike snage kao jednofazni serijski (željeznički) motor, pa im je gornja granica snage negdje oko 200 kW, i to kad se poduzmu sve mjere za olakšanje komutacije. Pogleda li se na sliku 5, lako se vidi da se komutacija uvijek odvija između dviju susjednih faza stroja. To znači da svitak prolaskom kroz komutacijsku zonu prelazi iz namota prve faze u namot druge faze, ili iz namota druge faze u namot treće faze, ili iz namota treće faze u namot prve faze itd.



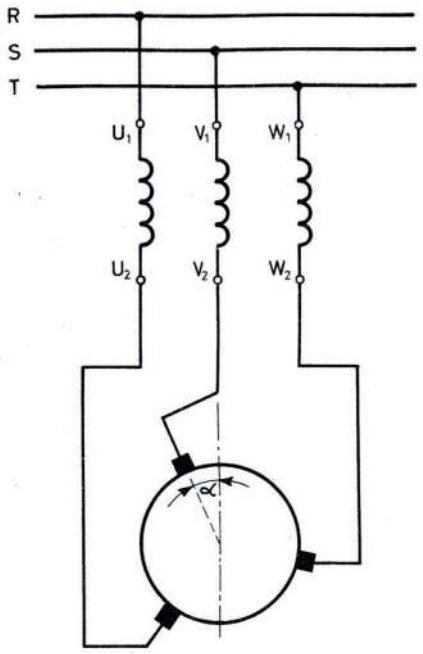
Sl. 7. Vremenski tok struje u jednom svitku trofaznoga kolektorskog namota

Struju u jednom svitku prikazuje na slici 7. debelo izvučena linija. Iz toga se vidi da je veličina promjene struje prilikom komutacije različita, i da valja, kad je riječ o težini komutacije, razmotriti stanje pri najvećoj promjeni veličine struje, koja sigurno nastupa u određenim trenucima rada stroja. Toj najvećoj promjeni proporcionalna je, dakako, i najveća vrijednost napona samoindukcije e_s u svitku u komutaciji. Utjecaj vremenske promjene glavnoga magnetskog toka Φ_{gl} u komutaciji trofaznoga kolektorskog stroja nešto se razlikuje od onoga za jednofazni kolektorski stroj. Dok je tamo napon transformacije e_t u svitku koji komutira izazivalo izmjenično magnetsko polje, u trofaznome kolektorskom stroju sličan napon uzrokuje okretno magnetsko polje, pa bi se on mogao i drukčije nazvati. No bez obzira na to, zadržimo uvriježeni naziv (i oznaku) napon transformacije, samo ga fizikalno pobliže obrazložimo. On je sad očito proporcionalan razlici mehaničke brzine vrtnje stroja (svitka!) i sinhrone brzine vrtnje, pa ga napr. uz sinhronu brzinu vrtnje i nema! I za trofazni kolektorski stroj on je od bitne važnosti kao i za jednofazni, i odlučujući je pri dimenzioniranju stroja. Za trofazni kolektorski stroj taj je napon u fazi s prolaskom maksimuma okretnog polja kroz promatranu os četkica (neutralnu zonu), pa je fazno drukčiji i za različite položaje četkica. Za položaje četkica uobičajene u pogonu, na temelju svega što je napisano, naponi su samoindukcije e_s i transformacije e_t pomaknuti u fazi za $60-90°$.

10.7. Serijski trofazni kolektorski motor

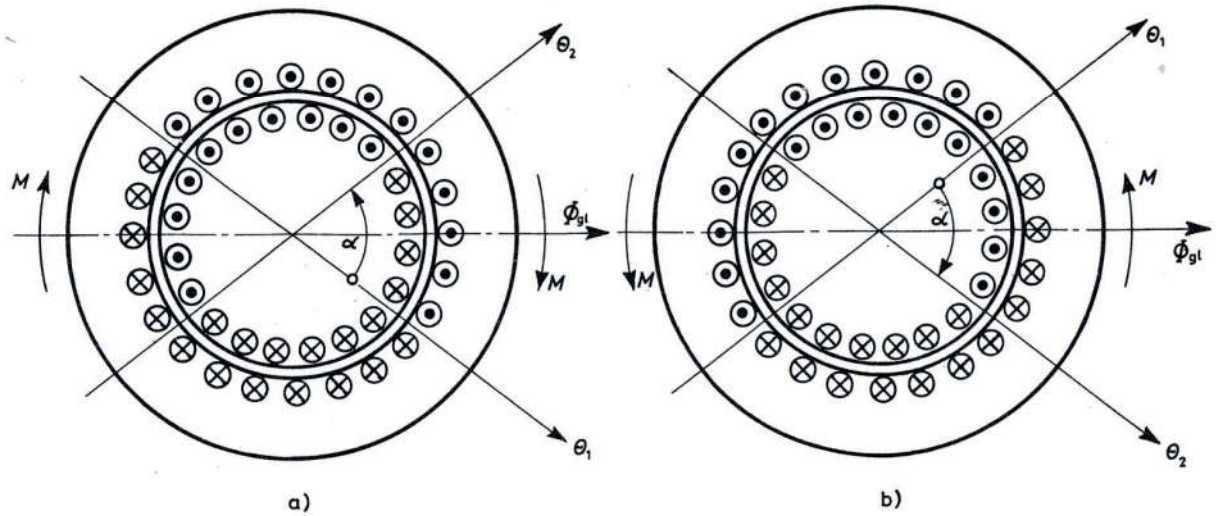
U prethodnom odjeljku već smo rekli da je serijski trofazni kolektorski stroj od malog značenja za današnje stanje tehnike. Zato ćemo se ograničiti na prikaz njegova osnovnog djelovanja na osnovi nešto pojednostavnjene fizikalne slike.

U asinhronome kolutnom motoru ne mogu se u seriju spajati faze primara i sekundara zbog različitih frekvencija napona i struja u njihovim namotima. Kolektorski stroj nema razlike u frekvencijama u primaru i na četkicama sekundara, kako smo to ustanovili u prethodnom potpoglavlju, pa ga spajamo kao na slici 1. i tako ostvarujemo serijski trofazni kolektorski stroj.



Sl. 1. Principna shema spoja trofaznoga kolektorskog serijskog motora i spoj na mrežu

Stator je jednake izvedbe kao u asinhronog motora, a rotor ima kolektorski namot s kolektorom, na kojem su sve četkice zajedno pomične u jednom ili drugom smjeru za kut α, kako je prikazano u slici 1. U položaju četkica $\alpha = 0°$ poklapaju se osi istoimenih faza statora i rotora, pa oba namota sudjeluju u stvaranju okretnog magnetskog polja, u omjeru brojeva njihovih efektivnih zavoja. Budući da je u tom primjeru okretnome magnetskom polju rotora brzina vrtnje jednaka kao i okretnome magnetskom polju statora, nema



Sl. 2. Raspored statorskog i rotorskog protjecanja trofaznoga serijskog kolektorskog motora pri nekom kutu zakreta četkica α: a) pomak za vrtnju udesno; b) pomak za vrtnju ulijevo

okretnog momenta pa rotor stoji, a motor uzima iz mreže struju magnetiziranja. Ta je struja manja od struje magnetiziranja asinhronog motora jer zavoji statora i rotora zajedno sudjeluju u magnetiziranju stroja. Kad četkice pomaknemo za 180°, protjecanje rotora djeluju suprotno protjecanju statora, pa dobivamo veliku struju kratkog spoja, a okretnog momenta nema jer je iznos glavnoga magnetskog toka jednak nuli.

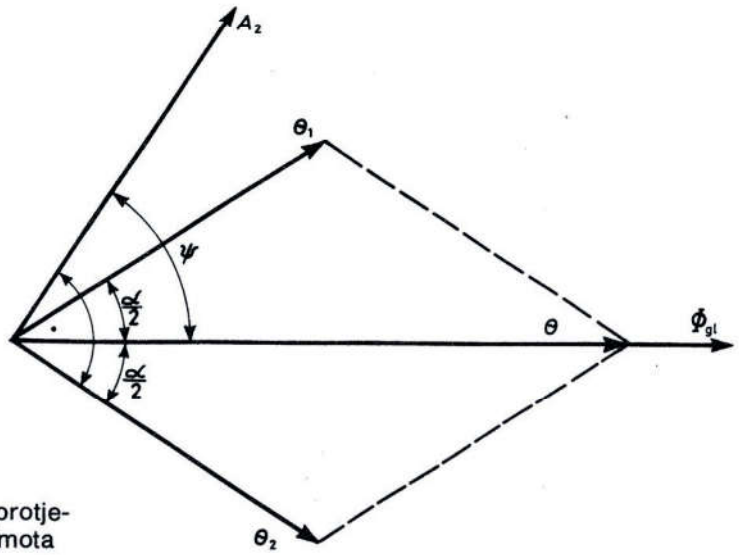
U svakome drugom položaju četkica nastaje rezultirajuće okretno magnetsko polje uzbuđeno protjecanja i statora i rotora. Ono sa strujnim oblogom rotora stvara okretni moment u smjeru suprotnome pomaku četkica, kako to vidimo u slici 2. Pomakom četkica u jednom ili drugom smjeru uspostavlja se okretanje rotora ili u smjeru okretnog polja ili u njemu suprotnom smjeru.

Kao i asinhronom motoru, okretni je moment vremenski konstantan uz konstantnu struju, a iz općeg izraza za okretni moment (L 50) možemo ga napisati kao $M_m = k\Phi_{gl}A_2\cos\psi$, pri čemu je A_2 strujni oblog rotora. Zamijenimo li strujni oblog protjecanjem rotora Θ_2, izlazi:

$$M_m = c\Phi_{gl}\Theta_2\cos\psi. \tag{1}$$

Tu je ψ kut između simetrale rezultirajućega okretnog poja i simetrale rezultirajućega okretnog strujnog obloga rotora, kako je to prikazano na slici 3. Iz iste slike izračunava se izraz za moment motora. Budući da je $\psi = 90° - \frac{\alpha}{2}$, to je $\cos\psi = \sin\frac{\alpha}{2}$, pa se za moment može pisati:

$$M_m = c\Phi_{gl}\Theta_2\sin\frac{\alpha}{2}. \tag{2}$$



Sl. 3. Prostorni odnosi među vektorima protjecanja i strujnim oblogom rotorskog namota

Sa slike 3. zaključujemo da je Φ_{gl} proporcionalno ukupnom protjecanju, tj. vektorskom zbroju $\overline{\Theta}_1 + \overline{\Theta}_2$, što je opet proporcionalno sa $\Theta_2\cos\frac{\alpha}{2}$. Prema tome ćemo napisati za moment proporcionalnost:

$$M_m \therefore \Theta_2^2\sin\frac{\alpha}{2}\cos\frac{\alpha}{2} \therefore I^2\sin\alpha, \tag{3}$$

tj. moment je proporcionalan sinusu kuta zakreta četkica i kvadratu struje, a to drugo jasno upućuje na serijski karakter stroja. Iz relacije (3) možemo izraziti pokretni moment

motora. No, budući da nam je stalo u osnovi do fizikalne slike, pojednostavnimo zadatak nekim pretpostavkama. Kao prvo, pretpostavimo da je prenosni omjer efektivnih brojeva zavoja primara i sekundara jednak 1:

$$\frac{w_1 f_{n1}}{w_2 f_{n2}} = 1,$$

i kao drugo, zanemarimo u računu struje kratkog spoja utjecaj omskih otpora što unosi neznatnu pogrešku i gotovo nimalo ne kvari fizikalnu sliku. Ukupni induktivni otpor stroja, statora i rotora bit će:

$$X = X_\sigma + 2X_u(1 + \cos\alpha). \tag{4}$$

U toj jednadžbi X_σ izražava induktivni otpor zbog svih rasipanja statora i rotora, a X_u induktivni otpor (uzevši u obzir samo glavni tok) primarnog namota. Budući da smo pretpostavili da je prenosni omjer jednak 1, to primarni induktivni otpor vrijedi i za sekundarnu stranu, s tim što s $\cos\alpha$ uzimamo u obzir pomak između osi primarnog i sekundarnog namota.

Tad je struja pokretanja:

$$I_{pok} = \frac{U}{X}. \tag{5}$$

Ako postavimo da je σ omjer rasipnih induktiviteta prema glavnom $\frac{X_\sigma}{X_u} = \sigma$, dobivamo:

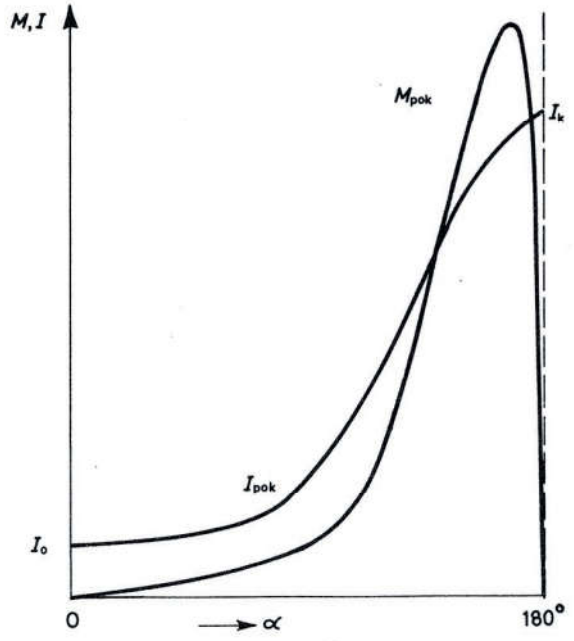
$$I_{pok} = \frac{U}{[\sigma + 2(1 + \cos\alpha)]X_u}, \tag{6}$$

odnosno uz uvrštenje izraza (6) u (3):

$$M_{pok} = \frac{k_p U^2 \sin\alpha}{[\sigma + 2(1 + \cos\alpha)]^2 X_u^2}, \tag{7}$$

pri čemu je k_p konstanta proporcionalnosti.

Na slici 4. dijagram je pokretnog momenta M_{pok} i struje pokretanja I_{pok} ovisno o kutu α.



Sl. 4. Ovisnost struje pokretanja i momenta pokretanja o kutu položaja četkica

Okretni moment stroja ovisi o kutu zakreta četkica α i o brzini vrtnje kojom se rotor okreće. Pokušajmo radije razvijati ovisnost o klizanju s, a ne o brzini vrtnje n, jer trofazne kolektorske motore promatramo na sličan način kao asinhrone.

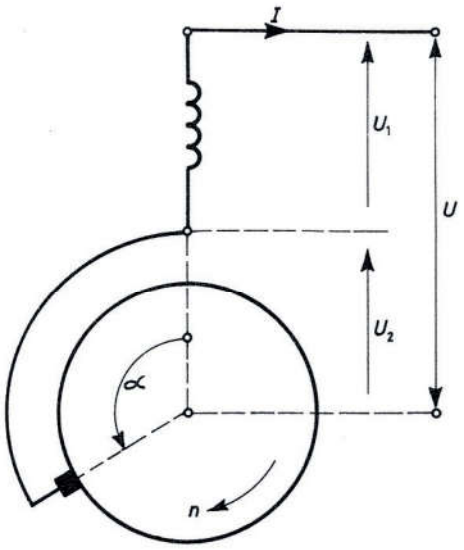
Već smo prije istaknuli proporcionalnost $\Phi_{gl} \therefore \Theta_2 \cos\frac{\alpha}{2}$. Uvrstimo li odatle Θ_2 u jednadžbu (2), bit će:

$$M_m = k_1 \Phi_{gl}^2 \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}, \tag{8}$$

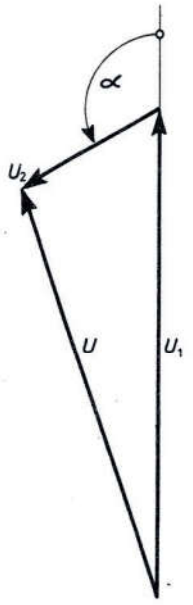
a tu je k_1 konstanta (svih) proporcionalnosti.

Zamislimo, dalje, dvopolni stroj u pogonu s nekim velikim kutom zakreta četkice α, kao na slici 5. Narinuti napon U podijelit će se (vektorski) na napon primara U_1 i napon sekundara U_2, kao na slici 6. U primaru će se inducirati napon E_1. Ako još zanemarimo primarni rasipni otpor (radni smo zanemarili već prije), onda je narinuti napon jednak induciranome, a njemu je proporcionalan i glavni magnetski tok:

$$U_1 = E_1 = k_2 \Phi_{gl}, \tag{9}$$



Sl. 5. Prikaz osnovnog djelovanja napona trofaznoga serijskog kolektorskog motora nacrtan jednopolnom shemom



Sl. 6. Vektorski dijagram napona prema shemi na slici 5.

Pri tome je k_2 konstanta proporcionalnosti između induciranog napona i glavnoga magnetskog toka. Zamijenimo li Φ_{gl} u jednadžbi (8) onim što izlazi prema izrazu (9), dobivamo:

$$M_m = k_3 U_1^2 \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}. \tag{10}$$

Budući da je mrežni napon U sastavljen od napona U_1 i U_2, a napon rotora U_2 iznosi sU_1, jednako kao i asinhronom motoru, to uz pomoć trokuta vektora napona sa slike 6. izlazi:

$$U^2 = U_1^2 + 2sU_1^2 \cos\alpha + (sU_1)^2,$$

odakle ćemo izraziti napon primara:

$$U_1^2 = \frac{U^2}{1 + s^2 + 2s\cos\alpha}. \tag{11}$$

Kad taj napon uvrstimo u jednadžbu (10), rezultat je opći izraz za moment motora:

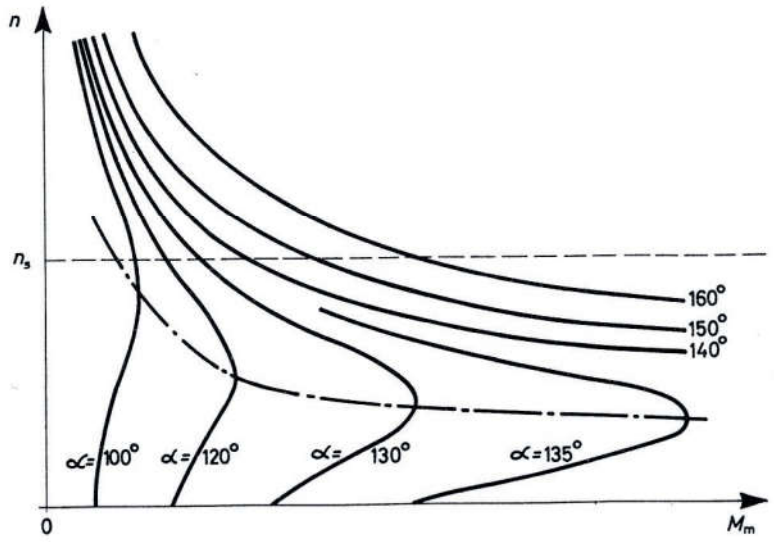
$$M_m = \frac{k_3 U^2 \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}}{1 + s^2 + 2s\cos\alpha}. \tag{12}$$

U principu je porodica karakteristika momenta motora za različite položaje (kutove α od 100 do 160°) četkica prikazana slikom 7. Zanimljivo je pronaći prekretni (maksimalni) moment motora i pokušati moment motora dovesti u ovisnost o njemu, kako je to uobičajeno za asinhroni motor (Klossova jednadžba). Derivira li se parcijalno nazivnik jednadžbe (12) po klizanju i izjednači s nulom, a zatim potraži njegov minimum (tad je moment motoru najveći), bit će:

$$2s + 2\cos\alpha = 0,$$

pa budući da je klizanje s u tom izrazu prekretno klizanje s_p, to je $s_p = -\cos\alpha$, i kad se to uvrsti u jednadžbu (12), nakon sređivanja nastaje iznos za prekretni moment:

$$M_p = \frac{k_3 U^2 \operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}}{\sin^2\alpha}. \tag{13}$$

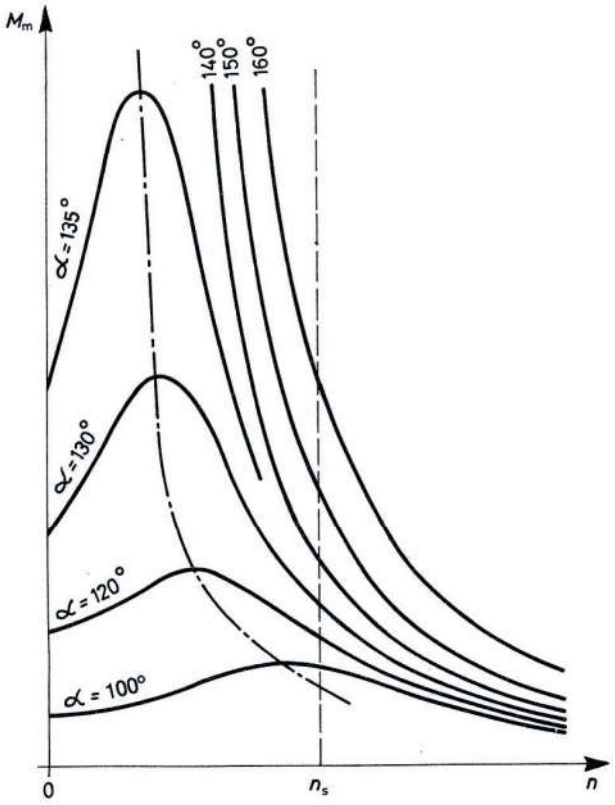


Sl. 7. Porodica vanjskih karakteristika $n(M_m)$ trofaznoga serijskog kolektorskog motora

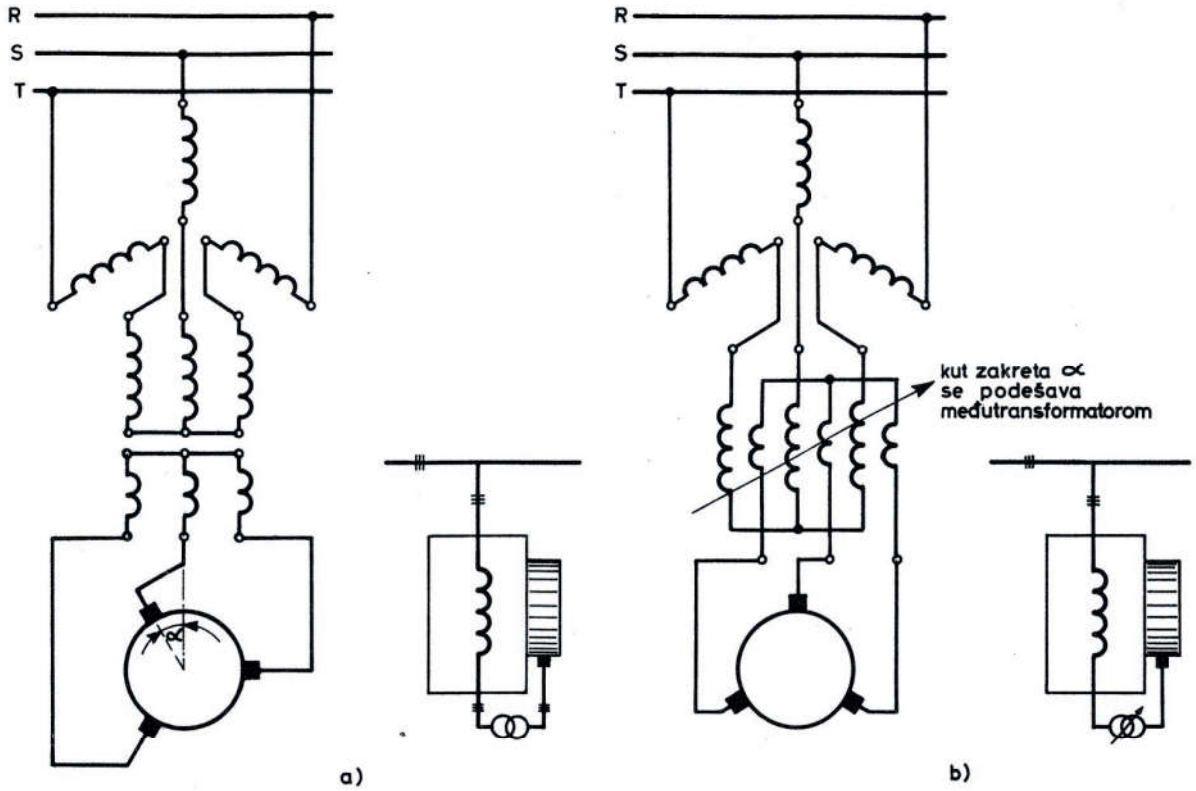
Nakon dijeljenja izraza (12) s (13) dobivamo opći izraz:

$$\frac{M_m}{M_p} = \frac{\sin^2\alpha}{1 + s^2 + 2s\cos\alpha}, \tag{14}$$

kojim je izraz za opći moment motora M_m povezan s prekretnim momentom M_p, što se željelo učiniti. Prekrenemo li sliku (7) iz koordinatnog sustava n (M_m) u obrnuti, rezultat je $M_m(n)$, u kojem obično prikazujemo asinhroni motor (sl. 8).U dijelu karakteristika iznad prekretnog klizanja, tj. u području $s > s_p$, lijevo od prekretnog momenta, nalazi se labilno područje u kojem je u principu nemoguć stabilan pogon. Kad je kut $\alpha \leqq 90°$, labilno se područje nalazi sve do sinhrone brzine vrtnje, pa i iznad nje, i zato se tako mali kut α ne upotrebljava za stacionarni pogon.



Sl. 8. Porodica vanjskih karakteristika $M_m(n)$ trofaznoga serijskog kolektorskog motora



Sl. 9. Spoj sekundara trofaznoga serijskog kolektorskog motora na primar pomoću: a) običnog transformatora; b) regulacijskog (zakretnog) transformatora

O izgradnji samog stroja može se ukratko reći ovo: Iako je u principu izravan serijski spoj statora i rotora osnovni, ipak se gotovo uvijek između njih umeće transformator ili zakretni transformator prema slici 9.a, odnosno 9.b. Kad se uzme zakretni transformator, četkice su postavljene čvrsto, nepomično, jer se vektor sekundarnog napona zakreće zakretnim transformatorom. Prednosti su međutransformatora ove:

a) za svaki tip stroja omogućena je gradnja jedinstvenog rotora za napon koji najviše pogoduje komutaciji, bez obzira na mrežni napon; zato primarni namot stroja velikih motora može biti građen i za visoki napon;

b) umjesto tri reda četkica po paru polova prema slici 10.6–5. može se upotrijebiti šest redova četkica prema slici 10.6–6, jer se faze sekundarnog namota transformatora dadu 6-fazno spajati na kolektor i time se dobiva kraći kolektor;

c) sa zasićenjem međutransformatora može se suziti labilno područje karakteristike momenta.

Opravdano je zaključno istaknuti da se brzinom vrtnje serijskoga trofaznog kolektorskog motora upravlja samo zakretanjem kuta četkica, a tako se on i pokreće.

10.8. Poredni trofazni kolektorski motori

Vrlo mekana vanjska karakteristika serijskoga trofaznog kolektorskog motora ne odgovara pogonu mnogih radnih mehanizama. Dalje, pobjeg pri rasterećenju vrlo mu je neugodna pogonska osobina, pa su to glavni razlozi da se kod trofaznih kolektorskih motora sve više upotrebljava poredni spoj motora. Jednako kao kod istosmjernih strojeva, pod porednim spojem razumijevamo onaj spoj u kojem se stator i rotor svaki za sebe posebno hrane iz mreže pa, prema tome, rotorskim namotom ne teče ista struja kao statorskim, što je bilo u serijskom spoju. Budući da trofazni poredni kolektorski stroj ima i danas prilično značenje u tehnici i upotrebu u pogonima, posebno njegova rotorski napajana izvedba, to ćemo se nešto detaljnije pozabaviti njegovom teorijom i vanjskim karakteristikama.

10.8.1. Osnovna teorija

Trofazni poredni kolektorski motor u svojoj je biti još bliži asinhronome motoru od serijskoga. Zato mu cijelu teoriju i način gledanja na njega možemo zasnovati na teoriji asinhronog motora, kojem je u sekundar dodan galvanskim putem neki regulacijski napon U_r frekvencije jednake onoj što upravo vlada u sekundaru. Pri tome se dvije glavne vrste porednoga trofaznog kolektorskog motora, ona statorski napajanoga i ona rotorski napajanoga, uopće ne razlikuju u osnovnoj fizikalnoj slici, pa i karakteristikama. Razlike su u komutaciji. Regulacijski napon U_r dodaje se u sekundar preko kolektora. Spojevi su razni i ovog trena uopće nisu bitni, pa su nešto kasnije prikazani slikama (vidi sl. od 5. do 9).

Dakle, u sekundarnom namotu struja (i trofaznoga kolektorskog i asinhronoga) inducira se u radu napon proporcionalan klizanju:

$$E_2 = sE_{20} = sE_1 \frac{w_2}{w_1} \frac{f_{n2}}{f_{n1}}, \tag{1}$$

pri čemu su E_{20} i E_1 inducirani naponi sekundara (u mirovanju) i primara, s je klizanje motora, w_1 i w_2 su brojevi zavoja faza primara i sekundara, a f_{n1} i f_{n2} faktori namota primarnog i sekundarnog namota.

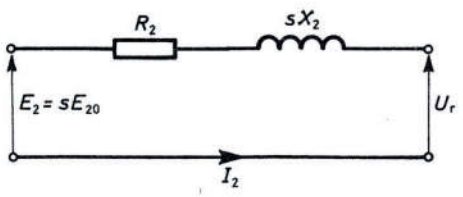
U sekundaru vlada frekvencija:

$$f_2 = sf_1, \tag{2}$$

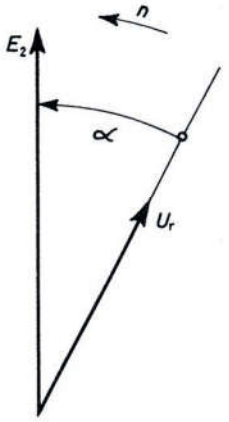
a tu je f_1 frekvencija primara (mreže). Uz pomoć kolektora uključujemo dodatni regulacijski napon U_r, koji u sekundarnom krugu ima frekvenciju f_2, pa nadomjesna shema jedne faze sekundara izgleda kao na slici 1, gdje je s R_2 označen radni, a sa sX_2 rasipni induktivni otpor faze sekundara. Budući da općenito regulacijski napon U_r može biti po volji visokog iznosa i slobodno odabranog kuta α prema sekundarnome naponu E_2 induciranom okretnim poljem potrebno je (dogovor!) odrediti smjer tog kuta, njegov predznak. Dogovorno ćemo smatrati kut α pozitivnim kad regulacijski napon zaostaje za induciranim naponom u rotoru (vidi sl. 2). Visinu regulacijskog napona kvantitativno procjenjujemo usporedimo li je s naponom sekundara u mirovanju stroja:

$$o = \frac{U_r}{E_{20}}, \tag{3}$$

pa se tim omjerom o koristimo u daljnjem razmatranju.



Sl. 1. Nadomjesna shema faze sekundarnoga strujnog kruga trofaznoga porednog kolektorskog motora



Sl. 2. Uz objašnjenje o dogovorenom predznaku kuta pomaka četkice α

Zatim valja provjeriti kako djeluje dodatni regulacijski napon na strujni krug sekundara neopterećenog motora, dakle u praznom hodu. Učinimo nekoliko opažanja:

1. Neka kut α bude jednak nuli i regulacijski omjer o također jednak nuli. Budući da prema slici 1. nema galvanski dodanog napona u sekundaru, stroj se ponaša kao obični asinhroni, brzina je vrtnje u praznom hodu sinhrona $n = n_s$, a klizanje u praznom hodu jednako o; $s_o = 0$, gdje sa s_o označujemo klizanje u praznom hodu.

2. Neka kut α bude jednak nuli, a regulacijski napon jednak induciranome u praznom hodu; $U_r = E_{20}$, tj. $o = 1$. Sa slike 1. vidi se da E_2 i U_r drže međusobno ravnotežu, pa ne može poteći nikakva struja, ne može biti momenta vrtnje, i stroj stoji u praznom hodu; $n = 0$, a $s_o = 1 = o$.

3. Neka bude $\alpha = 0$, $U_r = 0{,}5E_{20}$ i $o = 0{,}5$. Stroj će se u praznom hodu vrtjeti pri ravnoteži naponâ E_2 i U_r, a ta je pri polovici sinhrone brzine vrtnje $n = 0{,}5n_s$ jer tad nema struje u rotoru; $s_o = 0{,}5 = o$.

4. Neka bude $\alpha = 0$, $U_r = -0{,}5E_{20}$ i $o = -0{,}5$. Da se postigne ravnoteža napona u strujnim krugovima, tj. stanje bez struje, mora se stroj vrtjeti nadsinhrono, jer napon E_2 mora postati jednak U_r, a taj je negativan. Brzina će vrtnje u praznom hodu biti, dakle, $n = 1{,}5n_s$, a klizanje $s = -0{,}5 = o$.

Iz ta četiri primjera izvući ćemo dva važna zaključka:

1. uz djelovanje dodatnoga regulacijskog napona U_r mogu se postizati razne brzine vrtnje u praznom hodu, a prema tome i pod opterećenjem, što zapravo od stroja i očekujemo;

2. kad je kut regulacijskog napona $\alpha = 0$, klizanje u praznom hodu jednako je omjeru regulacijskog napona U_r i induciranog napona u mirovanju E_{20}, tj. $s_o = o$.

Međutim, dok je prvi zaključak općenit, drugi to nije jer mi u principu možemo dodavati regulacijski napon U_r i pod bilo kojim kutom α različitim od nule.

U praksi se kut α postavlja redovito različitim od nule zbog raznih razloga, o kojima će biti još riječi. Međutim, to znači, prema slici 1, da ćemo i u praznom hodu imati konačnu struju u rotoru, samo što ona mora biti jalova pa neće proizvoditi okretni moment motora. Za taj opći slučaj treba odrediti klizanje u praznom hodu s_o. Na slici 3. prikazana su četiri vektorska dijagrama za četiri načelne mogućnosti zadavanja kuta α, no uvijek je riječ o struji u praznom hodu. Izračunajmo iz bilo koje od tih skica opći izraz za klizanje u praznom hodu; recimo iz slike 3.a. Vrijedit će:

$$U_r \sin\alpha = I_2 R_2,$$

$$U_r \cos\alpha = E_2 + I_2 s X_2 = s_o(E_{20} + I_2 X_2).$$

Izrazimo li s_o iz druge jednadžbe i uvrstimo u rezultat I_2 iz prve jednadžbe, nakon sređivanja uz pomoć jednadžbe 3 izlazi:

$$s_o = \frac{\frac{R_2}{X_2} o\cos\alpha}{\frac{R_2}{X_2} + o\sin\alpha}. \qquad (4)$$

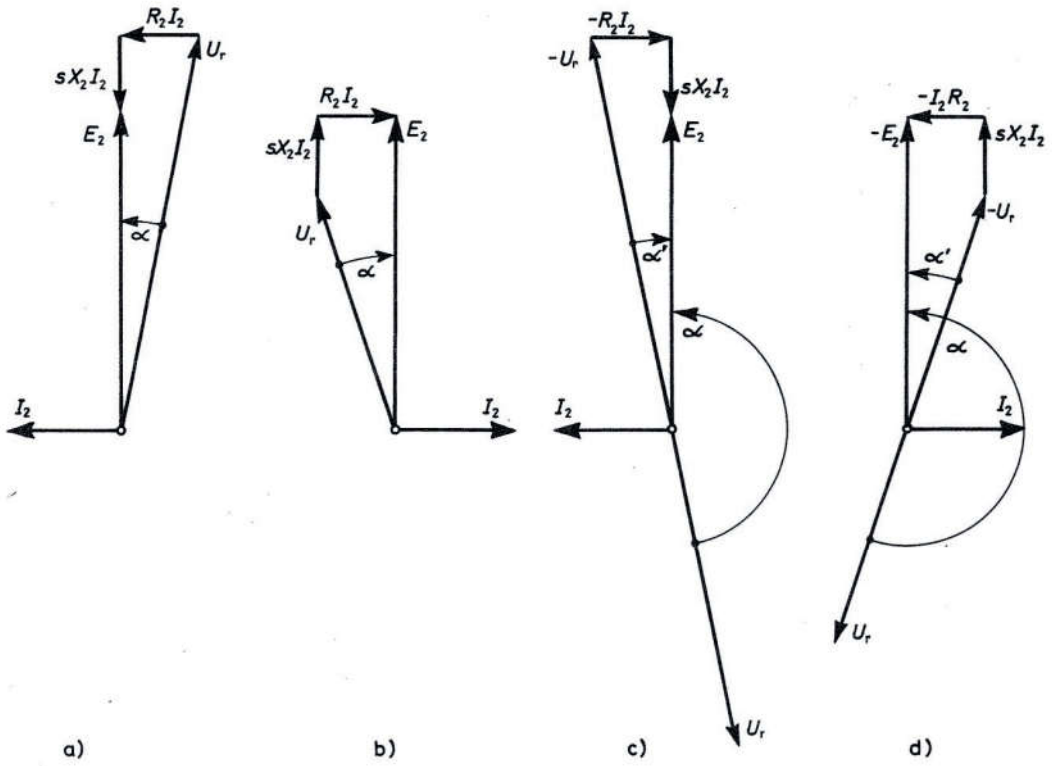
Po definiciji prekretnog klizanja, za sekundarni je strujni krug asinhronog motora prekretno klizanje:

$$s_p \doteq \frac{R_2}{X_2}, \tag{5}$$

pa izraz (4) prelazi u:

$$s_o = \frac{s_p o \cos\alpha}{s_p + o\sin\alpha}. \tag{4.a}$$

Od četiri dijagrama na slici 3. slike 3.a i b označavaju pogon s pozitivnim s_o i s kutom α manjim od 90°, dakle podsinhrono područje rada, a slike 3.c i d pogon s negativnim s_o i s kutom α većim od 90°, dakle nadsinhrono područje. Jednako tako slike 3.a i c prikazuju prazni hod s čistom kapacitivnom strujom sekundara u praznom hodu, a slike 3.b i d prazni hod s čistom induktivnom strujom sekundara u praznom hodu. Budući da se na slici 3. htjela zadržati određena jednoobraznost prikazivanja (jednaki vektori induciranog napona sekundara), to su slike 3.c i d konstruirane s kutom $\alpha' = (180 - \alpha)$ umjesto s α, što se može učiniti pazi li se na predznake veličina.



Sl. 3. Vektorski dijagrami sekundara za prazni hod trofaznoga porednog kolektorskog motora: a) i b) – podsinhrona vrtnja; c) i d) – nadsinhrona vrtnja; a) i c) – kapacitivna struja praznog hoda; b) i d) – induktivna struja praznog hoda

Razmotrimo kako izgleda kružni dijagram sekundara trofaznoga kolektorskog porednog motora, i to kao kružni dijagram sekundara asinhronog motora kojem smo uključili regulacijski napon U_r. Inducirani napon sekundara E_2 u

ravnoteži je sa zbrojem padova napona na otporima i regulacijskog napona U_r. Na osnovi simboličke metode možemo to napisati kao:

$$E_2 = U_r e^{-j\alpha} + I_2 R + jI_2 X_2 s, \tag{6}$$

odatle dobivamo za struju:

$$I_2 = \frac{E_2 - U_r e^{-j\alpha}}{R_2 + jsX_2} = \frac{s - oe^{-j\alpha}}{R_2 + jsX_2} E_{20} \tag{7}$$

ili:

$$I_2 = \frac{1 - \frac{oe^{-j\alpha}}{s}}{\frac{R_2}{s} + jX_2} E_{20}. \tag{8}$$

Obje te jednake jednadžbe zapravo su jednadžba kružnice. U koordinatnom sistemu strujnoga kružnog dijagrama pozitivni smjer osi ordinata je smjer radne struje, tj. smjer napona E_2, a pozitivni smjer osi apscisa je smjer čiste induktivne struje. Točke P_0 (vrtnja u sinhronizmu) i P_∞ (vrtnja beskonačno velikom brzinom) točke su određene strujama uz $s = 0$ i $s = \pm\infty$, a njihova je udaljenost promjer kružnog dijagrama. Dakle, uvrstimo li $s = 0$ u jednadžbu (7), bit će struja sekundara u praznom hodu:

$$I_{20} = -\frac{oE_{20}e^{-j\alpha}}{R_2} = -\frac{U_r}{R_2} e^{-j\alpha}, \tag{9}$$

dakle struja s negativnim smjerom dodanoga regulacijskog napona U_r. Uvrštenjem $s = \pm\infty$ u jednadžbu (8), dobiva se struja pri beskonačnoj brzini vrtnje:

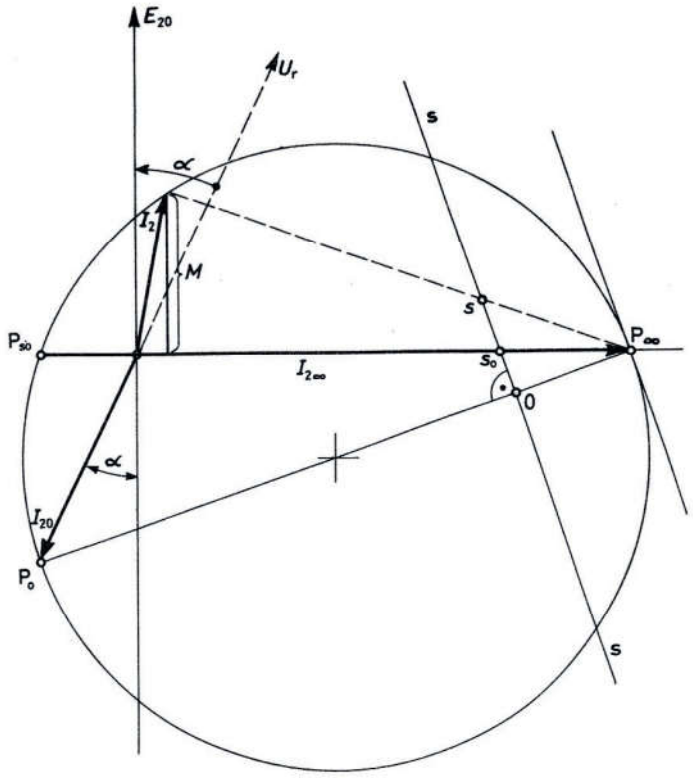
$$I_{2\infty} = \pm\frac{E_{20}}{X_2}, \tag{10}$$

dakle čista induktivna struja.

Iz tih dviju posljednjih jednadžbi zaključujemo da vektor I_{20} leži suprotno pravcu vektora U_r i da je ovisan samo o omskom otporu rotorskog kruga, a vektor $I_{2\infty}$ jednak je kao u sinhronog motora, pa na njega napon regulacije nema utjecaja. Sa strujama I_{20} i $I_{2\infty}$ krug je određen, kako je prikazano u slici 4. Točka praznog hoda P_{so}, tj. stanje bez mehaničkih gubitaka, mora ležati na apscisi jer ne smije imati radne komponente struje s obzirom na vektor napona E_{20}. Linija je $\overline{P_{so}P_\infty}$ prema tome i linija momenta, pa je za to u slici 4. ordinata svake točke na krugu proporcionalna okretnome momentu.

Ako paralelno s tangentom u točki P_∞ povučemo liniju klizanja (s-s), imamo na njoj već određene dvije točke, »O« i s_o, i time mjerilo za određivanje klizanja bilo koje točke na krugu. Kako se iz dijagrama vidi, presjecište linije klizanja (s-s)

sa spojnicom vrha vektora struje I_2 i točke P∞ daje točku klizanja s; udaljenost od točke s do točke O u odgovarajućem je mjerilu veličina klizanja. Taj je kružni dijagram izveden za sekundar stroja pa se ne uzimaju u obzir struja magnetiziranja i gubici u željezu, pa ni primarni otpori. Utjecaj primarnog rasipanja možemo uzeti u obzir na taj način da umjesto s X_2 računamo s $X_k = X_1'' + X_2$, tj. s ukupnim rasipnim induktivitetom. Međutim, nećemo se



Sl. 4. Kružni dijagram sekundara trofaznoga porednog kolektorskog stroja

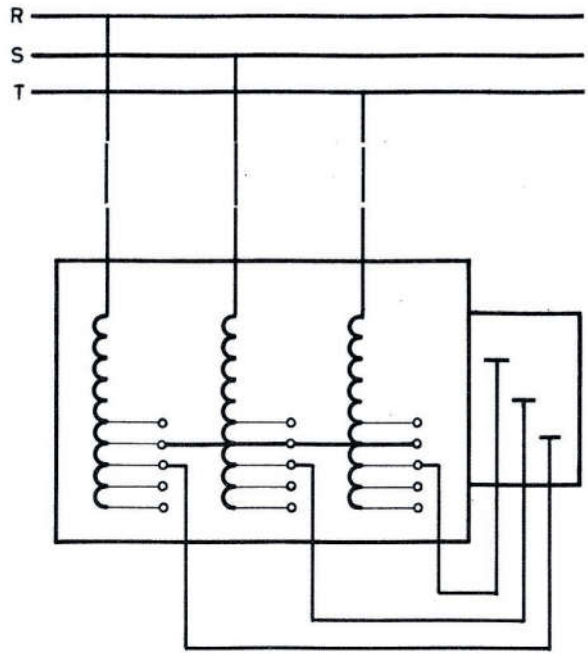
upuštati u dosta složenu razradu potpunoga kružnog dijagrama jer želimo samo upotpuniti fizikalnu sliku rada trofaznoga porednog kolektorskog motora, a za to nam je dovoljan pojednostavnjeni kružni dijagram prema slici 4. Iz tog dijagrama jasno vidimo utjecaj veličine regulacijskog napona na brzinu vrtnje.

10.8.2. Vrste i spojevi trofaznih kolektorskih porednih motora

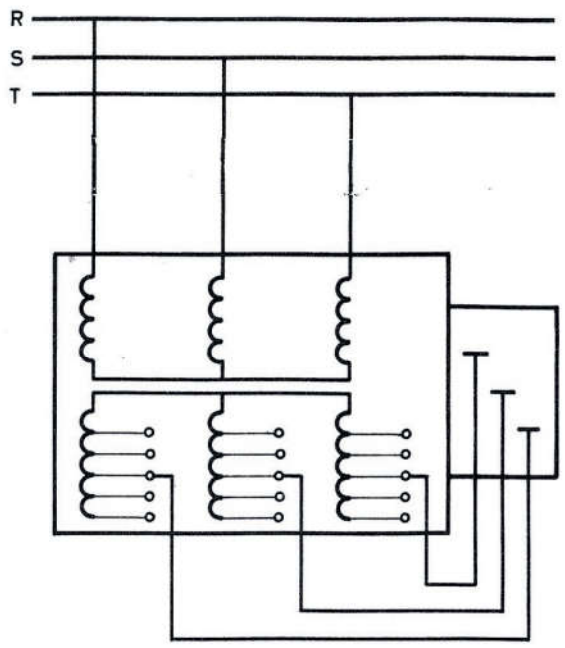
Statorski napajan poredni trofazni kolektorski motor sastoji se od običnoga trofaznog namota primara na statoru, kao u asinhronog motora, a rotorski (sekundarni) namot je kolektorski kao na slici 10.6–2.

Ima mnogo raznih spojeva, od kojih su neki prikazani na slikama 5, 6, 7. i 8. Svi ti spojevi razlikuju se samo u tome kako se iz mreže prenosi u rotorski krug regulacijski napon U_r i kako se mijenja njegov kut α.

Na slici 5. prikazan je najjednostavniji spoj s otcjepima na namotu statora, koji u tom spoju ima još i ulogu štednog transformatora. Kut α ne može se podešavati, već samo visina napona U_r i to izborom otcjepa. Rješenje s posebnim pomoćnim namotom s otcjepima u namotu statora nalazimo na slici 6, a



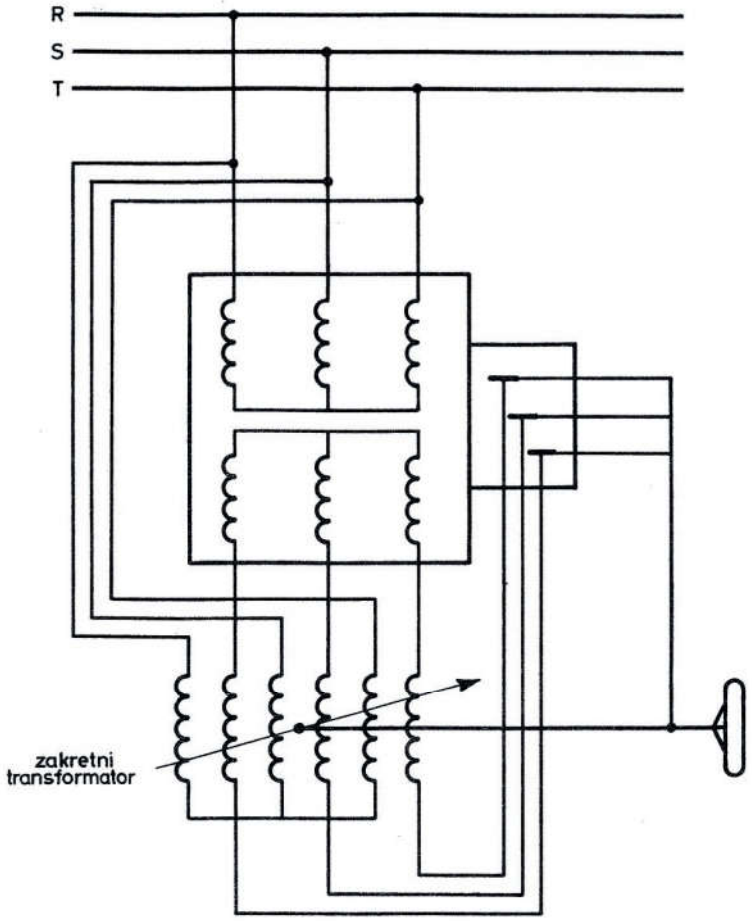
Sl. 5. Skica statorski napajanoga porednog motora s regulacijskim naponom U_r iz otcjepa na statorskom naponu



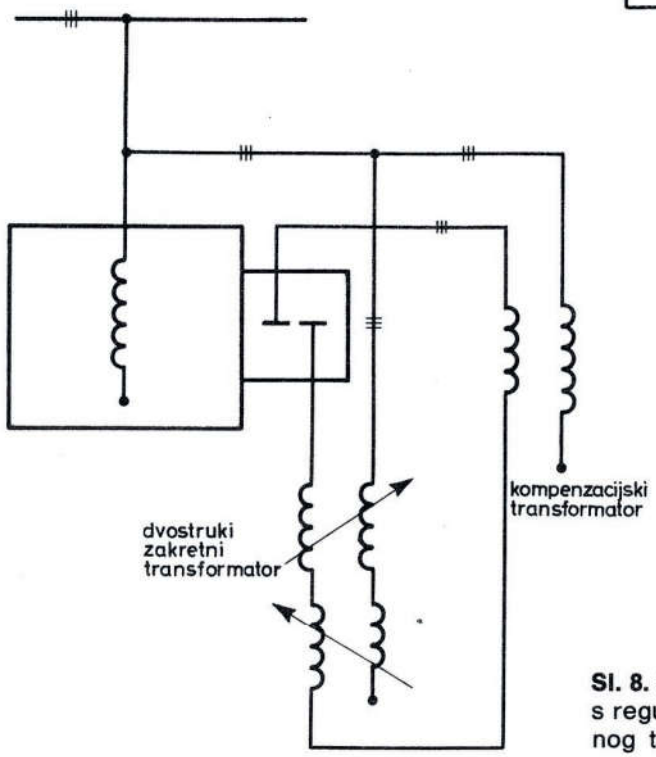
Sl. 6. Skica statorski napajanoga porednog motora s regulacijskim naponom U_r iz posebnog namota na statoru

regulacijske mogućnosti su jednake. Kako bi se izbjegla stupnjevita regulacija brzine vrtnje, dodaje se u krug regulacijskog napona prema slici 7. još i zakretni transformator, kojim se kontinuirano podešava regulacijski napon, pa onda i brzina vrtnje. Zakretni transformator, međutim, zakreće i fazni položaj

regulacijskog napona, pa se mora taj pomak faza kompenzirati odgovarajućim pomicanjem četkica, i tako se podešava i kut α. Na slici 8. prikazana je jednopolna shema dobivanja regulacijskog napona s dvostrukim zakretnim transformatorom napajanim izravno iz mreže, tj. bez pomoćnog namota u statoru, i uz posebni



Sl. 7. Skica statorski napajanoga porednog motora s regulacijskim naponom U_r iz posebnog namota na statoru i zakretnog transformatora

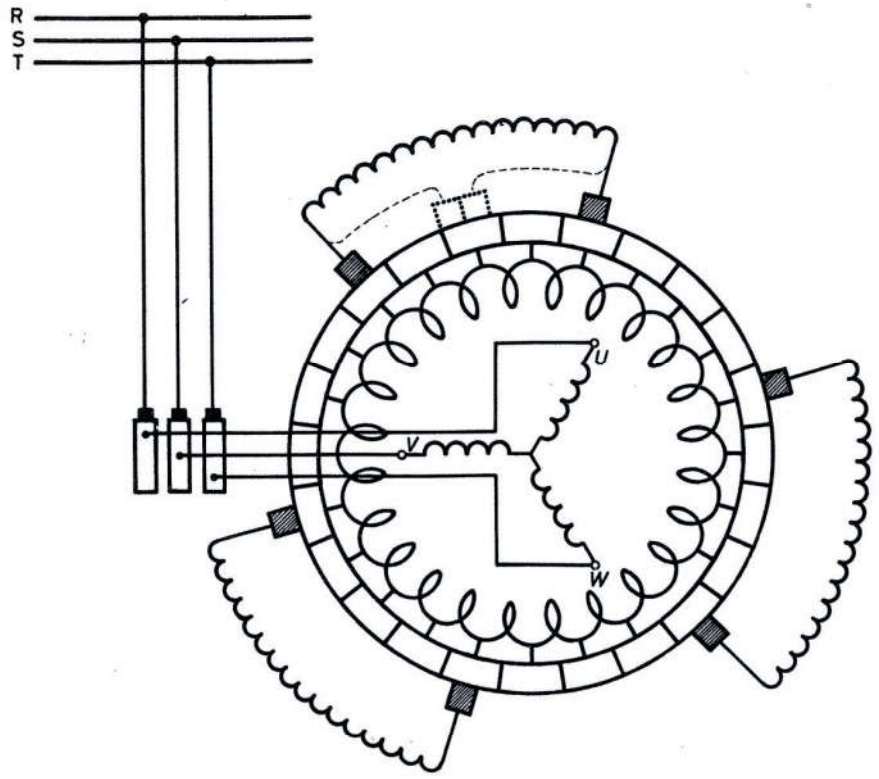


Sl. 8. Skica statorski napajanoga porednog motora s regulacijskim naponom U_r iz dvostrukoga zakretnog transformatora

kompenzacijski transformator, kojim se postiže pomak faze, odnosno određeni kut α. Zakretni su transformatori skupi, a imaju i velika rasipanja. Zato je razumljivo da su se oni željeli zamijeniti regulacijskim transformatorima, koji jednako tako omogućuju kontinuiranu regulaciju brzine vrtnje. No, s tim su transformatorima sheme spoja još kompliciranije od one na slici 8.

Opisani spojevi statora napajanih porednih trofaznih kolektorskih strojeva ili su jednostavni i sa skučenim mogućnostima podešavanja brzine vrtnje i faktora snage ili kad se ta skučenost izbjegne, spoj postaje vrlo kompliciran i skup pa mnogobrojnošću pomoćne aparature gubi i na pouzdanosti. Zato je u praksi odnio prevagu rotorski napajani motor.

Rotorski napajani trofazni kolektorski poredni motor, često nazvan Schrageov motor, napaja se iz trofazne mreže spojem na klizne kolute, dakle primar mu je na rotoru, i to je normalni trofazni izmjenični namot. Budući da se i kolektorski namot mora nalaziti na rotoru kako bi četkice mogle izvršiti ulogu pretvarača frekvencije, to je osim primarnog namota na rotoru u istim utorima namotan neposredno uz zračni raspor još i kolektorski namot. Stator ima normalni trofazni namot, koji je u ulozi sekundarnog namota, a svaka mu je faza s oba kraja priključena na po jedan red četkica, što vidimo na slici 9. Svaki par četkica, priključen na jednu fazu statora, može se po kolektoru međusobno razmicati u jednom ili drugom pravcu. Kad se parovi četkica pokrivaju, kako je to crtkano za jednu fazu prikazano na slici 9, statorski, tj. sekundarni namot nalazi se u kratkom spoju, pa je to čisti asinhroni motor.



Sl. 9. Skica spoja rotorski napajanoga trofaznog kolektorskog motora, Schrageova motora

U kolektorskom se namotu djelovanjem primarnog namota transformatorski inducira napon s frekvencijom mreže, a na četkicama dobivamo taj napon ali s kliznom frekvencijom sekundara, pa ga zato možemo kao napon regulacije spojiti u seriju sa sekundarnim namotom u statoru. Što više četkice razmičemo jednu od druge, to veći dobivamo napon regulacije U_r, a kod paralelnog se pomicanja svih četkica u jednom smjeru podešava kut α.

Prednost motora hranjenoga preko rotora sastoji se u ovome:

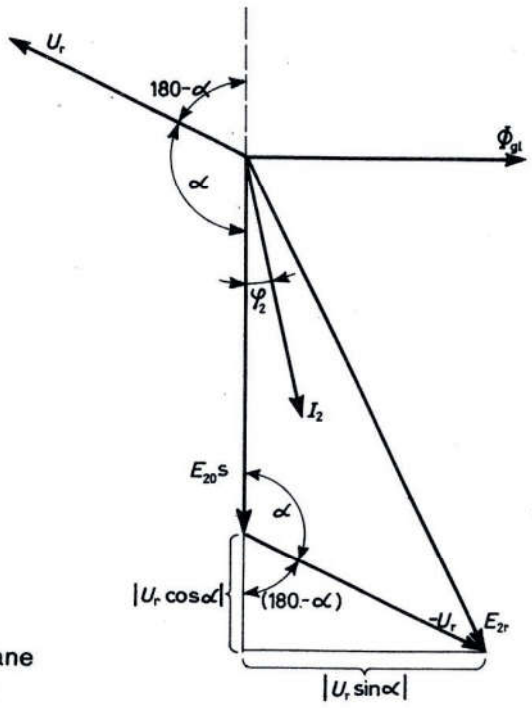
a) nema zakretnog transformatora ni otcjepa, pa ni regulacijskog transformatora i potrebno je samo pomicanje četkica;

b) nazivna snaga kolektorskog namota, a zbog toga i veličina kolektora, je U_r/E_{20} puta manja od nazivne snage kolektorskog namota motora hranjenoga preko statora; pri regulaciji od $\pm 30\,\%$ nazivna snaga kolektorskog namota čini samo $30\,\%$ nazivne snage motora.

10.8.3. Moment motora. Karakteristike

Do toka mehaničkih karakteristika trofaznoga kolektorskog porednog motora dolazimo iskorištavajući baš sličnost njegova ponašanja onome u asinhronog motora. Na slici 10. vektorski je dijagram njegova sekundara. Doda li se pod kutom α napon U_r na $E_{20}s$, za rezultirajući će napon E_{r2} vrijediti, prema jednadžbi (6):

$$\overline{E}_{r2} = \overline{E}_{20}s - \overline{U}_r e^{-j\alpha}. \tag{11}$$



Sl. 10. Vektorski dijagram sekundarne strane porednoga trofaznog kolektorskog motora

Na slici 10. vidi se da je vektorski zbroj moguće napisati na osnovi simboličke metode:

$$E_{r2} = E_{20}s - U_r\cos\alpha + jU_r\sin\alpha, \tag{12}$$

$$I_2 = \frac{E_{r2}}{Z_2} = \frac{E_{20}s - U_r\cos\alpha + jU_r\sin\alpha}{R_2 + jX_2s}. \tag{13}$$

Racionalizirajmo nazivnik:

$$I_2 = \frac{E_{20}sR_2 - U_rR_2\cos\alpha + U_rX_2s\sin\alpha}{R_2^2 + (X_2s)^2} +$$

$$+ j\frac{-E_{20}s^2X_2 + U_rX_2s\cos\alpha + U_rR_2\sin\alpha}{R_2^2 + (X_2s)^2}. \tag{13.a}$$

Snaga ukupno prenesena na sekundar bit će:

$$P_2 = m_2E_{20}I_2\cos\varphi_2 = m_2E_{20}I_{2r}. \tag{14}$$

U jednadžbi je I_{2r} radni dio struje, a to je prvi član jednadžbe (13.a.). Za prenesenu snagu dobiva se:

$$P_2 = \frac{mE_{20}^2R_2s}{R_2^2 + (X_2s)^2}\left(1 - \frac{U_r}{sE_{20}}\cos\alpha + \frac{U_r}{E_{20}}\frac{X_2}{R_2}\sin\alpha\right). \tag{15}$$

Uvrstimo li prenosni omjer iz jednadžbe (3) i podijelimo relaciju (15) kutnom sinhronom brzinom vrtnje ω_s, izlazi:

$$M_m = \frac{P_2}{\omega_s} = \frac{m_2E_{20}^2R_2s}{\omega_s(R_2^2 + X_2^2s^2)}\left(1 - \frac{o}{s}\cos\alpha + o\frac{X_2}{R_2}\sin\alpha\right). \tag{16}$$

Izraz pred zagradom dade se transformirati:

$$\frac{m_2E_{20}^2R_2s}{\omega_s(R_2^2 + X_2^2s^2)} = \frac{1}{\omega_s}m_2\frac{E_{20}^2s}{(R_2^2 + X_2^2s^2)}R_2 = \frac{m_2I_{2as}^2R_2}{s\omega_s} = M_{mas},$$

tj. on čini moment asinhronog motora, odnosno moment trofaznoga porednog kolektorskog motora kojemu nije dodan nikakav regulacijski napon U_r. Polazeći od toga jednadžba (16) može se pisati uz pomoć obiju varijanti Klossove jednadžbe:

$$M_m = \frac{2M_p(1 + s_{pn})}{\frac{s}{s_p} + \frac{s_p}{s} + 2s_{pn}}\left(1 - \frac{o}{s}\cos\alpha + o\frac{X_2}{R_2}\sin\alpha\right), \tag{17}$$

$$M_m \doteq \frac{2M_p}{\frac{s}{s_p} + \frac{s_p}{s}}\left(1 - \frac{o}{s}\cos\alpha + o\frac{X_2}{R_2}\sin\alpha\right), \tag{18}$$

pri čemu je M_p prekretni moment i s_p prekretno klizanje asinhronog motora (a s_{pn} je to isto prekretno klizanje za stroj bez ikakva dodatnog otpora u rotoru). Za trofazni poredni kolektorski motor uvedimo oznake M_{pp} i s_{pp} za adekvatne fizikalne veličine. Jednadžbe (17) i (18) matematički su izraz mehaničke karakteristike trofaznoga porednog kolektorskog motora napajanoga preko rotora, i od njih je za daljnju analizu svojstava motora jednadžba (18) posebno pogodna. Napišemo li je, naime, u obliku:

$$M_m = 2M_p \left[\frac{ss_p - os_p\cos\alpha + o\dfrac{X_2}{R_2} s_p s \sin\alpha}{s^2 + s_p^2} \right], \tag{18.a}$$

odmah ćemo za vrijednost momenta $M_m = 0$ dobiti klizanje s_o u praznom hodu. Tad mora biti poništen izraz u zagradi, tj.:

$$ss_p - os_p\cos\alpha + o\frac{X_2}{R_2} ss_p\sin\alpha = 0,$$

iz čega odmah izlazi:

$$s_o = \frac{o\cos\alpha}{1 + o\dfrac{X_2}{R_2}\sin\alpha}, \tag{19}$$

što je već poznato kao izraz (4), samo dobiveno drugim načinom. Ako se derivira, dalje, relacija (18.a) po klizanju i izjednači s nulom, da se dođe do ekstrema momenta, dobivamo:

$$s^2 - 2ss_o - s_p^2 = 0.$$

Korijeni te jednadžbe očito su vrijednosti prekretnog klizanja trofaznoga kolektorskog porednog motora napajanoga s rotorske strane:

$$s_{pp} = s_o \pm \sqrt{s_o^2 + s_p^2}. \tag{20}$$

Uvrstimo li vrijednosti s_{pp} u jednadžbu (18.a), dobivaju se i vrijednosti prekretnog momenta:

$$M_{pp} = 2M_p \left[\frac{s_{pp}s_p - os_p\cos\alpha + s_{pp}s_p\dfrac{X_2}{R_2} o\sin\alpha}{s_{pp}^2 + s_p^2} \right].$$

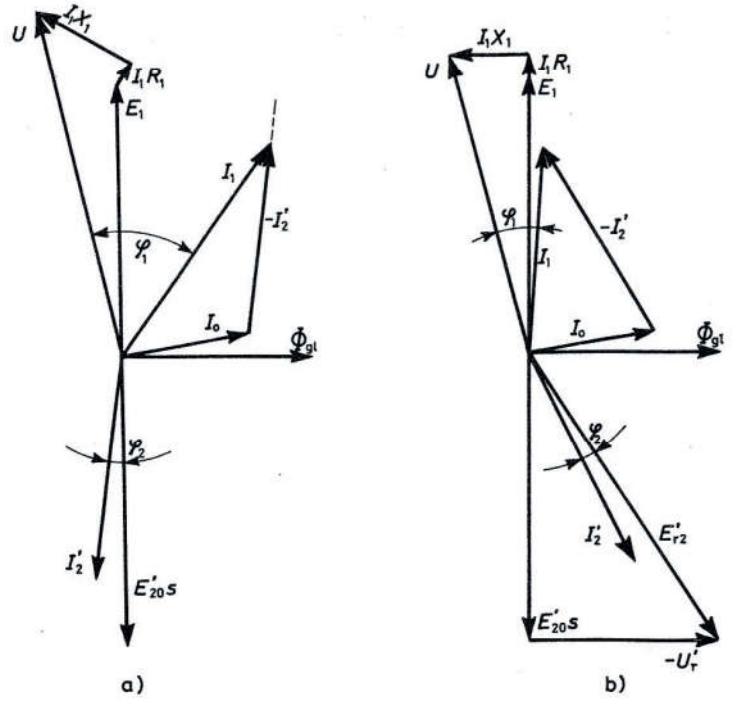
Pošto se sredi taj izraz, nastaje:

$$M_{pp} = M_p \frac{s_p}{s_{pp}} \left(1 + o\frac{X_2}{R_2}\sin\alpha\right), \tag{21}$$

a za vrijednosti $\alpha = 0$ i 180°, tj. za pogon s minimalnom strujom u sekundarnim namotima, bit će:

$$M_{pp} = M_p \frac{s_p}{s_{pp}}. \tag{22.a}$$

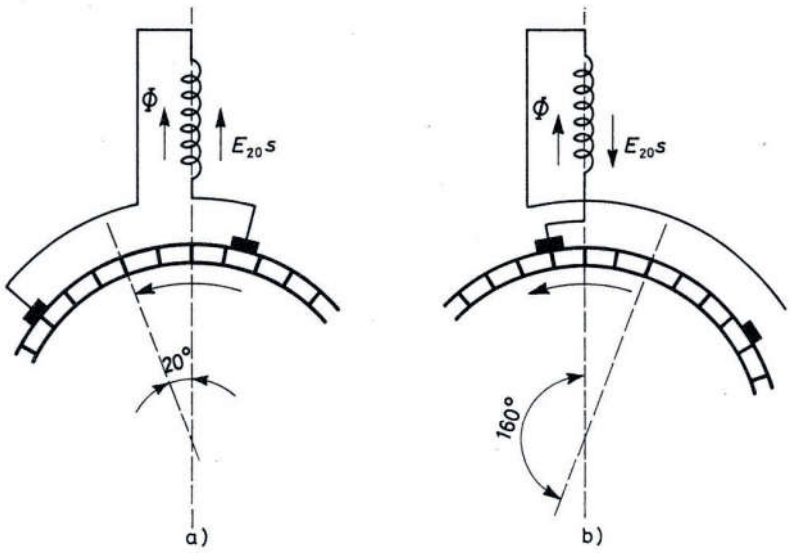
Ipak se redovito dodaje napon U_r i pod kutom različitim od 0° ili 180° zbog mogućnosti da se primaru popravi faktor snage. Neka se to razjasni npr. prema slici 11. Na slici 11.a vektorski je dijagram asinhronog motora, tj. takvoga koji nema nikakva dodatka napona u rotoru. Priključimo li regulacijski napon U_r u rotor pod kutom od 90° (odabran je taj kut da predodžba bude što jasnija), porast će napon rotora na vrijednost E'_{r2} (vidi sl. 11.b). Struja I_2 povećava se u omjeru porasta rotorskog napona, ali zadrži praktički isti kut φ_2 prema ukupnome rotorskom naponu E_{r2}, jer se otpori rotora zapravo nisu promijenili. Posljedica će biti smanjeni kut φ_1 na primaru (bolji $\cos\varphi$) uz pad struje u primaru, što se jasno vidi iz usporedbe slika 11.a i 11.b.



Sl. 11. Vektorski dijagram asinhronog motora (a) i trofaznoga kolektorskog porednog motora napajanoga preko rotora i s dodatnim naponom U_r pod kutom od 90° (b)

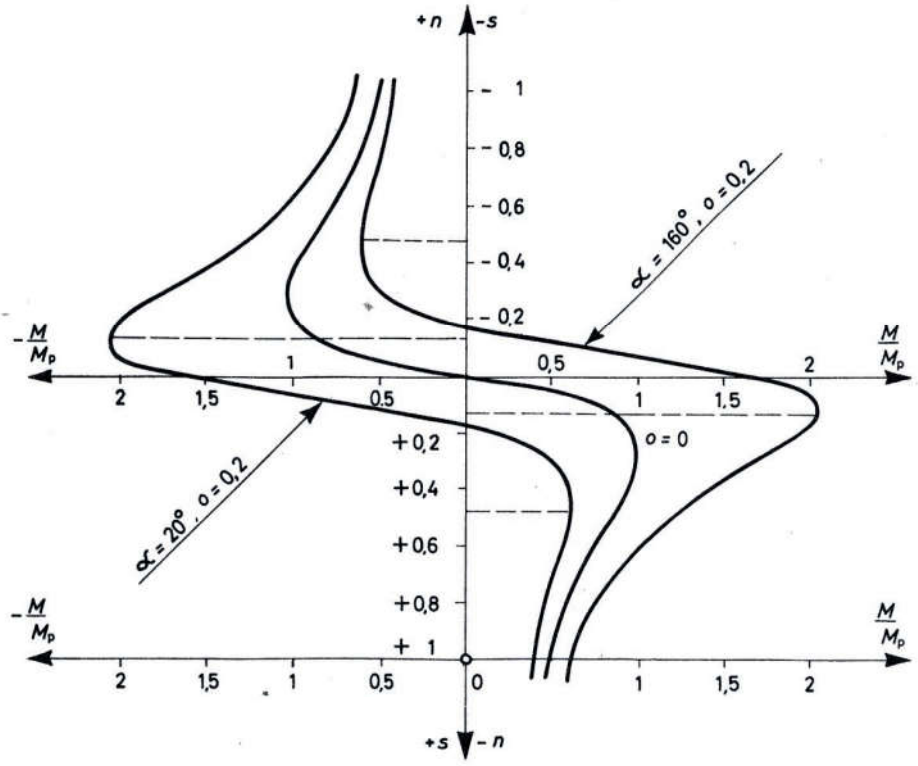
Da bi se spoznalo kako se mijenja mehanička karakteristika dodavanjem napona U_r, pretpostavimo da je motor s (asinhronim) prekretnim klizanjem $s_p = 0{,}25$ i s vrijednošću omjera rotorskih otpora $R_2/X_2 = 0{,}1$. Dalje, odaberimo narinuti (dodatni) rotorski napon $U_r = 0{,}2\,E_{20}$, pod kutom $\alpha = 20$. Položaj četkice odgovara onome na slici 12.a. Prema izrazu (19) dobivamo klizanje s pogonom bez tereta $s_o = 0{,}186$. Na osnovi toga iz relacije (20) izvode se prekretna klizanja – motorsko $s_{pp} = 0{,}498$ i generatorsko $s_{pp} = -0{,}125$. Prekretni će moment u motorskom području pasti na iznos $M_{pp} = 0{,}505\,M_p$, a u generatorskome narasti na $M_{pp} = 2{,}09\,M_p$, što se vidi na slici 13 (lijevo nacrtana mehanička karakteristika). To je bio postupak dodavanja regulacijskog napona za *podsinhroni* rad motora. Za primjer *nadsinhronog* rada dodan je regulacijski napona $U_r = 0{,}2\,E_{20}$ u sekundar, ali pod kutom od 160°, što odgovara položaju

četkica prema slici 12.b. Apsolutne brojčane vrijednosti klizanja u praznom hodu s_o, prekretnih klizanja s_{pp} i razvijenih momenata slične su onima u prethodnom



Sl. 12. Dvije od mogućnosti da se podešava ponašanje trofaznoga kolektorskog porednog motora napajanoga s rotorske strane, podešavanjem položaja četkica na kolektoru

primjeru, a sama je karakteristika prikazana na slici 13. sasvim desno. Iz svega može se zaključiti: kad je riječ o podsinhronom pogonu, preopteretivost je u motorskom području preniska i u generatorskome previsoka, a pri nadsinhronom



Sl. 13. Mehaničke karakteristike trofaznoga porednog kolektorskog motora napajanoga s rotorske strane – uz tumačenje promjena s_{pp} i M_{pp}

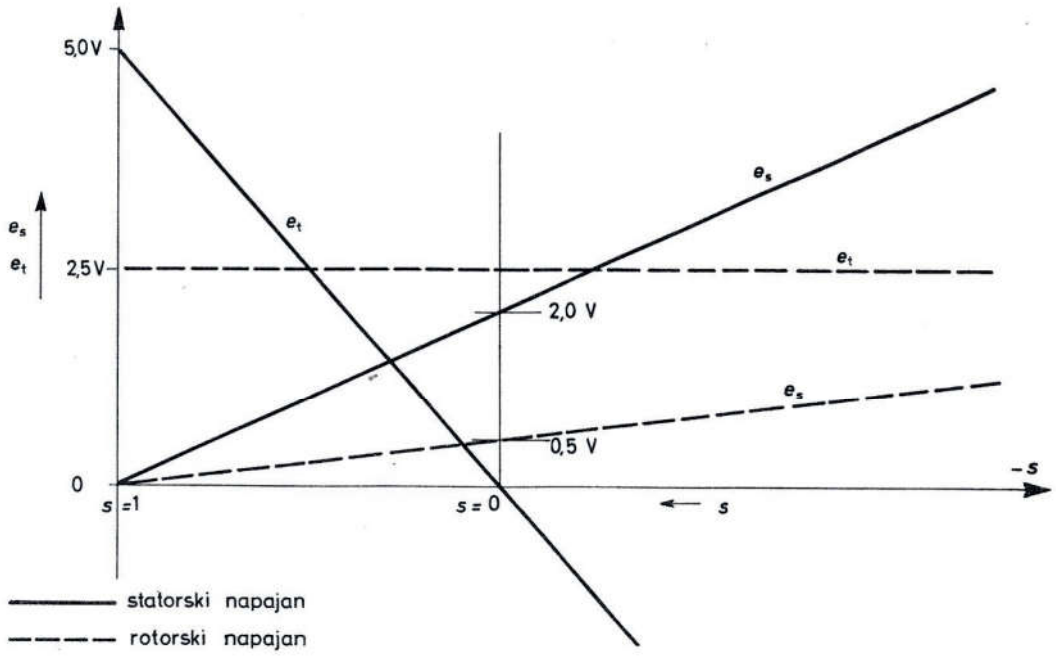
pogonu u generatorskom je području preopteretivost preniska i u motorskome previsoka. To se stanje može nešto malo popraviti odabiranjem nešto većeg kuta α (za motorski pogon) uz odgovarajuće povišenje regulacijskog napona U_r, i to je drugi razlog biranju kuta četkica različitoga od 0°. No, općenito valja očekivati nepovoljne vrijednosti momenta motora na pojedinim granama karakteristike. Da se omogući rad u motorskom području na cijelom opsegu podešavanja, posebno kad je taj opseg velik, prijeko je potrebno da trofazni kolektorski rotorski napajan motor ima prirodno visoku preopteretivost, tj. da se gradi sa što manjim rasipnim otporima primara i sekundara. O vanjskim karakteristikama možemo, dakle, zaključiti da su slične onima asinhronog motora, a samo podešavanje brzine vrtnje sasvim je jednostavno.

10.8.4. Komutacija trofaznih porednih kolektorskih motora

I u kolektorskom namotu trofaznih porednih kolektorskih motora komutacija struje iz jedne grane namota u drugu izaziva napon samoindukcije e_s u svitku koji komutira, a jednako tako se pojavljuje u istom svitku i napon zbog djelovanja okretnoga magnetskog polja, koji ćemo, analogije radi, zvati naponom transformacije e_t, kako smo to učinili i za serijski trofazni kolektorski motor. No u pogledu iznosa tih napona i njihove ovisnosti o brzini vrtnje bitne su razlike između statorski i rotorski napajanoga porednog kolektorskog motora. Statorski napajanome porednom kolektorskom motoru napon samoindukcije e_s je napon u svitku *cijeloga* (glavnog) sekundarnog namota stroja, a rotorski napajanome (Schrageovu) motoru to je napon u svitku samo *regulacijskog* (pomoćnog) dijela namota, i zato je on manji sve dok se brzina vrtnje podešava u granicama manjima od $\pm 100\,\%$, što je praktički redovito tako. Na primjer, podešava li se brzina vrtnje Schrageovu motoru u granicama $\pm 25\,\%$, što je najčešće, bit će mu i napon samoindukcije jednak svega četvrtini napona samoindukcije statorski napajanog motora jednake snage i brzine vrtnje. Napon samoindukcije proporcionalan je brzini vrtnje, pa je upravo obrazloženi primjer prikazan na slici 14. Za konkretne iznose napona na toj slici odabrane su numeričke vrijednosti koje se još mogu podnijeti (njihove veće vrijednosti) i koje moraju biti ipak znatno niže nego u istosmjernih motora jer, sjetimo se, nema pomoćnih polova. S gledišta napona samoindukcije, Schrageov je motor znatno povoljniji od statorski napajanoga.

Za napon transformacije fizikalna je slika drukčija. Budući da je statorski napajanome motoru brzina okretnoga magnetskog polja koje siječe sekundarni svitak proporcionalna klizanju, bit će mu napon transformacije e_t proporcionalan klizanju, velik u mirovanju i visokim nadsinhronim brzinama vrtnje, a malen pri (podsinhronim i nadsinhronim) brzinama vrtnje u blizini sinhronizma i u samom sinhronizmu jednak nuli. Schrageovu moturu, kojem je u kolektorskom svitku frekvencija uvijek frekvencija mreže, jer je u istim utorima s primarnim namotom, napon će transformacije e_t biti konstantan, bez obzira na to što se događa sa

strojem. Situacija je prikazana na slici 14. S gledišta napona transformacije (barem u širem okolišu sinhronizma) povoljniji je statorski napajan motor.



Sl. 14. Ovisnost napona samoindukcije i napona transformacije u svitku koji komutira o klizanju stroja

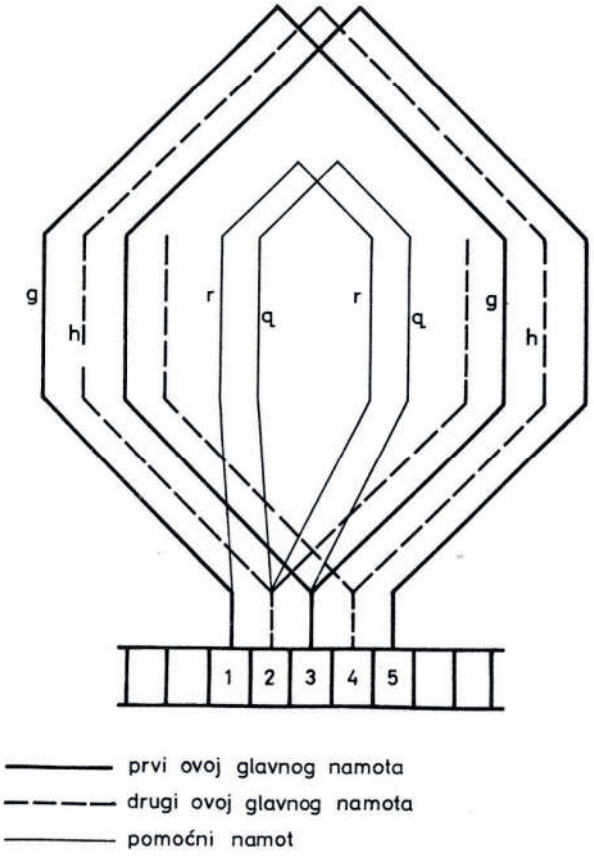
10.8.5. Utjecaj komutacije na snage porednih kolektorskih motora. Osobitosti izvedbe namota za veće snage

Budući da je komutacija mjerodavna za mogućnost izgradnje kolektorskih strojeva općenito, a gledajući napone samoindukcije i transformacije na slici 14, očito je da se za pogon u okolišu sinhronih brzina vrtnje mogu izgraditi veći strojevi u izvedbi statorski napajanih kolektorskih porednih motora nego u izvedbi Schrageova motora. Međutim, u pokretanju i pri većim nadsinhronim brzinama vrtnje Schrageov je motor u prednosti.

Ne ulazeći u komplicirana razmatranja graničnih snaga trofaznih kolektorskih strojeva, pri čemu imaju svoju ulogu mnogi detalji gradnje, ograničimo se na neke izvedbe namota kolektorskih strojeva za veće snage. Pri tome se osvrnimo još samo na Schrageov motor jer je samo on preživio oštru konkurenciju s modernijim rješenjima, i jer se još danas razvija.

Obično napon samoindukcije e_s nije odlučujući za ograničenje ili, jednostavno, za mogućnost gradnje Schrageova stroja veće snage, jer je on, po prirodi stvari, (vidi sl. 14) malen. No zato je to još više napon transformacije e_t. A on ovisi o veličini glavnoga magnetskog toka Φ_{g1} po polu. Zbog maloga potrebnog broja efektivnih zavoja kolektorskog namota Schrageova motora veće snage, taj se namot normalno gradi kao petljasti. Sjetimo se, kad je riječ o kolektorskom

namotu, da svitak jednovojnoga petljastog namota, s $a = p$ pari paralelnih grana, leži svojim početkom i krajem u dvije susjedne kolektorske lamele i da je kratak put iskre zbog otežane komutacije nastale nekompenziranim namotom transformacije. Dvovojni petljasti namot razdvaja (produžuje) taj put iskre, jednako kao što praktički raspolavlja napon između lamela izazvan normalnom raspodjelom regulacijskog napona U_r po svicima. To je zbog poznate činjenice da između početka i kraja jednog svitka (prvog ovoja) dvovojnoga petljastog namota koji se nalaze u dvije lamele leži još jedna lamela što pripada drugom ovoju namota (vidi npr. sl. 9.2–2). Zbog toga se može dopuštena vrijednost glavnoga magnetskog toka udvostručiti uz upotrebu dvovojnoga petljastog namota, ali uz uvjet da se napon između početne i završne lamele praktički zaista i raspolovi. Na slici 15. jedan je takav primjer s dvovojnim petljastim namotom i pomoćnim namotom koji osigurava raspolavljanje napona. Prvi je ovoj dvovojnog namota označen malim slovom »g«, a drugi s »h«. Položimo li u iste utore i spojimo li na iste kolektorske lamele kao one u glavnog (dvovojnog) namota i pomoćni namot (označen s »r« i »q«), koji je jednovojni petljasti i s bitno skraćenim korakom svitka, može se ostvariti točno raspolavljanje napona (u primjeru sa sl. 15. između lamela 1 i 3). Kako se to postiže? Zavoji »r« i »q« pomoćnog namota spajaju kolektorske lamele 1 i 2, te 2 i 3. Pretpostavimo da je glavni dvovojni namot



Sl. 15. Dvovojni petljasti namot (Schrageova motora) s pomoćnim naponom za raspolavljanje napona svitka

izveden s dijametralnim korakom svitka, dakle izveden kao neskraćeni namot s tetivnim faktorom namota 1, a pomoćni jednovojni namot sa skraćenim korakom svitka od svega 1/3 polnog koraka. Tad je iznos napona tog svitka (i napona transformacije u njemu!) svega polovica napona svitka glavnog namota. Tetivni je faktor pomoćnom namotu zapravo:

$$f_{nt} = \sin\frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{3} = \sin 30° = \frac{1}{2},$$

dakle jednaka je točno polovici tetivnog faktora glavnog namota. Prema tome, kad su svici pomoćnog namota spajani redom na kolektorske lamele – 1, 2, 3 itd., a glavnog namota napreskok – 1, 3, 5 itd. (prvi ovoj) i 2, 4, 6 itd. (drugi ovoj), onda zaista pomoćni namot i magnetski i galvanski osigurava raspolavljanje namota svitka na dvije (jednake) polovice. Taj uvjet nije ostvaren jedino i samo pri dijametralnom koraku glavnog namota i tetivnome na trećinu skraćenog koraka pomoćnog namota. On će se ostvariti u svakoj kombinaciji kad je tetivni faktor pomoćnog namota po iznosu jednak polovici tetivnog faktora glavnog namota, pa čak ako se i nezantno odstupi od tog pravila; više o tome vidi u [L 39]. Pojava takva pomoćnog namota može u prvi čas zbuniti. No zabune nestaje zamisli li se da svici i glavnog i pomoćnog napona moraju imati jednak broj zavoja (u praksi redovno 1) pa da onda cijeli namoti naponski čine dva jednaka naponska poligona svitaka, dva paralelna namota. Uz takve uvjete pomoćni namot može biti izveden s vodičem manjeg presjeka jer gotovo da služi slično kao svojevrsni sistem spojki izjednačenja. Danas se redovito nešto veći Schrageovi motori s takvim namotom i u toj izvedbi mogu graditi do približno 300 kW snage.

10.9. Zadaci i problemi

10.9.1. Zadaci

1. Dvopolni, jednofazni, serijski kolektorski motor s 1 kW, 220 V, 3000 min^{-1}, $\cos\varphi = 0{,}8$ i 50 Hz, ima uzbudni namot s 300 zavoja. Rotor ima 30 utora, 120 kolektorskih lamela i ukupno 720 zavoja u jednovojnome petljastom namotu s dijametralnim korakom. Rasipni magnetski tok glavnih polova iznosi 10% magnetskog toka zračnog raspora. Pri punom opterećenju motora napon na uzbudnom namotu je 132 V.

   Kontrolirajte je li napon transformacije u kratkospojnom svitku uz nazivno opterećenje motora unutar dopuštenih granica.

2. Jednofazni serijski kolektorski motor od 130 kW, 300 V, 500 A, 1100 min^{-1} i 50 Hz, ima u svicima koji komutiraju napon samoindukcije od 5,1 V i napon transformacije od 2,8 V pri nazivnom opterećenju, a njihov vektorski zbroj točno je kompenziran odgovarajućim poljem pomoćnih polova (radni otpor priključen paralelno namotu pomoćnih polova).

Koliki će biti nekompenzirani dio rezultantnog napona komutacije pri vrtnji s 800 min^{-1} i opterećenju od 600 A ako se ništa ne promijeni na priključku otpora paralelnog namotu pomoćnih polova? Zanemarite zasićenje!

3. Univerzalnome motoru radni otpor namota armature i serijskoga uzbudnog namota, uključivši prelazni otpor na četkicama, iznosi 30 Ω, a induktivitet je 0,1 H. Motor priključen na izmjenični napon od 220 V i 50 Hz, opterećen momentom M uzima iz mreže struju od 2 A i vrti se brzinom od 3 100 min^{-1}. Valja približno odrediti:
   a) brzinu vrtnje motora uz priključak na izmjenični napon od 110 V i 50 Hz pri opterećenju od 50 % momenta M;
   b) brzinu vrtnje motora uz priključak na istosmjerni napon od 220 V pri opterećenju od 100 % momenta M.

   Zanemarite zasićenje i vlastito mehaničko trenje motora!
4. Izračunajte graničnu vrijednost magnetskog toka jednofaznoga serijskog kolektorskog motora pri nazivnom opterećenju i 50 Hz, ako motor ima jedan zavoj po lameli.
5. Šesteropolni trofazni kolektorski poredni motor s 50 Hz, napajan sa statora ima u mirovanju napon između četkica od 120 V. S otcjepa na pomoćnom namotu u statoru možemo dobiti maksimalni fazni napon od 30 V. Odredite u kojem području možemo regulirati brzinu vrtnje praznog hoda bez zakretanja četkica.
6. Šesteropolni trofazni kolektorski poredni motor napajan sa statora (Schrage) s 380 V i 50 Hz, sa asinhronom snagom od 45 kW ima uz nazivni moment motora najveću brzinu vrtnje 1 380 min^{-1}. Ostali poznati podaci motora (asinhroni) su: napon faze statora u mirovanju $E_{20} = 120$ V, prekretno klizanje $s_p = 0{,}18$ i prekretni moment $M_p = 4M_n$.
   a) Koliki regulacijski napon U_r ima motor ako se radna točka najveće brzine vrtnje postiže uz električki kut zakreta $\alpha = 175°$?
   b) Kolika je približno masa bakra kolektorskog namota izražena u postocima mase bakra glavnoga primarnog namota?

10.9.2. Rješenja

1. Inducirani napon u uzbudnom namotu je $E_u = 4{,}44 w_{uf} \Phi_{gl} \sigma$, pri čemu je Φ_{gl} glavni magnetski tok u zračnom rasporu, a σ faktor rasipanja glavnih polova. Napon transformacije između dvije lamele s w_s zavoja u kratko spojenom svitku je prema jednadžbi (10.2–9): $e_t = 4{,}44 f w_s \Phi_{gl}$. Broj zavoja po lameli w_s rotorskog namota računa se iz omjera ukupnog broja zavoja i broja kolektorskih lamela:

$$w_s = \frac{w_a}{k} = 6.$$

Zanemarimo li pad napona na radnom otporu uzbudnog namota, možemo pisati $E_u = U_u = 132$ V. Tad se e_t može računati:

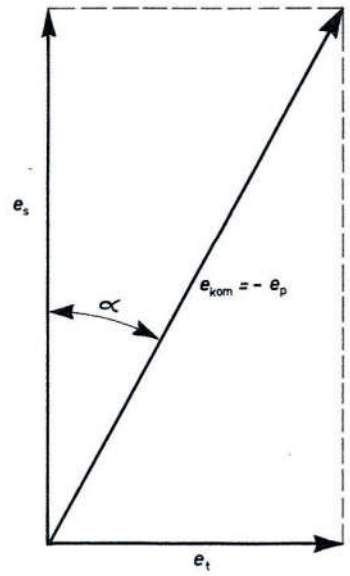
$$e_t = E_u \frac{w_s}{w_{u\sigma}} = 2{,}4 \text{ V}.$$

[Napon transformacije u svitku koji komutira je unutar dopuštenih granica.]

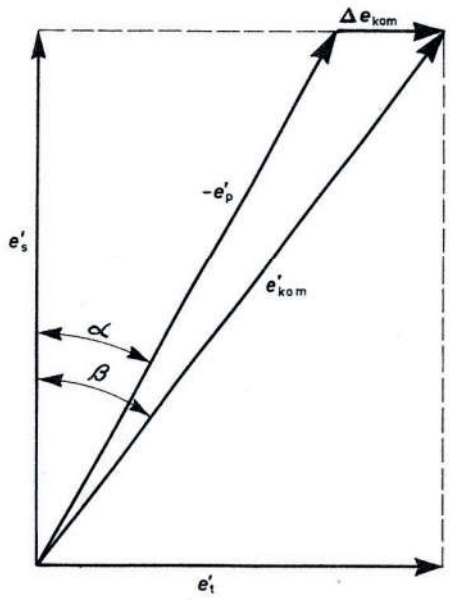
2. Na slici 1. vektorski je dijagram napona samoindukcije e_s, napona transformacije e_t, rezultantnog napona e_{kom} i napona uzrokovanoga tokom pomoćnih polova e_p za svitak u komutaciji za nazivno opterećenje. Rezultantni napon e_{kom} i kut α su:

$$|e_{kom}| = |e_p| \sqrt{e_s^2 + e_t^2} = 5{,}818 \text{ V},$$

$$\sin\alpha = \frac{e_t}{e_{kom}} = 0{,}481, \quad \alpha = 28{,}77°.$$



Sl. 1.



Sl. 2.

Vektorski dijagram napona u svitku koji komutira za pogon s $I' = 600$ A i $n' = 800$ min^{-1} nacrtan je na slici 2. Nove vrijednosti napona su:

napon transformacije $$e'_t = e_t \frac{I'}{I} = 3{,}36 \text{ V};$$

napon samoindukcije $$e'_s = e_s \frac{n'}{n} \frac{I'}{I} = 4{,}45 \text{ V};$$

napon induciran djelovanjem magnetskog toka pomoćnih polova

$$e'_p = e_p \frac{n'}{n} \frac{I'}{I} = 5{,}08 \text{ V}.$$

Rezultantni napon e'_{kom} i kut β prema slici 2. su:

$$e'_{kom} = \sqrt{e'^2_s + e'^2_t} = 5{,}58 \text{ V},$$

$$\sin\beta = \frac{e'_t}{e'_{kom}} = 0{,}602, \qquad \beta = 37°.$$

Nekompenzirani dio rezultantnog napona Δe_{kom} iznosi:

$$\Delta\bar{e}_{kom} = \bar{e}'_{kom} - \bar{e}'_p = e'_t - e'_p \sin\beta$$

$$[\Delta e_{kom} = 0{,}916 \text{ V}]$$

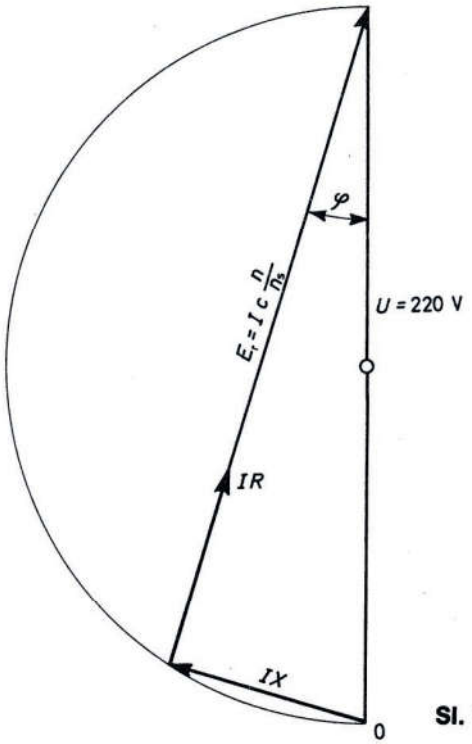
3. Induktivni otpor armaturnog i serijskog namota je $X = 2\pi fL = 31{,}4\Omega$. Induktivni pad napona je tad $IX = 62{,}8$ V, a radni pad napona $IR = 60$ V. Kad znamo induktivni pad napona i napon na koji je motor priključen, možemo nacrtati poznati vektorski dijagram napona na slici 3, koja prikazuje poznato (zadano) stanje.

Napon rotacije otčitan sa slike 3. iznosi $E_r \doteq 151$ V. Napon rotacije možemo i izračunati:

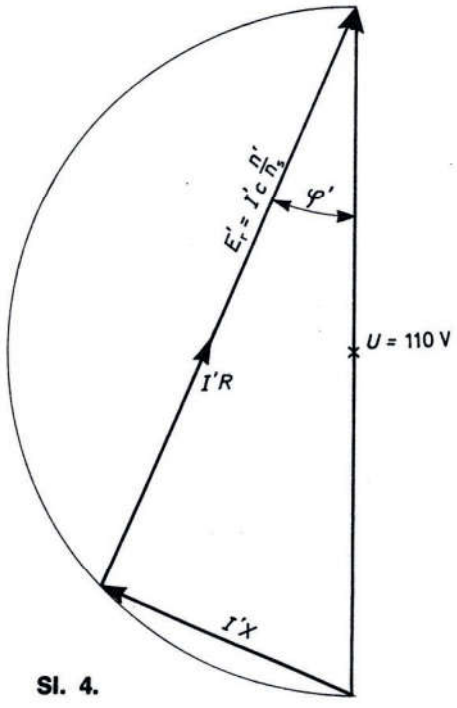
$$IR + E_r = U\cos\varphi,$$

$$\sin\varphi = \frac{IX}{U} = 0{,}2856, \qquad \varphi = 16{,}6°$$

$$E_r = U\cos\varphi - IR = 150{,}8 \text{ V}.$$



Sl. 3.



Sl. 4.

a) Budući da je pretpostavljen nezasićeni motor, to će struja I', pri opterećenju s 50 % momenta opterećenja, biti:

$$I' = I\sqrt{\frac{M'}{M}} = 1{,}414 \text{ A}.$$

Novi je induktivni pad napona $I'X = 44{,}4$ V, i radni $I'R = 42{,}5$ V. Zatim na jednak način kao prije crtamo vektorski dijagram napona prikazan na slici 4. i otčitavamo napon rotacije $E'_r \doteq 58$ V. Točnije dobivamo računanjem:

$$\sin\varphi' = \frac{I'X}{U'} = 0{,}404; \quad \varphi' = 23{,}82°;$$

$$E'_r = U'\cos\varphi' - I'R = 58{,}2 \text{ V}.$$

Iz omjera napona rotacije za oba slučaja dobivamo brzinu vrtnje motora uz 110 V napona i 50% momenta opterećenja:

$$\frac{E_r}{E'_r} = \frac{cI\dfrac{n}{n_s}}{cI'\dfrac{n'}{n_s}} = \frac{In}{I'n'}; \quad n' = \frac{E'_r I_n}{E_r I'}.$$

[$n = 1\,692$ min^{-1}]

b) Moment motora priključenoga na istosmjerni, odnosno izmjenični napon iznosi:

$$M_= = \frac{p}{\pi a} w_a \Phi_{gl=} I_=, \quad M_\sim = \frac{p}{\pi a} w_a \frac{\Phi_{gl\sim}}{\sqrt{2}} I_\sim \cos\psi,$$

pri čemu je ψ fazni pomak između strujnog obloga armature i glavnoga magnetskog toka.
Prema zadatku je $M_= = M_\sim$, a kako je $\psi = 0$, to za struje vrijedi $I_= = I_\sim = 2$ A.
Inducirani napon motora priključenoga na istosmjerni napon je:

$$E_= = U - I_= R = 160 \text{ V}.$$

Iz omjera induciranih napona $E_=$ i $E_\sim$ izlazi:

$$\frac{E_=}{E_\sim} = \frac{\Phi_{gl=} n_= \sqrt{2}}{\Phi_{gl\sim} n_\sim} = \frac{I_= n_= \sqrt{2}}{\sqrt{2} I_\sim n_\sim} = \frac{n_=}{n_\sim},$$

a iz toga poznata relacija (10.4–5):

$$n_= = n_\sim \frac{E_=}{E_\sim}.$$

[$n_= = 3\,289$ min^{-1}]

4. Graničnu vrijednost magnetskog toka određujemo iz dopuštenog napona transformacije e_t u kratko spojenom svitku koji komutira. Maksimalna dopuštena vrijednost napona transformacije pri nazivnom opterećenju iznosi 3 V.

Računamo:

$$e_t = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_s \Phi_{g1}; \quad \Phi_{g1} = \frac{\sqrt{2}\, e_t}{2\pi f w_s}.$$

[$\Phi_{g1} = 0{,}0135$ Vs]

5. Spojna shema motora nacrtana je na slici 10.8–5. Budući da napon i u rotorskom i u pomoćnom namotu inducira isti tok, a nema zakretanja četkica, to je napona U_r pomoćnog namota u fazi s naponom E_{20} u rotorskom namotu, tj. $\alpha = 0°$ ili $\alpha = 180°$.

Klizanje u praznom hodu, kad u rotorskom namotu djeluje napon U_r i napon E_2, iznosi prema jednadžbi (10.8–4):

$$s_o = \frac{s_p \dfrac{U_r}{E_{20}} \cos\alpha}{s_p + \dfrac{U_r}{E_{20}} \sin\alpha} = \frac{\pm U_r}{E_{20}} = \pm 0{,}433.$$

Najmanja brzina vrtnje u praznom hodu (uz $\alpha = 0°$) je:

$$n_{min} = n_s - s_o n = 577 \text{ min}^{-1}.$$

Najveća brzina vrtnje u praznom hodu (uz $\alpha = 180°$) je:

$$n_{max} = n_s + s_o n = 1\,433 \text{ min}^{-1}.$$

[Opseg podešavanja brzine vrtnje u praznom hodu je 1 : 2,52.]

6. Prethodno se iz pojednostavnjene Klossove jednadžbe izračunava nazivno klizanje stroja kao asinhronoga (bez dodatka regulacijskog napona):

$$M_n = \frac{2M_p}{\dfrac{s_p}{s_n} + \dfrac{s_n}{s_p}};$$

$$s_n = \frac{M_p}{M_n} s_p - \sqrt{\left(\frac{M_p}{M_n} s_p\right)^2 - s_p^2} = 0{,}0229.$$

Budući da je nagib karakteristikâ u okolici točke praznog hoda praktički jednak, za klizanje se u praznom hodu može računati (s_t = klizanje pod nazivnim teretom i uz najveću brzinu vrtnje):

$$s_o = -s_t - s_n = -0{,}38 - 0{,}0229 = -0{,}4029.$$

a) Iz jednadžbe (10.8–4.a):

$$s_o = \frac{s_p o \cos\alpha}{s_p + o \sin\alpha}$$

izrazit ćemo omjer o:

$$o = \frac{s_o s_p}{s_o \sin\alpha - s_p \cos\alpha} = 0{,}5029,$$

a budući da je o omjer između regulacijskog napona U_r i napona sekundara u mirovanju E_{20}, dobivamo:

$$U_r = oE_{20}.$$

$$[U_r \doteq 60{,}4 \text{ V}]$$

b) Pretpostavivši jednaku gustoću struje u primarnim namotima i u sekundarnome, zbog zakona protjecanja vrijedi da je masa bakra regulacijskog primarnog namota o-ti dio mase glavnoga primarnog namota.

[Masa bakra regulacijskog namota je približno jednaka polovici mase glavnoga primarnog namota.]

11. ISTOSMJERNI MOTORI NAPAJANI VALOVITIM NAPONOM

Za priključak istosmjernog motora na izmjeničnu mrežu potreban je pretvarač izmjenične energije u istosmjernu. U tu svrhu može se upotrijebiti motor – istosmjerni generator (npr. Leonardov, Ward-Leonardov ili Ilgnerov pretvarač) ili ispravljački spoj. Osnovna razlika između spomenutih pretvarača je u obliku dobivenoga istosmjernog napona. Upotrebom motor-generatora na stezaljkama istosmjernoga generatora dobivamo praktički *istosmjerni napon* (male amplitude valovitosti napona relativno visoke frekvencije nastale prostornom raspodjelom namota armature i zbog kolektora mogu se zanemariti), a upotrebom ispravljačkog spoja postižemo *valoviti napon* s većim ili manjim pulsacijama. Valovitost napona ovisi o spoju ispravljača i o eventualnom upravljanju pojedinim ventilima u ispravljačkom sklopu.

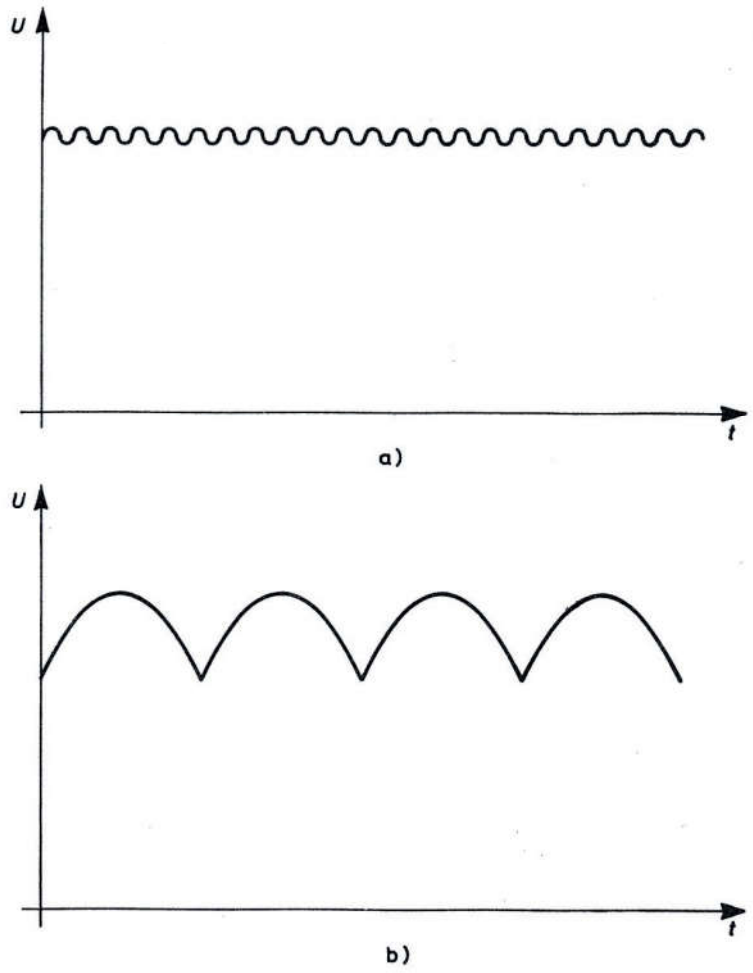
Danas se za ispravljačke spojeve upotrebljavaju suhi poluvodički silicijski ventili, i to neupravljivi zvani diode i upravljivi zvani tiristori. U novije doba za ispravljačke spojeve služe tranzistori snage za motore male snage s perspektivom upotrebe i za srednje. Srednja se vrijednost ispravljenog napona, pri upotrebi ispravljačkog sklopa, može podešavati promjenom izmjeničnog napona koji dovodimo na ispravljač (npr. prekapčanjem otcjepa na primarnoj ili sekundarnoj strani transformatora uz upotrebu diodnih ventila ili promjenom kuta paljenja djelujući na upravljačku elektrodu ventila (npr. pri izravnom priključku ispravljačkog sklopa na mrežu uz upotrebu tiristorskih ventila). Prednost prvog načina podešavanja ispravljenog napona je u manjoj valovitosti napona i struje, a nedostatak mu je nekontinuirano podešavanje i mala brzina podešavanja. Prednost drugog načina je u mogućnosti kontinuiranog podešavanja s velikom brzinom podešavanja, a nedostatak je povećanje valovitosti ispravljenog napona i struje, skuplji ispravljački ventili i loš faktor snage. Priključi li se istosmjerni motor bilo koje vrste na takav pretvarački izvor napona, moguće je njegovu brzinu vrtnje mijenjati naponom u principu na jednak način kao kad se on napaja iz Leonardova pretvarača.

U pogonu preko ispravljača treba i u mreži i u motoru računati s određenim harmoničkim članovima napona i struje, te njihovim posljedicama. Zato nekim spojevima ispravljača valja dograditi u strujne krugove prigušnice za smanjenje valovitosti struje, a konstrukciju motora prilagoditi za pogon takvom valovitom strujom, odnosno naponom. Zbog izmjenične komponente magnetskih tokova glavnih i pomoćnih polova moraju se magnetski krugovi djelomično ili potpuno izraditi od limova, kako bi se izbjegli štetni utjecaji vrtložnih struja. Na jednofaznu izmjeničnu mrežu priključuju se ispravljački pogoni kad su sasvim male snage ili kad nema višefaznog sistema (električna vuča). S porastom snage motora, pri napajanju iz jednofazne izmjenične mreže, posljedica su struje vrlo velike valovitosti; da bi se one smanjile, dodaje se prigušnica velike snage u armaturni krug. Tad jednofazni spoj postaje skup i prihvaća se samo kad nema

trofazne mreže. U uvjetima postojanja jednofazne i trofazne izmjenične mreže može se koristiti jednofaznim ispravljačkim spojem za motore nazivnog momenta do približno 100 Nm.

11.1. Osnovni pojmovi

Na slici 1.a prikazan je oblik napona u praznom hodu ostvaren pomoću motor-generatora, a na slici 1.b upotrebom ispravljačkog spoja. Osnovne pojmove vezane za napajanje istosmjernog motora iz izmjenične mreže pomoću ispravljača



Sl. 1. Oblik napona pretvarača

razmotrit ćemo na primjeru idealnog ispravljača (zanemareni otpori ispravljačkog kruga). Krivulju ispravljenog napona (vidi sl. 1.b) možemo prikazati uz pomoć Fourierova niza kao:

$$u_i = U_i + \sum_{\nu=1}^{\infty} U_\nu \sin(\omega_\nu t + \varphi_\nu), \tag{1}$$

uz:

$$U_\nu = \sqrt{A_\nu^2 + B_\nu^2}, \quad \omega_\nu = \nu m \omega_m, \quad \varphi_\nu = \text{arc tg}\frac{B_\nu}{A_\nu},$$

$$A_\nu = \frac{m\sqrt{2}U_2}{\pi} \sin\frac{\pi}{m}\left[\frac{\sin(\nu m + 1)\alpha}{\nu m + 1} - \frac{\sin(\nu m - 1)\alpha}{\nu m - 1}\right],$$

$$B_\nu = \frac{m\sqrt{2}U_2}{\pi} \sin\frac{\pi}{m}\left[\frac{\cos(\nu m + 1)\alpha}{\nu m + 1} - \frac{\cos(\nu m - 1)\alpha}{\nu m - 1}\right],$$

pri čemu je ν red harmonika, U_i srednja vrijednost ispravljenog napona [V], U_ν amplituda napona ν-tog harmonika [V], m broj anoda ispravljača [1] ili broj pulsacija za vrijeme jedne periode. Zatim, k označava red harmonika s obzirom na frekvenciju mreže [1], ω_ν kutnu brzinu (kružnu frekvenciju) ν-tog harmonika $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$, ω_m kutnu brzinu (kružnu frekvenciju) napona mreže $[\frac{\text{rad}}{\text{s}}]$, φ_ν fazni pomak ν-tog harmonika [rad], a α je kut paljenja osnovnog harmonika [rad] i U_2 efektivna vrijednost faznog napona sekundara transformatora (ili mreže) na koji se priključuje ispravljač [V].

Navedimo, bez ulaženja u teorijsko razmatranje, poznate odnose napona pri ispravljačkim spojevima. Srednja vrijednost ispravljenog napona za neki kut paljenja α je:

$$U_i = \frac{m\sqrt{2}U_2}{\pi} \sin\frac{\pi}{m}\cos\alpha \quad [\text{V}]. \tag{2}$$

Omjer srednje vrijednosti ispravljenog napona i efektivne vrijednosti faznog napona transformatora pri kutu paljenja $\alpha = 0$ (otvorena rešetka ili zasun) za m-fazne ispravljačke spojeve, prikazan je u tablici na slici 2. Omjer je maksimalne i srednje vrijednosti ispravljenog napona:

$$\frac{U_{i\max}}{U_i} = \frac{\sqrt{2}U_2}{U_i} = \frac{\pi}{m \sin\frac{\pi}{m}\cos\alpha}. \tag{3}$$

m	2	3	6	12
$\frac{U_i}{U_2}$	0,9	1,17	1,35	1,4

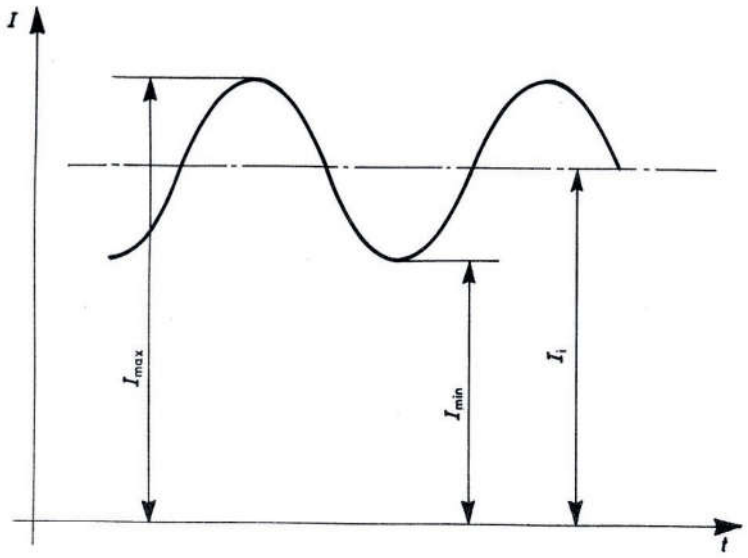
Sl. 2. Omjer srednje vrijednosti ispravljenog napona i efektivne vrijednosti faznog napona priključka ispravljača

Valovitost k-tog harmonika nekog parametra (napona, struje, magnetskog toka itd.) je omjer vrijednosti amplitude tog harmonika i srednje ispravljene vrijednosti tog parametra. Valovitost napona v_{uk}, struje v_{ik}, magnetskog toka $v_{\Phi k}$, struje magnetiziranja $v_{\mu k}$ iznosi:

$$v_{uk} = \frac{U_k}{U_i}; \quad v_{ik} = \frac{I_k}{I_i}; \quad v_{\Phi k} = \frac{\Phi_k}{\Phi_i}; \quad v_{\mu k} = \frac{I_{\mu k}}{I_{\mu i}} \quad [1] \tag{4}$$

Kad neki parametar sadrži više harmoničkih redova, pa mu oblik nije sinusan, određuje mu se valovitost kao npr. za struju uz oznake na slici 3:

$$v_i = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \tag{5}$$



Sl. 3. Objašnjenje valovitosti struje

Da bismo dobili uvid u to koje harmoničke članove napona i struje, i u kojem iznosu, ima određeni ispravljački spoj, priključit ćemo na idealni ispravljač alternativno istosmjerni nezavisno uzbuđen kompenziran i nekompenziran motor. Induktivitet armaturnoga strujnog kruga nezavisno uzbuđenog motora [L 14] iznosi približno:

$$L_a = c \frac{30\, U_n}{I_n \pi n_n p} \text{ [H]}. \tag{6}$$

Tu je U_n nazivni napon motora [V], I_n nazivna struja motora [A] i c je konstanta [1], a iznosi $\approx 0{,}6$ za nekompenziran motor i $\approx 0{,}15$ za kompenzirani motor.

Induktivni otpor armaturnog kruga za k-ti harmonik bit će:

$$X_{ak} = 2\pi f_k L_a \text{ [}\Omega\text{]}. \tag{7}$$

Amplituda struje k-tog harmonika, zanemarimo li radni otpor i pretpostavimo li da se induktivitet ne mijenja s frekvencijom, iznosi:

$$I_{ak} = \frac{U_k}{X_{ak}}. \tag{8}$$

Uvrste li se izrazi (6) u (7) i (7) u (8), te uz frekvenciju rotora (istosmjerno napajanje) $f_i = \frac{pn_n}{60}$, frekvenciju k-tog harmonika $f_k = kf_m$ i $U_k = U_i v_{uk}$, dobivamo:

$$I_{ak} = \frac{v_{uk} f_i}{ckf_m} I_n.$$

Valovitost struje armature uz $I_n = I_{ai}$ je:

$$v_{ik} = \frac{I_{ak}}{I_{ai}} = \frac{v_{uk} f_i}{ckf_m}.$$

Kad je razmatrani motor još i četveropolni za brzinu vrtnje od 1 500 min^{-1}, onda pri priključku ispravljača na mrežu frekvencije od 50 Hz dobivamo $f_i = f_m$, a valovitost struje armature iznosi:

$$v_{ik} = \frac{v_{ak}}{ck} \quad [1]. \tag{9}$$

U tablici na slici 4. za razne su spojeve ispravljača prikazane vrijednosti $\frac{U_{imax}}{U_i}$ i valovitost napona v_{uk} za primjer kuta paljenja $\alpha = 0$ (otvoren zasun), te valovitost napona v_{uk} i valovitost struje v_{ik} kompenziranog i nekompenziranog

m	ν	k	Otvoren zasun ($\alpha = 0$)		Zatvoren zasun ($\alpha = 90°$), srednji napon nula		
			$\frac{U_{imax}}{U_i}$	ν_{uk}	ν_{uk}	nekompenzirani motor ν_{ik}	kompenzirani motor ν_{ik}
			%	%	%	%	%
2	1	2	157	66,7	133,3	111,1	444,4
	2	4		13,3	–	–	–
	3	6		5,71	34,3	9,53	38,1
	4	8		3,17	–	–	–
	5	10		2,02	20,2	3,37	13,47
3	1	3	121	25	75	41,7	166,7
	2	6		5,71	–	–	–
	3	9		2,5	22,5	4,17	16,7
	4	12		1,4	–	–	–
	5	15		0,89	13,4	1,49	5,95
6	1	6	104,7	5,71	34,3	9,53	38,1
	2	12		1,4	–	–	–
	3	18		0,62	11,1	1,03	4,11
	4	24		0,35	–	–	–
	5	30		–	6,7	0,37	1,49

Sl. 4. Valovitost napona i struja harmonika za razne spojeve ispravljača

motora u primjeru kuta paljenja od 90° (zatvoren zasun – srednji ispravljeni napon jednak nuli).

Analizom vrijednosti promjene pojedinih parametara iz tablice na slici 3. može se donijeti više zaključaka o ponašanju istosmjernih strojeva pri napajanju iz izvora valovitog napona. Prvo, s povećanjem kuta paljenja α rastu valovitost napona i struje. Uočljiva je razlika u podešavanju srednje vrijednosti ispravljenog napona promjenom vrijednosti izmjeničnog napona (uvijek je kut paljenja $\alpha = 0$) u usporedbi s podešavanjem vrijednosti ispravljenog napona mijenjanjem kuta paljenja α. Drugo, s povećanjem reda harmonika pri kutovima paljenja $\alpha = 0$ i $\alpha = 90°$ naglo se smanjuje valovitost napona, a još brže valovitost struje. Iz toga izlazi da u daljnjim razmatranjima možemo uzeti u obzir samo harmonički član s $\nu = 1$. Treće, s porastom broja faza (i anoda) naglo se smanjuje valovitost napona i struje. Iz toga zaključujemo da s povećanjem broja faza (i anoda) pri određenim veličinama motora nije potrebno dograđivati prigušnicu u armaturni strujni krug. Četvrto, uz jednaku valovitost napona, kompenziranim motorima (manji induktivitet) svojstvena je veća valovitost struje u usporedbi s nekompenziranim motorima.

Dosadašnja razmatranja provedena su na primjeru idealnog ispravljača (zanemareni otpori ispravljačkog kruga). Pri stvarnom ispravljaču, kad su svi otpori u ispravljačkom krugu, srednja će vrijednost ispravljenog napona na motoru biti:

$$U_m = U_i - I_{ai}\left(\frac{X_t m}{2\pi} + R_t + R_p\right) - \Delta U_i \quad [V]. \tag{10}$$

Pri tome je $I_{ai}\dfrac{X_t m}{2\pi}$ pad napona u kojem se uzima u obzir prekrivanje anoda [V], X_t ukupni induktivni otpor faze transformatora reduciran na sekundar [Ω], a R_t je radni otpor faze sekundara transformatora [Ω]. Zatim, R_p izražava radni otpor prigušnice [Ω], ΔU_i pad napona u ispravljačkom ventilu [V] i I_{ai} srednju vrijednost ispravljene struje [A].

Elektromagnetsko stanje motora napajanoga iz izvora valovitog napona možemo razmatrati kao superpoziciju istosmjerne i izmjenične (harmonik reda $\nu = 1$, odnosno $k = m\nu$) komponente.

Istosmjerna komponenta elektromagnetskog stanja motora u valovitom napajanju određena je srednjim ispravljenim vrijednostima napona, struje, te magnetskim tokovima glavnih i pomoćnih polova, a poznata je iz dosad provedenih teorijskih razmatranja o istosmjernim strojevima.

Izmjeničnu komponentu elektromagnetskog stanja motora u valovitom napajanju razmotrit ćemo na osnovi priključka armaturnog kruga na izmjenični napon amplitudne vrijednosti U_k, a pri nezavisno uzbuđenom motoru još i uz priključak uzbude na izmjenični napon amplitudne vrijednosti U_{uk}.

Pri *nezavisno uzbuđenome motoru*, priključimo li armaturni strujni krug na izmjenični napon, dobivamo izmjeničnu struju armature i izmjenični magnetski

tok pomoćnih polova, a u magnetskom krugu pomoćnih polova nastaju vrtložne struje (ovisno o izvedbi magnetskog kruga), pa magnetski tok pomoćnih polova nije u fazi sa strujom. Da bi se smanjila izmjenična komponenta struje i magnetskog toka pomoćnih polova, u armaturni se krug (pri određenim veličinama motora, ispravljačkim spojevima i izvedbama magnetskog kruga) dograđuju prigušnice. Priključimo li namot nezavisne uzbude na izmjenični napon, imamo izmjeničnu uzbudnu struju i izmjenični magnetski tok glavnih polova pa u magnetskom krugu glavnih polova nastaju vrtložne struje (ovisno o izvedbi magnetskog kruga), a magnetski tok glavnih polova nije u fazi sa strujom nezavisne uzbude. Kad je namotu nezavisne uzbude namijenjen kvalitetniji ispravljački spoj (više faza i veći broj anoda), izmjenična je komponenta struje uzbudnog kruga relativno mala, pa se smije zanemariti izmjenična komponenta glavnoga magnetskog toka i njezine posljedice.

Serijski uzbuđenome motoru uzbudni je namot električki spojen u armaturni strujni krug. Uz priključak armaturnog kruga na izmjenični napon dobivamo izmjeničnu struju armature, izmjenični magnetski tok glavnih i pomoćnih polova, u magnetskim krugovima nastaju vrtložne struje (ovisno o izvedbi magnetskih krugova), a magnetski tokovi glavnih i pomoćnih polova nisu u fazi sa strujom. Spajanjem uzbudnog namota u armaturni strujni krug porastao je ukupni induktivni otpor armaturnog kruga. To bi u načelu značilo izvjesno poboljšanje u pogledu smanjenja izmjenične komponente struje, no i ta smanjena vrijednost izmjenične komponente struje uzrokuje izmjenični magnetski tok glavnih i pomoćnih polova i, dalje, neugodne posljedice u smislu vrtložnih struja i otežane komutacije. Često se zato u spoju s ispravljačima uzbudni namot šantira omskim otporom, čime se uzbudni namot oslobađa harmoničkih članova struje. Budući da se struja pred uzbudnim namotom grana u onu kroz uzbudni namot i onu kroz šant, to praktički valoviti (izmjenični) dio prođe kroz šant jer mu taj ne suprotstavlja induktivni otpor, pa dio struje kroz uzbudni namot ostane gotovo potpuno gladak. Time se, doduše, povećava izmjenična komponenta struje u cijelome armaturnom krugu, jer je induktivitet uzbudnog namota iz njega praktički isključen, ali se postiže da izmjenična komponenta struje ne utječe na glavni magnetski tok motora. Da bi se smanjila izmjenična komponenta struje i magnetskog toka pomoćnih polova, uz šantirani uzbudni namot u armaturni se strujni krug dograđuje prigušnica.

Uslijed izmjenične komponente napona, struje, magnetskog toka glavnih i pomoćnih polova u motoru, bez obzira na vrstu, povećava se srednji i maksimalni napon između kolektorskih lamela, zatim raste strujno opterećenje, povećavaju se gubici u željezu i vodičima namota, raste pulsacijski razvijeni moment u zračnom rasporu, a smanjuje se korisni moment na osovini i otežana je komutacija. U svitku koji komutira inducira se napon samoindukcije (približno u fazi sa strujom), napon uzrokovan magnetskim tokom u zračnom rasporu pomoćnih polova i napon transformacije izazvan magnetskim tokom glavnih polova, svi s frekvencijom razmatranoga harmoničkog člana. Suma tih napona nije jednaka nuli, već se pojavljuje određena vrijednost nekompenziranog napona, koja pogoršava komutaciju.

Koje posljedice izmjenične komponente i u kojem će se intenzitetu pojaviti u motoru napajanome iz izvora valovitog napona, ovisi o: vrsti motora (nezavisni, poredni, serijski), konstrukcijskoj izvedbi magnetskog kruga glavnih i pomoćnih polova (masivni, lamelirani), vrsti ispravljačkog spoja (broj faza i anoda) i o načinu smanjenja valovitosti (šantiranje namota serijske uzbude, dogradnja prigušnice u armaturni strujni krug).

11.2. Moment motora

Razvijeni moment u zračnom rasporu pri napajanju istosmjernog motora iz izmjenične mreže, razmotrit ćemo u općem primjeru kad se za armaturni strujni krug upotrebljava ispravljački spoj s harmoničkim članovima reda k_a, različit od ispravljačkog spoja uzbudnoga strujnog kruga s harmoničkim članovima reda k_u. Opći izraz za struju armaturnoga strujnog kruga je:

$$I_a(t) = I_{ai}(1 + \Sigma v_{ika} \sin k_a \omega t), \tag{1}$$

a za magnetski tok u zračnom rasporu glavnih polova:

$$\Phi_{gl}(t) = \Phi_{gli}[1 + \Sigma v_{\Phi ku} \sin(k_u \omega t + \varphi)]. \tag{2}$$

Pri tome je I_{ai} srednja vrijednost ispravljene struje armaturnog kruga [A], Φ_{gli} istosmjerna komponenta magnetskog toka u zračnom rasporu glavnih polova [Vs] i v_{ika} je valovitost struje armaturnog kruga za k_a-ti harmonik [1]. $v_{\Phi ku}$ označava valovitost magnetskog toka u zračnom rasporu glavnih polova za k_u-ti harmonik [1], a φ je kut između izmjenične komponente struje armaturnog kruga i izmjenične komponente magnetskog toka u zračnom rasporu glavnih polova [rad].

Opći izraz za razvijeni moment motora u zračnom rasporu, uz upotrebu izraza (4.2–4), glasi:

$$M(t) = k_m \Phi_{gl}(t) I_a(t),$$

a uvrštenjem izraza (1) i (2) dobivamo:

$$M(t) = k_m \Phi_{gli} I_{ai} + k_m I_{ai} v_{\Phi ku} \Phi_{gli} \sin(k_u \omega t + \varphi) + k_m \Phi_{gli} v_{ika} I_{ai} \sin k_a \omega t + k_m v_{ika} I_{ai} v_{\Phi ku} \Phi_{gli} \sin k_a \omega t \sin(k_u \omega t + \varphi), \tag{3}$$

pri čemu je $k_m = \frac{pz}{2a\pi}$.

Iz relacije (3) vidimo da se razvijeni moment motora pri valovitom napajanju sastoji od četiri pribrojnika, koje valja posebno analizirati.

Prvi pribrojnik, $M_1(t) = k_m \Phi_{gli} I_{ai}$, izražava istosmjernu komponentu momenta, koja nastaje od istosmjerne komponente struje armature i istosmjerne komponente glavnoga magnetskog toka.

Drugi pribrojnik, $M_2(t) = k_m I_{ai} v_{\Phi ku} \Phi_{gli} \sin(k_u \omega t + \varphi)$, označava izmjenične komponente momenta, koje nastaju od istosmjerne komponente struje armature i izmjeničnih komponenata harmoničkih članova magnetskog toka u zračnom rasporu glavnih polova. Te izmjenične komponente momenta imaju kružnu frekvenciju $k_u\omega$, a srednja vrijednost kroz jednu periodu im je nula. Nezavisno uzbuđenim motorima s kvalitetnijim spojem ispravljača i serijski uzbuđenim motorima sa šantiranim uzbudnim namotom, zbog male valovitosti glavnoga magnetskog toka, mogu se zanemariti izmjenične komponente momenta M_2.

Treći pribrojnik, $M_3(t) = k_m \Phi_{gli} v_{ika} I_{ai} \sin k_a \omega t$, izražava izmjenične komponente momenta, koje nastaju od istosmjerne komponente glavnoga magnetskog toka i izmjeničnih komponenata harmoničkih članova struje armature. Te izmjenične komponente momenta imaju kružnu frekvenciju $k_a\omega$, a srednja vrijednost kroz jednu periodu im je nula. Amplitudne vrijednosti pojedinih harmonika momenta M_3 jednake su amplitudnim vrijednostima struje tih istih harmonika u armaturnom krugu.

Četvrti pribrojnik, $M_4(t) = k_m v_{ika} I_{ai} v_{\Phi ku} \Phi_{gli} \sin k_a \omega t \cdot \sin(k_u \omega t + \varphi)$, nastaje od izmjeničnih komponenata struje armature i izmjeničnih komponenata glavnoga magnetskog toka, a možemo ga pisati kao:

$$M_4(t) = \frac{1}{2} k_m v_{ika} I_{ai} v_{\Phi ku} \Phi_{gli} \{\cos\varphi [\cos\omega t(k_a - k_u) - \cos\omega t(k_a + k_u)] + \sin\varphi [\sin\omega t(k_a - k_u) + \sin\omega t(k_a + k_u)]\}. \quad (4)$$

S k_a i k_u cijelim brojevima, uz $k_a \neq k_u$, uvijek je $\sin[2\pi(k_a \pm k_u)]$ jednak nuli, a $\cos[2\pi(k_a \pm k_u)]$ jednak jedan, pa je srednja vremenska vrijednost momenta nula. To znači da harmonički članovi struje armature i glavnoga magnetskog toka različitih kružnih frekvencija daju samo izmjenične komponente momenta kojih je srednja vrijednost jednaka nuli. Kad je $k_a = k_u$, iz relacije (4) izlazi:

$$M_4(t) = \frac{1}{2} k_m v_{ika} I_{ai} v_{\Phi ku} \Phi_{gli} [\cos\varphi (1 - \cos 2k_a \omega t) + \sin\varphi \sin 2k_a \omega t], \quad (5)$$

što se sastoji od istosmjerne komponente i izmjenične komponente s dvostrukom kružnom frekvencijom harmoničkih članova struje armature (ili glavnoga magnetskog toka). Vremenska srednja vrijednost (istosmjerna komponenta) momenta $M_4(t)$ je:

$$M_{4sr} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M_4(t)\, dt = \frac{1}{2} k_m v_{ika} I_{ai} v_{\Phi ku} \Phi_{gli} \cos\varphi. \quad (6)$$

Motorima s malom valovitosti glavnoga magnetskog toka i kutom između izmjenične komponente struje armaturnog kruga te izmjenične komponente glavnoga magnetskog toka $\varphi \approx \frac{\pi}{2}$, može se zanemariti istosmjerna komponenta momenta M_4, a izmjenična je komponenta momenta M_4 s dvostrukom kružnom frekvencijom harmoničkih članova praktički zanemarivog iznosa. Kad to nije

tako, istosmjerna komponenta momenta M_4 zna dostići i do 8% istosmjerne komponente momenta M_1, no tad se pojavljuju teškoće u komutaciji.

Na osnovi provedenog razmatranja možemo opći izraz za razvijeni moment motora u zračnom rasporu prema relaciji (3), uz dovoljnu točnost za tehnički račun, pisati:

$$M(t) = k_m \Phi_{gli} I_{ai}[(1 + 0{,}5 v_{ika} v_{\Phi ku} \cos\varphi) + v_{ika} \sin k_a \omega t]$$

ili:

$$M(t) = M_i[(1 + 0{,}5 v_{ika} v_{\Phi ku} \cos\varphi) + v_{ika} \sin k_a \omega t]. \quad (7)$$

Kad su motori napajani iz izvora valovitog napona, ostvaruje se neznatno povećanje srednje vrijednosti razvijenog momenta u odnosu prema istosmjernom napajanju, no ne smije se zaboraviti da pri valovitom napajanju rastu gubici, pa je ukupni korisni moment motora na osovini redovito nešto manji nego pri istosmjernom napajanju. Za jednake srednje vrijednosti momenata motora pri valovitome i istosmjernom napajanju nastaju veće trenutne vrijednosti momenta valovito napajanome motoru (ovisno o valovitosti struje armaturnog kruga), pa pri tako napajanim motorima valja obratiti pažnju na učvršćenje namota, izolaciju, te učvršćenje paketa limova armature i kolektora na osovinu. Izmjenična komponenta momenta s frekvencijom harmonika struje armature može izazvati neželjene torzione vibracije osovine, a i rezonanciju s pokretnim dijelovima radnog mehanizma. Pri ekscentričnom položaju rotora, u statoru nastaju sile jednostranoga magnetskog privlačenja, koje pri istosmjernom napajanju uzrokuju kružno kretanje progiba (precesija) osovine proporcionalno frekvenciji koju određuje brzina vrtnje. Motorima napajanima iz izvora valovitog napona s većom valovitosti glavnoga magnetskog toka, moguća su kružna kretanja osovine proporcionalno frekvenciji harmonika glavnoga magnetskog toka, pa valja obratiti pažnju na moguću pojavu rezonancije.

11.3. Elektromagnetske pojave pri valovitom napajanju

Pri valovitom napajanju, na veličine u magnetskom krugu motora električke veličine djeluju nešto drukčije nego pri istosmjernom napajanju, pa ćemo magnetski krug stroja nazvati elektromagnetski krug.

Elektromagnetski krug motora pri valovitom napajanju ima svoje specifičnosti koje proizlaze iz istodobnog djelovanja istosmjerne i izmjenične komponente električnog i magnetskog polja. Istodobnim djelovanjem istosmjerne i izmjenične komponente jakosti magnetskog polja, dolazimo do pojma pulsacijskoga magnetskog permeabiliteta (protumačeno poslije), koji se za red veličine razlikuje od poznatoga magnetskog permeabiliteta pri istosmjernom napajanju. Zbog izmjenične komponente u feromagnetskim dijelovima magnetskog kruga nastaju vrtložne struje, protjecanje kojih se mora pokriti protjecanjem iz električkog kruga, i magnetska indukcija nije u fazi s magnetskim poljem, pa pulsacijski magnetski permeabilitet i magnetski otpori postaju kompleksne veličine. Zbog

izmjenične komponente magnetskog toka u raznim podlogama i okvirima, koji se nalaze u magnetskom polju ili obuhvaćaju magnetski tok, pojavljuju se vrtložne struje, protjecanje kojih se također mora pokriti protjecanjem iz električnog kruga. Iz spomenutih razloga, izmjenična komponenta magnetskog toka zaostaje u fazi za izmjeničnom komponentom protjecanja namota koji je stvorio taj magnetski tok, a fazni pomak ovisi o izvedbi magnetskog kruga.

Posljedice tih fizikalnih zbivanja u elektromagnetskom krugu su dodatni gubici u njemu i nastanak nekompenziranog napona svitka u komutaciji, što će biti obrazloženo u odjeljku 11.6.

11.3.1. Odnosi električnih i magnetskih parametara

U ulančenome elektromagnetskom krugu imamo kompleksni električni otpor u električnom krugu i kompleksni magnetski otpor u magnetskom krugu, pa među njihovim parametrima vladaju određeni odnosi.

Kompleksni električni otpor u električkom krugu sastoji se od radnog otpora R_e i induktivnog otpora X_e, a iznosi:

$$\overline{Z}_e = R_e + jX_e = Z_e e^{j\varphi}\ [\Omega]. \tag{1}$$

Po analogiji na električni krug imamo u magnetskom krugu kompleksni magnetski otpor, koji se sastoji od radnog otpora R_m i induktivnog otpora X_m. Za kompleksni magnetski otpor možemo pisati:

$$\overline{Z}_m = R_m + jX_m = Z_m e^{j\psi}\left[\frac{A}{Vs}\right]. \tag{2}$$

Razmotrimo elektromagnetski krug s feromagnetskim materijalom na kojem se nalazi uzbudni namot s w zavoja. Za daljnje tumačenje zanemarimo pad napona na radnom i rasipnom induktivnom otporu uzbudnog namota. Priključkom uzbudnog namota na izmjenični napon U, zbog rezultantnog protjecanja $\overline{\Theta}_\mu = \overline{\Theta} - \overline{\Theta}_v$ (protjecanje uzbudnog namota smanjeno za protjecanje vrtložnih struja), u magnetskom se krugu uspotavlja izmjenični magnetski tok Φ. Izmjenični magnetski tok Φ, s jedne strane, u uzbudnom namotu inducira napon E, koji drži ravnotežu narinutom naponu U, a, s druge strane, u feromagnetskome materijalu inducira napon, odnosno vrtložnu struju I_v, tako da je struja svitka $\overline{I} = \overline{I}_\mu + \overline{I}_v$, kao što je prikazano na slici 1. Ravnotežu narinutom naponu U na uzbudni namot održava inducirani napon, tj.:

$$\overline{U} = -\overline{E} = j\omega w\overline{\Phi}. \tag{3}$$

Kompleksni električni otpor uzbudnog namota, zanemarimo li radni i rasipni induktivni otpor, iznosi:

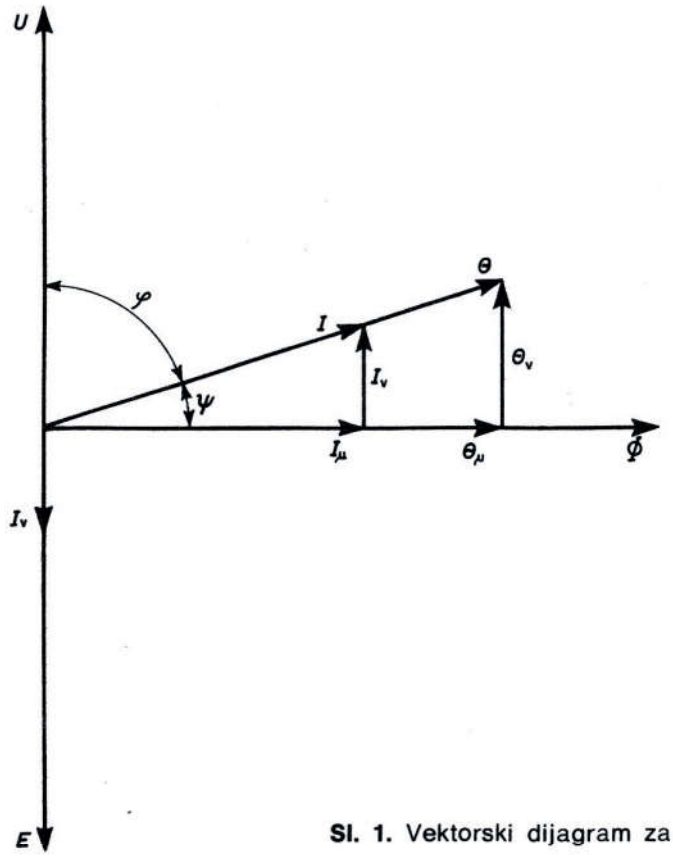
$$\overline{Z}_e = \frac{\overline{U}}{\overline{I}} = Z_e e^{j\varphi}. \tag{4}$$

Kompleksni će magnetski otpor biti:

$$\overline{Z}_{\mathrm{m}} = \frac{\overline{\Theta}}{\overline{\Phi}}, \tag{5}$$

a uz realnu os koordinatnog sustava u smjeru struje I i $\psi = \frac{\pi}{2} - \varphi$, te upotrijebivši izraze (3) i (4) dobivamo:

$$\overline{Z}_{\mathrm{m}} = \mathrm{j}\omega w \frac{\overline{I}w}{\overline{U}} = \mathrm{j}\frac{\omega w^2}{Z_{\mathrm{e}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}} = \frac{\omega w^2}{Z_{\mathrm{e}}}\mathrm{e}^{\mathrm{j}\psi} = \frac{\omega w^2}{Z_{\mathrm{e}}}\cos\psi + \mathrm{j}\frac{\omega w^2}{Z_{\mathrm{e}}}\sin\psi. \tag{6}$$



Sl. 1. Vektorski dijagram za objašnjenje elektromagnetskog kruga

Radna komponenta magnetskog otpora iznosi:

$$R_{\mathrm{m}} = \frac{\omega w^2}{Z_{\mathrm{e}}}\cos\psi = \frac{\omega w^2}{Z_{\mathrm{e}}}\sin\psi = \omega w^2 B_{\mathrm{e}}\left[\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{Vs}}\right], \tag{7}$$

pri čemu je B_{e} induktivna vodljivost električnog kruga $\left[\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{V}}\right]$.
Induktivna komponenta magnetskog otpora je:

$$X_{\mathrm{m}} = \frac{\omega w^2}{Z_{\mathrm{e}}}\sin\psi = \frac{\omega w^2}{Z_{\mathrm{e}}}\cos\varphi = \omega w^2 G_{\mathrm{e}}\left[\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{Vs}}\right], \tag{8}$$

a tu je G_{e} radna vodljivost električnog kruga $[\mathrm{AV}^{-1}]$.

Iz provedenog razmatranja elektromagnetskog kruga pri izmjeničnome magnetiziranju zaključujemo da radni otpor magnetskog kruga određuje induktivnu vodljivost električnom krugu, odnosno da induktivni otpor magnetskog kruga određuje radnu vodljivost električnom krugu. Tim zaključcima koristi se u elektromagnetskom proračunu i određivanju parametara magnetskog kruga na osnovi izmjerenih parametara električnog kruga. Razmotrimo to na primjeru određivanja gubitaka magnetskog kruga.

Gubici u feromagnetskom materijalu razmatranoga magnetskog kruga, nastali zbog izmjeničnoga magnetskog toka, pokrivaju se iz električnog kruga i iznose:

$$P_{\mathrm{Fe}} = EI\cos\varphi .$$

Uvrstimo li relacije (3) i (5), $\cos\varphi = \sin\psi$ i $\Theta = Iw$ u prethodni izraz, dobivamo za gubitke magnetskog kruga:

$$P_{\mathrm{Fe}} = \omega\Phi\Theta\sin\psi = \omega\Phi^2 Z_{\mathrm{m}}\sin\psi = \omega\Phi^2 X_{\mathrm{m}} = \omega\Phi^2 R_{\mathrm{m}}\mathrm{tg}\,\psi . \tag{9}$$

11.3.2. Pulsacijski magnetski permeabilitet

Magnetska karakteristika feromagnetskog materijala osnovni je parametar koji utječe na tok elektromagnetskih procesa električkih strojeva, a pri istosmjernom ili izmjeničnome magnetiziranju predstavlja se poznatom karakteristikom magnetiziranja $B(H)$ i magnetskim permeabilitetom $\mu(H)$. Na slici 2. prikazana je karakteristika istosmjernog magnetiziranja (krivulja 1), dobivena nakon demagnetiziranog stanja, te ulazna karakteristika magnetiziranja (krivulja 2) i silazna karakteristika magnetiziranja (krivulja 3) pri izmjeničnome magnetiziranju.

Pri magnetiziranju valovitom strujom nastaje valovito magnetsko polje, a jakost magnetskog polja H i magnetska indukcija B takva polja sadrže istosmjernu i izmjeničnu komponentu, pri čemu svaka od komponenata magnetske indukcije ovisi o objema komponentama jakosti magnetskog polja. Na slici 2. predočeno je valovito magnetiziranje koje sadrži istosmjernu komponentu jakosti magnetskog polja H_{i} i izmjeničnu komponentu jakosti magnetskog polja H_{k}. Pri tome se ukupna jakost magnetskog polja mijenja od vrijednosti H_{A} do H_{B}, a magnetske indukcije od vrijednosti B_{A} do B_{B}. U jednoj periodi izmjenične komponente nastaje petlja histereze, kao što je debelom linijom prikazano na slici 2. Budući da je petlja histereze relativno uska, možemo je predočiti pravcem kroz točke A i B, na kojem, za istosmjernu komponentu jakosti magnetskog polja H_{i}, dobivamo točku C.

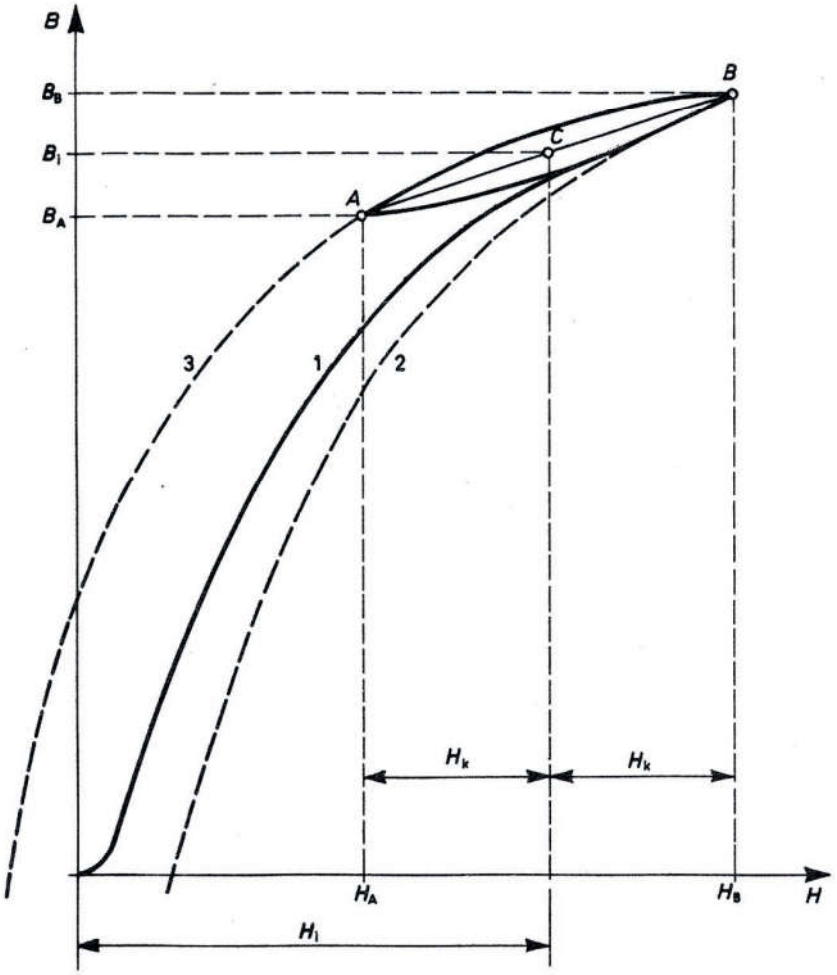
Magnetski permeabilitet za istosmjernu komponentu, uz oznake na slici 2, bit će:

$$\mu = \frac{B_{\mathrm{i}}}{H_{\mathrm{i}}} = \frac{B_{\mathrm{A}} + B_{\mathrm{B}}}{H_{\mathrm{A}} + H_{\mathrm{B}}} . \tag{10}$$

Magnetski permeabilitet za izmjeničnu komponentu, koji nazivamo pulsacijski magnetski permeabilitet, uz oznake na slici 2, iznosi:

$$\mu_p = \frac{B_k}{H_k} = \frac{B_B - B_A}{H_B - H_A}. \tag{11}$$

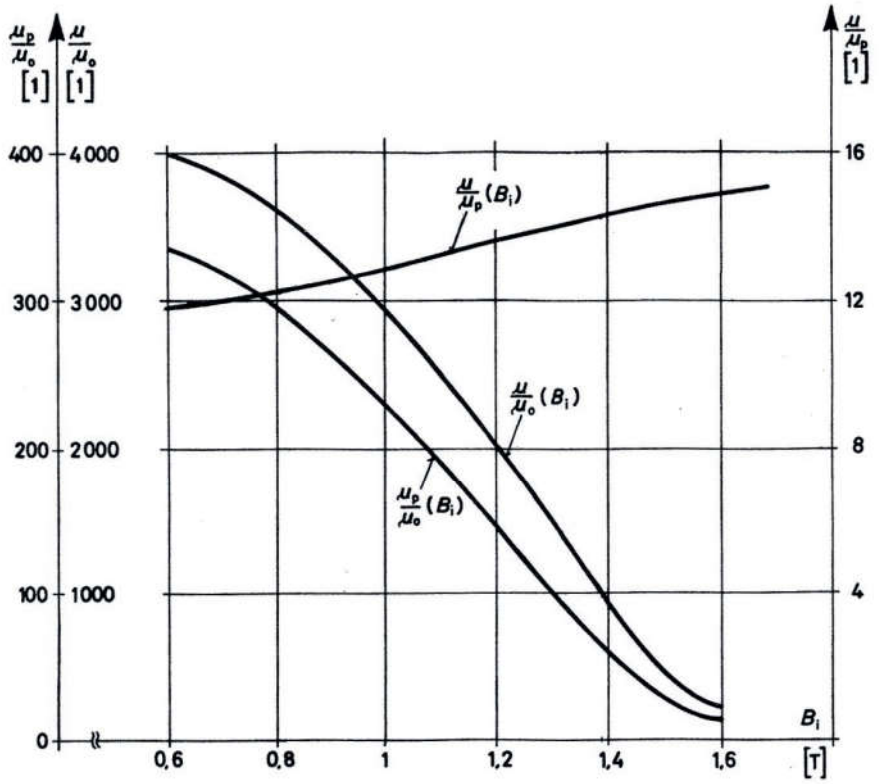
Iz slike 2. se vidi da pulsacijski magnetski permeabilitet ovisi o jakosti magnetskog polja istosmjerne komponente (dakle o položaju radne točke na karakteristici magnetiziranja) i o izmjeničnoj komponenti jakosti magnetskog polja (znači, o valovitosti struje magnetiziranja).



Sl. 2. Objašnjenje pulsacijskoga magnetskog permeabiliteta pri valovitom magnetiziranju

Iz praktičkih razloga za elektromagnetske proračune se pulsacijski magnetski permeabilitet prikazuje ovisno o istosmjernoj komponenti magnetske indukcije B_i za razne vrijednosti valovitosti jačine magnetskog polja $\frac{H_k}{H_i}$. Na slici 3. vrijednosti su relativnoga magnetskog permeabiliteta $\frac{\mu}{\mu_o}$ za istosmjernu komponentu i relativnoga pulsacijskog magnetskog permeabiliteta $\frac{\mu_p}{\mu_o}$ za

izmjeničnu komponentu te njihov omjer $\frac{\mu}{\mu_p}$, sve uz 20 %-tnu valovitost jačine magnetskog polja, za jednu kvalitetu magnetskog lima. Usporedbom vrijednosti magnetskog permeabiliteta za istosmjernu i izmjeničnu komponentu zaključuje se da su vrijednosti pulsacijskoga magnetskog permeabiliteta za red veličine manje od vrijednosti magnetskog permeabiliteta (za istosmjerno magnetiziranje), te da feromagnetski materijal pruža znatno veći magnetski otpor izmjeničnoj komponenti nego istosmjernoj komponenti, bez obzira na to jesu li ili koliko su u tom materijalu prisutne vrtložne struje.



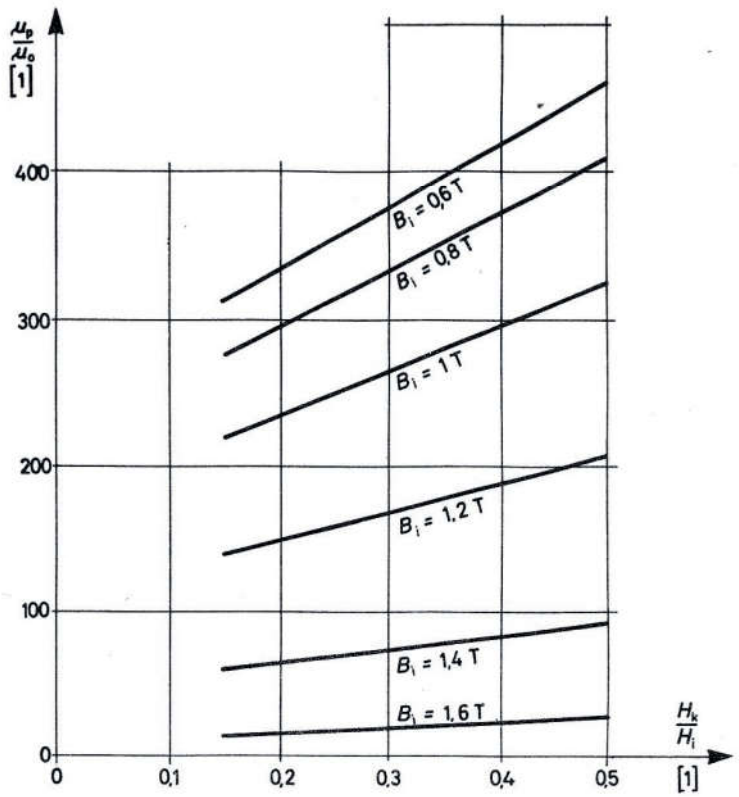
Sl. 3. Relativni magnetski permeabilitet $\frac{\mu}{\mu_o}$, relativni pulsacijski magnetski permeabilitet $\frac{\mu_p}{\mu_o}$ i njihov omjer $\frac{\mu}{\mu_p}$ ovisno o magnetskoj indukciji B_i

S porastom valovitosti jakosti magnetskog polja, uz jednaku vrijednost istosmjerne komponente magnetske indukcije, povećava se vrijednost pulsacijskoga magnetskog permeabiliteta. Na slici 4. prikazan je relativni pulsacijski magnetski permeabilitet $\frac{\mu_p}{\mu_o}$ ovisno o valovitosti jakosti magnetskog polja $\frac{H_k}{H_i}$ za razne vrijednosti magnetske indukcije B_i istosmjerne komponente.

Zbog izmjenične komponente valovitog magnetiziranja, u feromagnetskom materijalu nastaju gubici histereze i vrtložnih struja, pa magnetska indukcija B_k izmjenične komponente fazno zaostaje za kut ψ_μ prema izmjeničnoj komponenti jakosti magnetskog polja H_k. Pulsacijski magnetski permeabilitet postaje kompleksna veličina, a iznosi:

$$\underline{\mu}_p = \frac{\underline{B}_k}{\underline{H}_k} = \mu_p e^{-j\psi_\mu} \left[\frac{Vs}{Am}\right]. \tag{12}$$

Vrijednosti modula μ_p i argumenta ψ_μ pulsacijskoga magnetskog permeabiliteta ovisno o indukciji B_i istosmjerne komponente, za razne su feromagnetske materijale prikazane u odjeljku 11.3.3. na slici 8.



Sl. 4. Relativni pulsacijski permeabilitet ovisno o valovitosti jakosti magnetskog polja za razne vrijednosti magnetske indukcije B_i.

Vrijednosti argumenta ψ_μ pulsacijskoga magnetskog permeabiliteta to su veće što su veći gubici u feromagnetskome materijalu, a smanjuju se s porastom indukcije B_i istosmjerne komponente, jer se smanjuje utjecaj gubitaka histereze (manja površina petlje histereze izmjenične komponente) na ukupne gubitke. Argument ψ_μ pulsacijskoga magnetskog permeabiliteta neznatno se povećava s porastom valovitosti jakosti magnetskog polja $\frac{H_k}{H_i}$, a u području valovitosti do 60% može se smatrati konstantnim.

Provedena ispitivanja [L 41] ovisnosti pulsacijskoga magnetskog permeabiliteta o frekvenciji izmjenične komponente pokazuju da s porastom frekvencije dolazi do neznatnog smanjenja modula μ_p i argumenta ψ_μ. U području frekvencija od 50 do 300 Hz može se smatrati da su μ_p i ψ_μ konstantne veličine.

11.3.3. Magnetski otpori

Za određivanje izmjenične komponente magnetskog toka, uz poznato protjecanje izmjenične komponente, potrebno je poznavati magnetske otpore pojedinih dijelova magnetskog kruga. Magnetski otpori ovise o karakteristikama materijala, obliku (mjerama) promatranog dijela i konstrukcijsko-tehnološkoj izvedbi (nastajanje vrtložnih struja). Magnetski krug istosmjernog stroja može se u osnovi podijeliti na masivan dio, lamelirani (izrađen od magnetskih limova manje debljine), zračni raspor i okvire (kratkospojne zavoje) oko jezgre glavnog pola.

Razmotrimo kako se izračunava magnetski otpor *masivnog dijela* magnetskog kruga. Uz utjecaj vrtložnih struja, prema relacijama (5) i (6), magnetski otpor iznosi:

$$\underline{Z}_m = \frac{\underline{\Theta}}{\underline{\Phi}} = j\omega w \frac{\underline{\Theta}}{\underline{E}}. \tag{13}$$

Za vrtložne struje možemo pretpostaviti da teku jednim zavojem, pa je $w = 1$. Uz $\underline{\Theta} = l_m \underline{H}_{em}$ i $\underline{E} = l_e \underline{E}_{em}$ dobivamo za magnetski otpor:

$$\underline{Z}_m = j\omega \frac{l_m}{l_e} \frac{\underline{H}_{em}}{\underline{E}_{em}}.$$

Pri tome je l_m dužina puta magnetskih silnica, l_e dužina puta kojim teku vrtložne struje, H_{em} jakost magnetskog polja elektromagnetskog vala i E_{em} je jakost električnog polja elektromagnetskog vala.

Iz teorijske elektrotehnike poznata je relacija za valni otpor, koja izražava omjer jakosti električnog polja $\underline{E}_{em}$ i magnetskog polja $\underline{H}_{em}$ elektromagnetskog vala. Valni otpor električki i magnetski vodljivog medija bit će:

$$\underline{Z}_v = \frac{\underline{E}_{em}}{\underline{H}_{em}} = \sqrt{\frac{\omega \mu_p}{\varkappa}}\, e^{j\frac{\pi}{4}}. \tag{15}$$

Ako uvrstimo izraz (15) u (14), za magnetski otpor vrijedi:

$$\underline{Z}_m = \sqrt{\frac{\omega \varkappa}{\mu_p}} \frac{l_m}{l_e} e^{j\frac{\pi}{4}}. \tag{16}$$

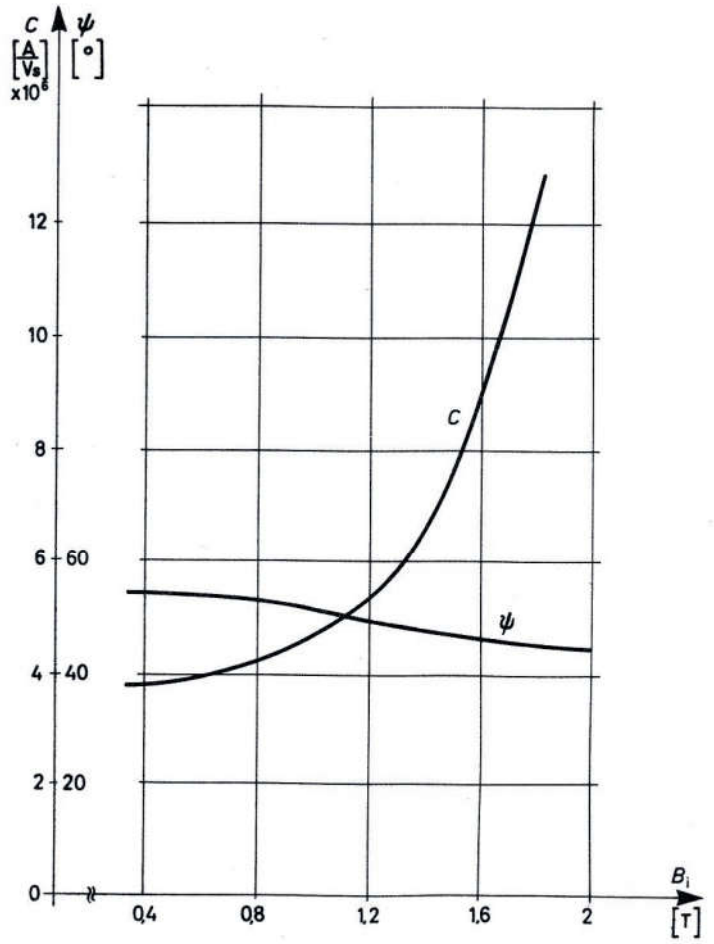
Uzme li se u obzir još i histereza, možemo za magnetski otpor pisati:

$$\underline{Z}_m = C \frac{l_m}{l_e} e^{j\psi} \left[\frac{A}{Vs}\right], \tag{17}$$

pri čemu se vrijednosti $C\left[\frac{A}{Vs}\right]$ i $\psi[^\circ]$ za određenu kvalitetu materijala određuju ispitivanjem na uzorku materijala; za lijevani i valjani čelik prikazane su one na

slici 5. Povećanje argumenta ψ na više od $\frac{\pi}{4}$ pri manjim vrijednostima magnetske indukcije istosmjerne komponente, nastaje zbog utjecaja histereze.

Masivni dijelovi u magnetskom krugu istosmjernog stroja mogu biti jezgra pomoćnog pola i jaram statora, a da se izračunaju njihovi magnetski otpori, valja još odrediti omjer $\frac{l_m}{l_e}$, uzevši u obzir smjer prodiranja elektromagnetskog vala.



Sl. 5. Ovisnost C i ψ o istosmjernoj komponenti indukcije B_i za lijevani i valjani čelik

Elektromagnetski val prodire u jezgru pomoćnog pola na bočnim plohama, pa dužina puta magnetskih silnica odgovara visini jezgre (u smjeru magnetskog toka), a dužina puta vrtložnih struja (mala dubina prodiranja vala) praktički je jednaka opsegu jezgre (okomito na magnetski tok). Za jezgru pomoćnog pola bit će:

$$\frac{l_m}{l_e} = \frac{h_{pp}}{2(b_{pp} + l_{pp})},$$

a magnetski otpor iznosi:

$$\overline{Z}_{\text{ppjk}} = C \frac{h_{\text{pp}}}{2(b_{\text{pp}} + l_{\text{pp}})} e^{j\psi} \left[\frac{\text{A}}{\text{Vs}}\right], \tag{18}$$

pri čemu je h_{pp} visina, b_{pp} širina i l_{pp} je dužina jezgre pomoćnog pola.

Elektromagnetski val prodire u jaram statora s unutrašnje strane (sa strane polova), a vrtložne struje nastaju oko jezgara polova. Na slici 6. primjer je za magnetski krug glavnih polova. Dužina puta magnetskih silnica računa se od bočne strane jezgre glavnog pola do simetrale pomoćnog pola, a na slici 6. označena je s l_{s}. Na istoj slici prikazan je položaj vrtložnih struja koje nastaju na dijelu jarma dx udaljenome za x od bočne strane jezgre glavnog pola. Dužina puta vrtložnih struja na dijelu jarma dx iznosi $l_{\text{ex}} = 2(b_{\text{gp}} + l_{\text{gp}}) + 2\pi x$, pa je omjer:

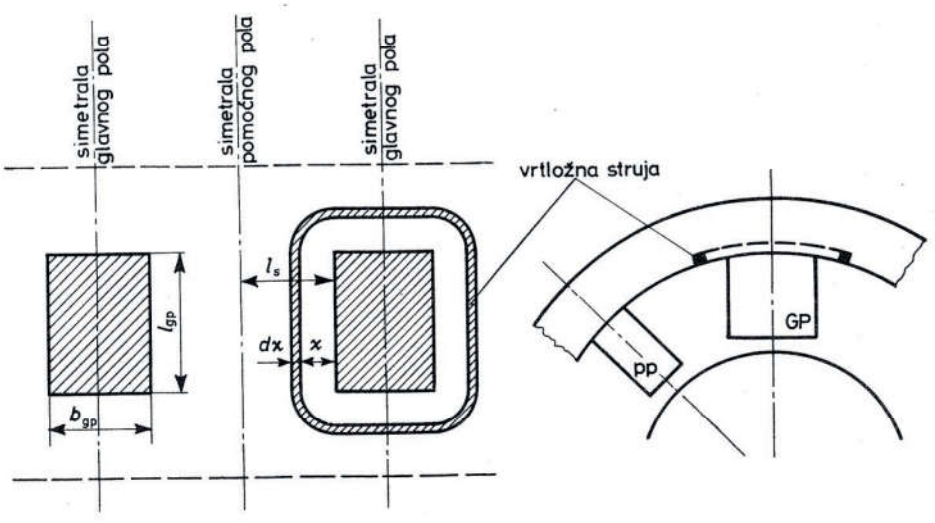
$$\frac{l_{\text{m}}}{l_{\text{e}}} = \int_0^{l_{\text{s}}} \frac{\text{d}x}{2(b_{\text{gp}} + l_{\text{gp}}) + 2\pi x} = \frac{1}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi l_{\text{s}}}{b_{\text{gp}} + l_{\text{gp}}}\right),$$

a magnetski otpor jarma statora po polu za magnetski krug glavnih polova iznosi:

$$\overline{Z}_{\text{jsk}} = \frac{C}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi l_{\text{s}}}{b_{\text{gp}} + l_{\text{gp}}}\right) \cdot e^{j\psi} \left[\frac{\text{A}}{\text{Vs}}\right]. \tag{19}$$

Tu su b_{gp} i l_{gp} širina i dužina jezgre glavnog pola prema slici 6., a l_{s} je razmak od bočne strane jezgre glavnog pola do simetrale pomoćnog pola, mjeren s unutrašnje strane jarma statora.

Pri idealno lameliranom dijelu magnetskog kruga, zbog veće *dubine prodiranja* elektromagnetskog vala, može se pretpostaviti da izmjenična komponenta magnetskog toka prelazi cijelim presjekom tog dijela. Odstupanje od idealnog lameliranja, uslijed čega se povećava modul i argument magnetskog otpora, može se uzeti u obzir tako da magnetski otpor idealno lameliranog dijela pomnožimo jednim kompleksnim koeficijentom.



Sl. 6. Vrtložne struje u jarmu statora za primjer magnetskog kruga glavnih polova

Magnetski otpor *lameliranog dijela* magnetskog kruga računa se prema relaciji:

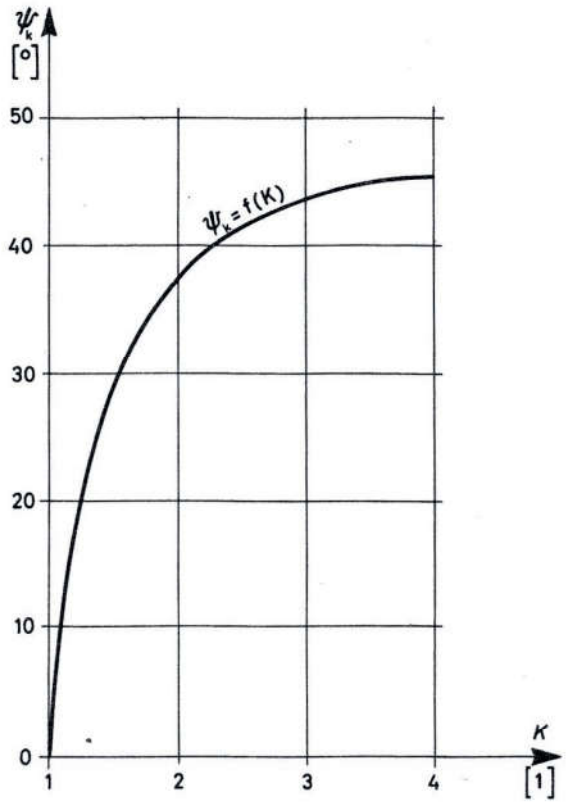
$$\overline{Z}_m = \overline{K} \frac{l_m}{\mu_p S_{Fe}} e^{j\psi_\mu} \left[\frac{A}{Vs}\right], \tag{20}$$

u kojoj su μ_p i ψ_μ modul i argument pulsacijskoga magnetskog permeabiliteta, $\overline{K}$ je kompleksni koeficijent povećanja magnetskog otpora, i on ovisi o konstrukcijsko-tehnološkoj izvedbi dijela magnetskog kruga, l_m je dužina puta magnetskih silnica [m], a S_{Fe} presjek željeza okomito na smjer magnetskog toka [m^2].

Modul i argument pulsacijskoga magnetskog permeabiliteta ovise o vrijednosti istosmjerne komponente indukcije B_i i u području frekvencija od 50 do 300 Hz praktički se ne mijenjaju. Za razne vrste materijala prikazani su oni na slici 8.

Kompleksnim koeficijentom $\overline{K}$ povećanja magnetskog otpora uzima se u obzir porast magnetskog otpora stvarnoga lameliranog dijela magnetskog kruga u usporedbi prema idealnoj lamelirano izoliranoj izvedbi (bez dodatnih vrtložnih struja između limova ili u elementima učvršćenja), a iznosi:

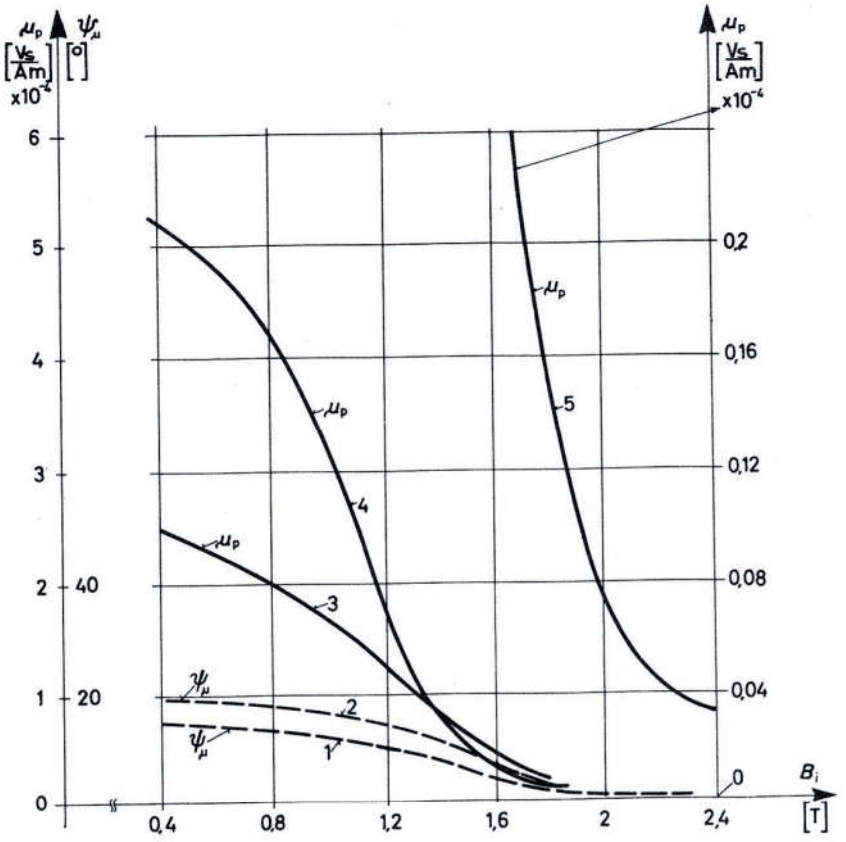
$$\overline{K} = K e^{j\psi_k} \text{ [1]}. \tag{21}$$



Sl. 7. Argument ψ_k koeficijenta povećanja magnetskog otpora ovisno o njegovu modulu K za lamelirani dio magnetskog kruga

U toj jednadžbi K je modul koeficijenta povećanja magnetskog otpora, ovisan o konstrukciji i tehnološkoj izvedbi dijela magnetskog kruga, a ψ_k argument koeficijenta povećanja magnetskog otpora ovisan o svom modulu [°] prikazuje slika 7.

Povećanje magnetskog otpora nekog dijela magnetskog kruga pojavljuje se zbog dodatnih vrtložnih struja, koje nastaju zbog električnih kontakta između limova (neizolirani limovi, loše izolirani limovi i srh) i elemenata učvršćenja (zakovice, svornjaci, vijci i slično) paketa. Razumije se da magnetski otpor stvarnoga lameliranog dijela magnetskog kruga ni u kojem primjeru ne može biti veći od vrijednosti koja odgovara magnetskom otporu masivnog dijela istih dimenzija. Vrijednosti modula K i argumenta ψ_k koeficijenta povećanja magnetskog otpora određuju se ispitivanjem, a njihova ovisnost [L 41] predočena je na slici 7. Vrijednosti modula K razlikuju se u raznim konstrukcijskim i tehnološkim izvedbama dijelova magnetskog kruga. Tako za zube i jaram armature od izoliranoga magnetskog lima debljine 0,5 mm K je od 1,2 do 1,3, za jezgru glavnog pola od izoliranoga magnetskog lima (debljine 0,5 mm) s izoliranim zakovicama i neizoliranim svornjakom K je od 1,2 do 2. Za jaram statora od izoliranoga magnetskog lima (debljine od 1,0 mm) s izoliranim elementima za učvršćenje K iznosi 1,3, a jezgri pomoćnog pola od izoliranoga magnetskog lima (debljine od 0,5 mm) sa zakovicama u simetrali pola K je od 1,2 do 1,3. Jezgri



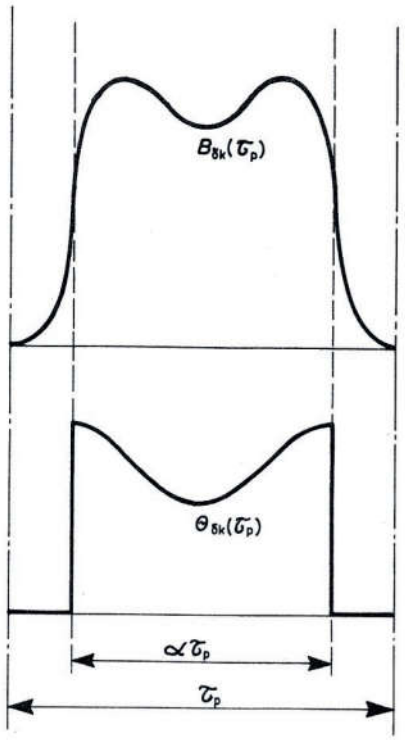
Sl. 8. Modul μ_p i argument ψ_μ pulsacijskoga magnetskog permeabiliteta ovisno o magnetskoj indukciji B_i istosmjerne komponente

pomoćnog pola od izoliranoga magnetskog lima (debljine od 1,0 mm) sa zakovicama u simetrali pola i neizoliranim svornjakom, koji jako sužuje presjek jezgre, K se kreće od 2 do 3.

Iz spomenutih podataka vidi se da najmanji magnetski otpor i najmanji fazni pomak između magnetske indukcije i jakosti magnetskog polja, ima potpuno lamelirano izolirana izvedba.

Na slici 8. vrijednosti su modula i argumenta pulsacijskoga magnetskog permeabiliteta ovisno o magnetskoj indukciji istosmjerne komponente za valovitost jakosti magnetskog polja od 20%, pri čemu se krivulje 1, 4 i 5 odnose na jednu kvalitetu magnetskog lima, a 2 i 3 na konstrukcijski čelični lim (trgovački naziv – crni lim) debljine od 1 do 2 mm.

Magnetski otpor *zračnog raspora glavnih polova* za izmjeničnu komponentu magnetskog toka nešto je veći nego za istosmjernu komponentu nastalu nepovoljnijom raspodjelom magnetske indukcije po luku polne papuče. Na slici 9



Sl. 9. Raspodjela protjecanja i magnetske indukcije u zračnom rasporu glavnog pola za izmjeničnu komponentu

prikazana je raspodjela protjecanja Θ_k i magnetske indukcije B_k za izmjeničnu komponentu u praznom hodu motora. Smanjenje protjecanja i indukcije izmjenične komponente u zračnom rasporu pod sredinom glavnog pola pojavljuje se zbog djelovanja vrtložnih struja (nastalih uglavnom zbog kratkospojnih zavoja elemenata učvršćenja paketa limova) u jezgri i polnoj papuči. Magnetski otpor zračnog raspora glavnog pola iznosi:

$$R_\delta = K_g \frac{\delta_{ek} k_c}{\mu_o \alpha \tau_p l_i} \left[\frac{A}{Vs}\right], \tag{22}$$

gdje je δ_{ek} ekvivalentni zračni raspor pod glavnim polom [m], k_c Carterov koeficijent, α prekrivanje glavnog pola, τ_p polni korak [m], l_i idealna dužina paketa [m], a K_g je koeficijent povećanja magnetskog otpora s iznosom: $K_g = 1{,}05-1{,}1$ za kompenzirane strojeve i 1,1 — 1,25 za nekompenzirane strojeve, pri čemu su manje vrijednosti za (lamelirano) izoliranu izvedbu, a veće za (lamelirano) neizoliranu uz debljinu lima od 1 do 2 mm. Ekvivalentni zračni raspor δ_{ek} računa se iz jednadžbi (5.4-14) ili (5.4-15).

Za učvršćenje polnih namota često se upotrebljavaju *metalni okviri* koji obuhvaćaju jezgru pola i, ako nisu prorezani, čine kratkospojne zavoje. Uslijed izmjenične komponente magnetskog toka u jezgri pola, u kratkospojnom zavoju nastaje struja koja svojim protjecanjem slabi protjecanje izmjenične komponente uzbudnog namota, pa kratkospojni zavoj možemo promatrati kao magnetski otpor uz nepromijenjeno protjecanje izmjenične komponente uzbudnog namota.

Polazeći od izraza (6), uz $w = 1$, možemo za magnetski otpor okvira pisati:

$$\underline{Z}_{ok} = \mathrm{j}\,\frac{\omega_k}{Z_e e^{\mathrm{j}\varphi}},$$

a budući da je $\psi = \frac{\pi}{2} - \varphi$, dobivamo:

$$\underline{Z}_{ok} = \frac{\omega_k}{Z_e}\, e^{\mathrm{j}\psi} \left[\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{Vs}}\right]. \tag{23}$$

Pri tome je Z_e modul električnog otpora okvira [Ω], φ je argument električnog i ψ magnetskog otpora okvira, a ω_k je kutna brzina (kružna frekvencija) izmjenične komponente $[\frac{\mathrm{rad}}{\mathrm{s}}]$.

Tako, pri kružnoj frekvenciji $\omega_k = 628$ za čelične okvire (perno učvršćenje namota) ψ iznosi oko 55°, a $Z_e = 1{,}8\ R$, pri čemu je R radni otpor okvira uz istosmjernu struju. Zbog faznog pomaka magnetskog toka prema struji (osobito u pomoćnim polovima), pa i zagrijavanja okvira, za motore napajanje valovitim naponom valja izbjegavati izvedbe okvira koji tvore kratkospojne zavoje.

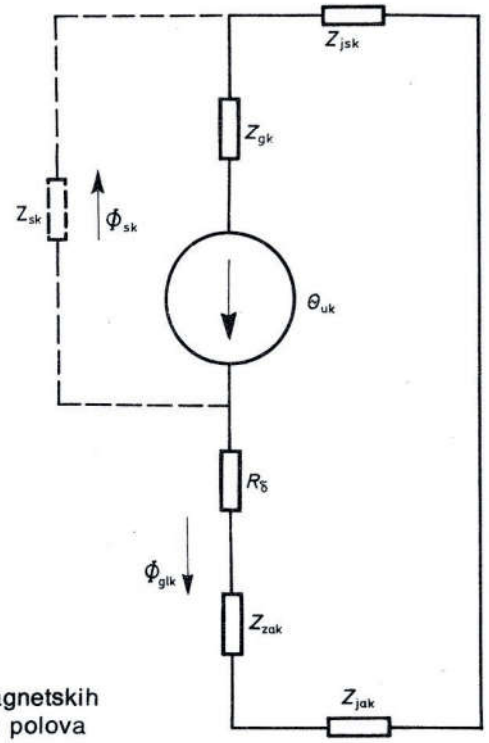
Provedenim razmatranjem upoznati smo sa fizikalnom osnovom magnetskih otpora i određivanjem onih koji se pojavljuju u magnetskom krugu glavnih polova. Magnetski otpori, specifični za magnetski krug pomoćnih polova, bit će obrazloženi u okviru razmatranja magnetskog toka kruga pomoćnih polova.

11.4. Nezavisno uzbuđen motor

Izmjeničnu komponentu elektromagnetskog stanja nezavisno uzbuđenog motora pri valovitom napajanju razmatrat ćemo pri priključku armaturnog kruga na izmjenični napon amplitudne vrijednosti U_k, a uzbudnog kruga na izmjenični napon amplitudne vrijednosti U_{uk}. Tumačenje ćemo provesti odvojeno za uzbudni i za armaturni strujni krug.

11.4.1. Uzbudni strujni krug

Ispravljačkim spojem za napajanje uzbudnog namota određene su vrijednosti amplitude napona U_{uk} i kružne frekvencije ω_k za k-ti harmonik izmjenične komponente. Uz poznate vrijednosti magnetske indukcije B_i istosmjerne komponente i poznate konstrukcijsko-tehnološke izvedbe svih dijelova magnetskog kruga glavnih polova, mogu se tim dijelovima odrediti vrijednosti magnetskih otpora. Na slici 1. prikazana je nadomjesna shema magnetskog kruga



Sl. 1. Nadomjesna shema spoja magnetskih otpora u magnetskom krugu glavnih polova

glavnih polova za izmjeničnu komponentu, na kojoj je Θ_{uk} protjecanje uzbudnog namota i Φ_{glk} magnetski tok u zračnom rasporu glavnih polova, a magnetski je otpor jarma statora Z_{jsk}, glavnog pola (i zubi kompenzacije ako ih ima) Z_{gk}, zračnog raspora glavnog pola R_δ, zubi armature Z_{zak} i jarma armature je Z_{jak}. Rasipni magnetski tok glavnih polova označen je s Φ_{sk}, a prolazi jezgrom glavnog pola, namotima i zrakom magnetskog otpora Z_{sk}. Utjecaj rasipnoga magnetskog toka Φ_{sk} na određivanje glavnog magnetskog toka Φ_{glk} može se uzeti u obzir povećavši magnetski otpor glavnog pola Z_{gk} kompleksnim koeficijentom $\underline{\sigma}_s = \sigma_s e^{j\psi}$. U primjeru kad na glavnom polu nema okvira koji tvore kratkospojne zavoje, kompleksni koeficijent iznosi $\underline{\sigma}_s = (1{,}2-1{,}25)\ e^{j5°}$.

Ukupni će magnetski otpor po polu za krug glavnih polova biti:

$$\underline{Z}_{umk} = \underline{Z}_{jsk} + \underline{\sigma}_s \underline{Z}_{gk} + R_\delta + \underline{Z}_{zak} + \underline{Z}_{jak} = Z_{umk} e^{j\varphi_g}, \qquad (1)$$

a za kompleksni električki otpor uzbudnog namota s $2p$ polova, uz upotrebu relacije (11.3–6), dobivamo:

$$\overline{Z}_{\text{uek}} = \text{j}\,\frac{2p\omega_{\text{k}}w_{\text{u}}^2}{\overline{Z}_{\text{umk}}} + R_{\text{u}} = Z_{\text{uek}}\text{e}^{\text{j}\varphi_{\text{g}}}, \tag{2}$$

pri čemu je w_{u} broj zavoja namota uzbude po polu, a R_{u} radni otpor uzbudnog namota za istosmjernu struju.

Amplitudna vrijednost struje uzbude k-tog harmonika iznosi:

$$\overline{i}_{\text{uk}} = \frac{\overline{U}_{\text{uk}}}{\overline{Z}_{\text{uek}}} = \frac{U_{\text{uk}}}{Z_{\text{uek}}}\,\text{e}^{-\text{j}\varphi_{\text{g}}}, \tag{3}$$

a protjecanje uzbudnog namota po polu je:

$$\overline{\Theta}_{\text{uk}} = \overline{i}_{\text{uk}}w_{\text{u}} = \Theta_{\text{uk}}\text{e}^{-\text{j}\varphi_{\text{g}}}. \tag{4}$$

Amplitudna vrijednost glavnoga magnetskog toka k-tog harmonika, uz upotrebu relacije (11.3–5), bit će:

$$\overline{\Phi}_{\text{glk}} = \frac{\overline{\Theta}_{\text{uk}}}{\overline{Z}_{\text{umk}}} = \frac{\Theta_{\text{uk}}\text{e}^{-\text{j}\varphi_{\text{g}}}}{Z_{\text{umkn}}\text{e}^{-\text{j}\psi_{\text{g}}}} = \frac{\Theta_{\text{uk}}}{Z_{\text{umk}}}\,\text{e}^{-\text{j}(\varphi_{\text{g}}+\psi_{\text{g}})}. \tag{5}$$

Uz poznavanje modula i argumenta (prema naponu U_{uk}) glavnoga magnetskog toka k-tog harmonika može se izračunati napon rotacije E_{ak} u armaturnome strujnom krugu i napon transformacije e_{tk} svitka u komutaciji. Napon rotacije u armaturnom krugu iznosi:

$$\overline{E}_{\text{ak}} = \frac{p}{a}\,\frac{\overline{\Phi}_{\text{glk}}nz}{60} = \frac{p}{a}\,\frac{\Phi_{\text{glk}}nz}{60}\,\text{e}^{-\text{j}(\varphi_{\text{g}}+\psi_{\text{g}})}, \tag{6}$$

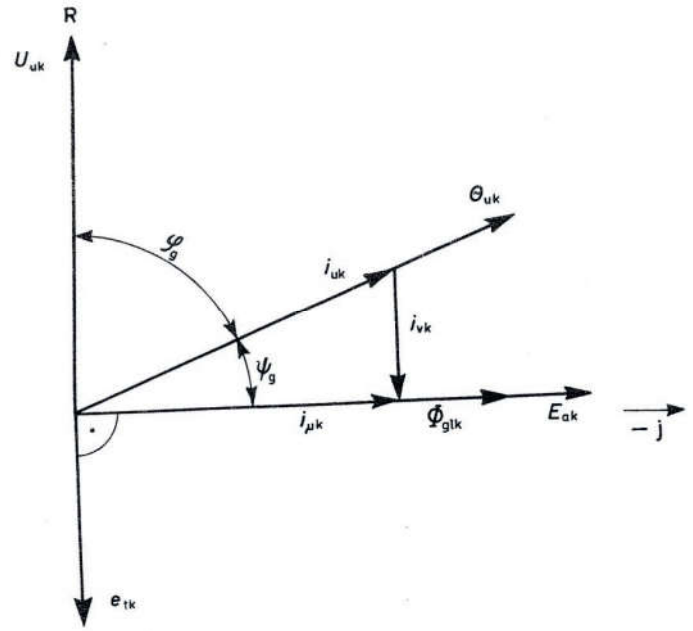
pri čemu je a broj pari paralelnih grana, z broj vodiča namota armature, p je broj pari polova i n brzina vrtnje.

Napon transformacije svitka u komutaciji je:

$$\overline{e}_{\text{tk}} = -\text{j}\,\omega_{\text{k}}w_{\text{s}}\overline{\Phi}_{\text{glk}} = \omega_{\text{k}}w_{\text{s}}\Phi_{\text{glk}}\text{e}^{-\text{j}(\varphi_{\text{g}}+\psi_{\text{g}}+\frac{\pi}{2})}. \tag{7}$$

Na slici 2. predočen je vektorski dijagram napona, struja, protjecanja i magnetskog toka uzbudnog kruga uz realnu os u smjeru napona U_{uk}. Iz dijagrama se vidi da struja i_{uk} i protjecanje Θ_{uk} uzbudnog namota zaostaju u fazi prema naponu uzbude U_{uk} za kut φ_{g}, da struja magnetiziranja $i_{\mu\text{k}}$ i magnetski tok Φ_{glk} u zračnom rasporu glavnih polova zaostaju u fazi prema struji i_{uk} uzbudnog namota za kut ψ_{g} ili prema naponu uzbude U_{uk} za kut $\varphi_{\text{g}} + \psi_{\text{g}}$. Napon rotacije E_{ak} namota armature u fazi je s glavnim magnetskim tokom Φ_{glk}, odnosno zaostaje u fazi prema naponu uzbude U_{uk} za kut $\varphi_{\text{g}} + \psi_{\text{g}}$, a napon transformacije e_{tk} svitka u komutaciji zaostaje u fazi prema glavnome magnetskom toku Φ_{glk} za kut $\frac{\pi}{2}$, odnosno prema naponu uzbude U_{uk} za kut $\varphi_{\text{g}} + \psi_{\text{g}} + \frac{\pi}{2}$.

Time je, u odnosu prema priključnom naponu uzbude, određen vektor napona rotacije $\overline{E}_{ak}$, koji će se upotrijebiti u vektorskom dijagramu armaturnog kruga, i vektor napona transformacije $\overline{e}_{tk}$, koji će se upotrijebiti u vektorskom dijagramu napona komutacijskog svitka.



Sl. 2. Vektorski dijagram napona, struja, protjecanja i magnetskog toka za uzbudni krug nezavisno uzbuđenog motora

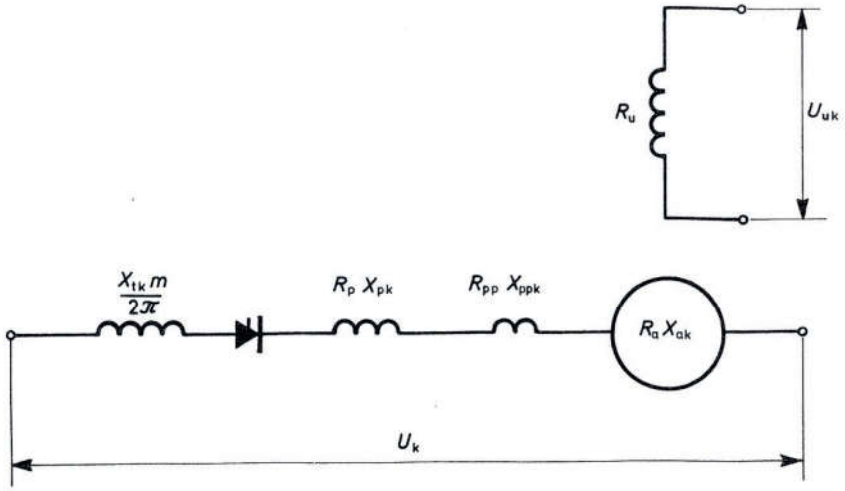
Valja napomenuti da su u provedenom razmatranju uzbudnog strujnog kruga zanemareni pad napona ΔU_i na ventilima ispravljača i pad napona $i_{uk} \frac{X_{tk} m}{2\pi}$ kojim se uzima u obzir pekrivanje anoda.

11.4.2. Armaturni strujni krug

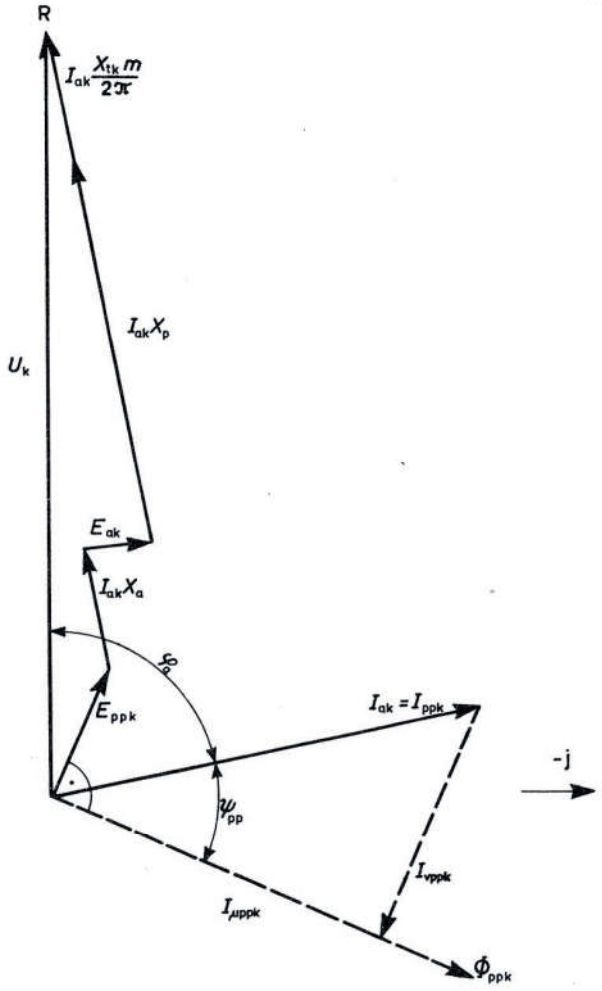
Ispravljačkim spojem za napajanje armaturnog kruga određene su vrijednosti amplitude napona U_k i kružne frekvencije ω_k za k-ti harmonik izmjenične komponente. Na slici 3. ekvivalentna je shema spoja armaturnog i uzbudnog strujnog kruga nezavisno uzbuđenog motora, na kojoj su radni i induktivni otpori označeni za namot armature s R_a i X_{ak}, za namot pomoćnih polova s R_{pp} i X_{ppk} i za prigušnicu s R_p i X_{pk}, a ekvivalentni je otpor kojim se uzima u obzir prekrivanje anoda ispravljača označen s $\frac{X_{tk} m}{2\pi}$.

Na slici 4. prikazan je vektorski dijagram napona i struja armaturnog kruga uz realnu os u smjeru napona U_k, te zanemarenje radnih otpora i pada napona na ispravljačkom ventilu.

Vektor napona rotacije $\overline{E}_{ak}$ namota armature određen je u razmatranju uzbudnog kruga i valja ga prenijeti u vektorski dijagram napona armaturnog kruga. Pri tome se moraju uočiti dvije činjenice. Prvo, u vektorski dijagram napona armature može se prenijeti napon E_{ak} samo istih kružnih frekvencija kao



Sl. 3. Ekvivalentna shema spoja nezavisno uzubuđenog motora



Sl. 4. Vektorski dijagram napona i struja za armaturni krug nezavisno uzbuđenog motora

armaturni naponi i, drugo, valja odrediti položaj vektora napona E_{ak} prema priključenom naponu U_k uzevši u obzir mogućnost faznog pomaka napona uzbude U_{uk} i napona armature U_k.

Inducirani napon E_{ppk} u namotu pomoćnih polova određen je magnetskim tokom Φ_{ppk} u jezgri pomoćnog pola koji sadrži magnetski tok u zračnom rasporu pomoćnih polova i rasipni magnetski tok pomoćnih polova. Budući da su u magnetskom krugu pomoćnih polova vrtložne struje, magnetski će tok u jezgri pomoćnog pola zaostajati za kut ψ_{pp} prema protjecanju, odnosno struji I_{ppk} namota pomoćnih polova. Određivanje modula Φ_{ppk} i argumenta ψ_{pp} magnetskog toka jezgre pomoćnog pola bit će razmotreno u odjeljku 11.6. Amplitudna vrijednost induciranog napona namota pomoćnih polova iznosi:

$$\overline{E}_{ppk} = j2p\omega_k w_{pp}\overline{\Phi}_{ppk} \text{ [V]}, \tag{8}$$

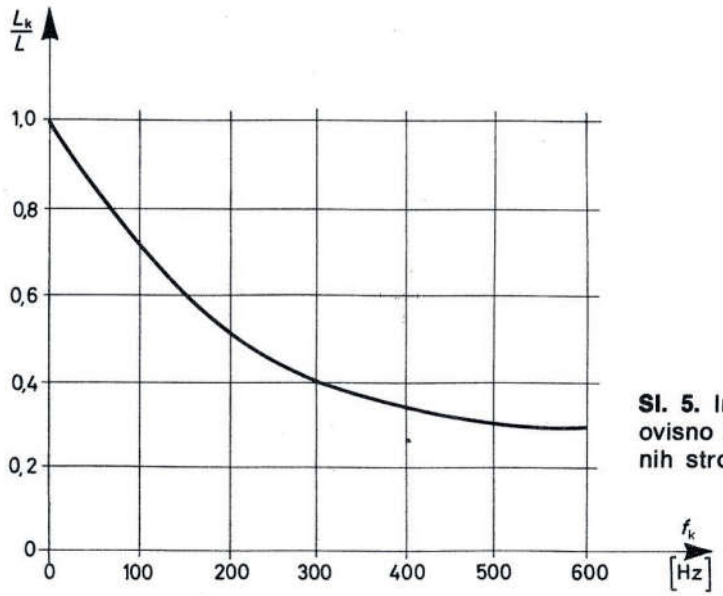
pri čemu je w_{pp} broj zavoja po polu namota pomoćnih polova.

Amplitudna vrijednost izmjenične komponente struje k-tog harmonika, uz zanemarenje radnih otpora i pada napona na ispravljačkom ventilu, bit će:

$$\overline{I}_{ak} = \frac{\overline{U}_k - \overline{E}_{ppk} - \overline{E}_{ak}}{j\left(\frac{X_{tk}m}{2\pi} + X_{pk} + X_{ak}\right)} \tag{9}$$

i zaostaje prema izmjeničnoj komponenti napona U_k za kut φ_a (vidi sl. 4).

Induktivitet namota armaturnog kruga može se ustanoviti na više načina (razne frekvencije), pa u preračunavanju induktiviteta k-tog harmonika valja uzeti u obzir promjenu induktiviteta s frekvencijom. Na slici 5. prikazana je ovisnost induktiviteta armaturnog kruga o frekvenciji za jednu seriju istosmjernih strojeva s masivnim statorskim jarmom.



Sl. 5. Induktivitet armaturnoga strujnog kruga ovisno o frekvenciji za jednu seriju istosmjernih strojeva

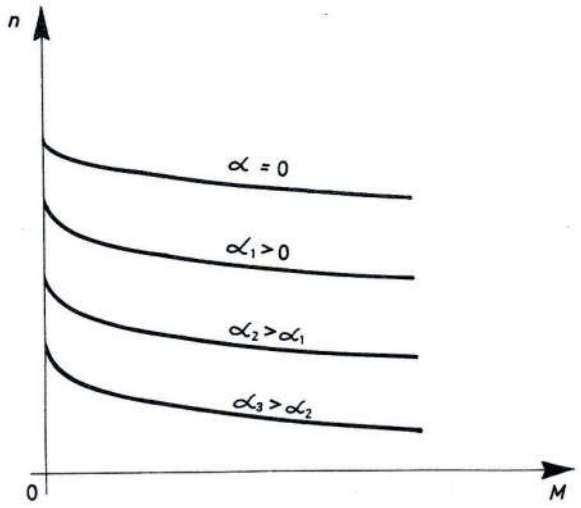
Dopuštene vrijednosti valovitosti struje armaturnog kruga ovise o konstrukcijsko-tehnološkoj izvedbi magnetskog kruga glavnih i pomoćnih polova, o komutacijskim sposobnostima stroja i o zagrijanju namota i željeza, a uobičajene su vrijednosti od 10 do 30 % pri nazivnom opterećenju motora.

11.4.3. Vanjska karakteristika

Upotrijebimo li relaciju (11.1 – 10) za brzinu vrtnje istosmjernoga nezavisno uzbuđenog motora napajanoga valovitim naponom, dobivamo izraz:

$$n = \frac{U_i - I_{ai}\left(\frac{X_{tk}m}{2\pi} + R_t + R_p + R_{au}\right) - \Delta U_i}{k'_e \Phi_{gli}}. \tag{10}$$

Pri tome je R_{au} ukupni radni otpor armaturnog kruga motora, a Φ_{gli} je istosmjerna komponenta glavnoga magnetskog toka.



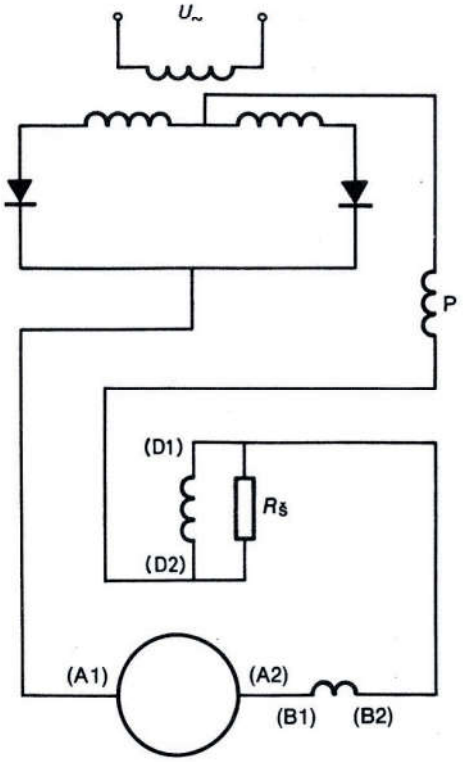
Sl. 6. Vanjske karakteristike $n(M)$ nezavisno uzbuđenog motora pri valovitom napajanju u motorskom radu

Vanjske karakteristike $n(M)$ u motorskom radu prikazuje slika 6. Pri srednjim i većim opterećenjima tok je vanjskih karakteristika jednak kao u napajanja istosmjernim naponom, samo su karakteristike nešto mekše zbog relativno većega ukupnog otpora u armaturnom krugu. Za razliku od toga, pri manjim opterećenjima, kad nastupa kidanje struje u ispravljačkom ventilu, nastaje određeno povećanje brzine vrtnje.

11.5. Serijski uzbuđen motor

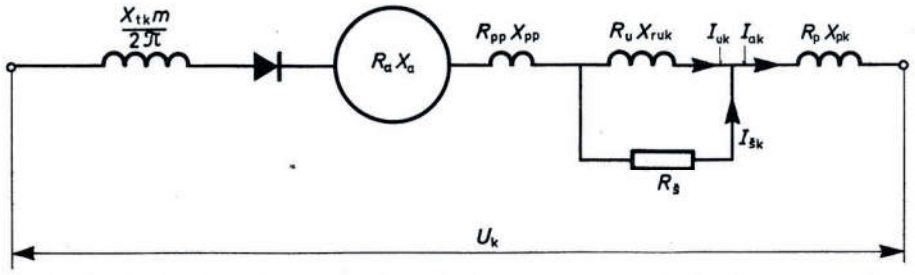
Serijskom je motoru uzbudni namot spojen u armaturni strujni krug, pa mu je magnetski tok glavnih polova ovisan o struji armature, a harmonički članovi izmjenične komponente magnetskog toka glavnih i pomoćnih polova, te struje armature jednake su

kružne frekvencije. Izmjeničnu komponentu elektromagnetskog stanja serijskog motora pri valovitom napajanju razmotrit ćemo pomoću priključka armaturnog kruga na izmjenični napon amplitudne vrijednosti U_k.



Sl. 1. Shema spoja istosmjernoga serijskog motora s jednofaznom izmjeničnom mrežom

Na slici 1. shema je spoja istosmjernoga serijskog motora s jednofaznom izmjeničnom mrežom pri valovitom napajanju kao u primjeru električne vuče, gdje se najčešće upotrebljava ta vrsta motora. Zbog priključka na jednofaznu izmjeničnu mrežu, u istosmjernom krugu nastaje relativno velika valovitost napona, pa se radi smanjena valovitosti struje u strujni krug ugrađuje prigušnica P, a da se smanji valovitost magnetskog toka glavnih polova, šantira se uzbudni namot radnim otporom $R_š$. Na slici 2. prikazana je ekvivalentna shema spoja armaturnoga strujnog kruga serijskog motora. Na njoj su radni i induktivni otpori označeni za namot armature s R_a i X_{ak}, za namot pomoćnih polova s R_{pp} i X_{ppk}, za prigušnicu R_p i H_{pk}, za namot uzbude s X_{ruk}, radni otpor šanta serijskoga uzbudnog namota je $R_š$, a ekvivalentni je otpor kojim se uzima u obzir prekrivanje anoda označen s $\frac{X_{tk}m}{2\pi}$. Izmjenične komponente struje k-tog harmonika označene su u namotu serijske uzbude s I_{uk}, u šantu uzbudnog namota s $I_{šk}$ i u ostalim namotima s I_{ak}.



Sl. 2. Ekvivalentna shema spoja serijskog motora s izmjeničnom mrežom

Ukupni magnetski otpor po polu za krug glavnih polova je:

$$\bar{Z}_{umk} = Z_{umk}\, e^{-j\varphi_g}, \tag{11.4-1}$$

a određuje se pomoću nadomjesne sheme na slici (11.4–1) i istim postupkom kao za nezavisno uzbuđen motor.

Konpleksni električki otpor namota serijske uzbude s $2p$ polova, uz upotrebu relacije (11.3–6), bit će:

$$\bar{Z}_{uek} = j\,\frac{2p\omega_k w_{ser}^2}{\bar{Z}_{umk}} + R_u = Z_{uek}\, e^{j\varphi_g}, \tag{1}$$

pri čemu je w_{ser} broj zavoja po polu serijskoga uzbudnog namota.

Omjer struje namota uzbude i struje armaturnog kruga nazivamo koeficijent šantiranja. Za istosmjernu komponentu koeficijent je šantiranja realna veličina i iznosi:

$$\beta_i = \frac{I_{ui}}{I_{ai}} = \frac{R_š}{R_š + R_u}\ [1]. \tag{2}$$

Pri tome su istosmjerne komponente struje označene s I_{ui} za namot uzbude i s I_{ai} za armaturni krug.

Za izmjeničnu komponentu koeficijent je šantiranja kompleksna veličina, a a za k-ti harmonik iznosi:

$$\bar{\beta}_k = \frac{\bar{I}_{uk}}{\bar{I}_{ak}} = \frac{R_š}{R_š + \bar{Z}_{uek}} = \beta_k\, e^{-j\alpha}. \tag{3}$$

S promjenom opterećenja motora ne mijenja se koeficijent šantiranja β_i istosmjerne komponente, a koeficijent se šantiranja β_k izmjenične komponente mijenja po modulu i argumentu zbog promjene kompleksnoga magnetskog otpora (utjecaj zasićenja!) kruga glavnih polova. Uobičajene vrijednosti koeficijenta šantiranja su $\beta_i = 0{,}85-0{,}95$, čime se ostvaruje β_k manje od 0,2.

Valovitost struje uzbude k-tog harmonika pri šantiranom namotu uzbude, uz upotrebu relacija (2) i (3), iznosi:

$$v_{iuk} = \frac{I_{uk}}{I_{ui}} = v_{ik}\,\frac{\beta_k}{\beta_i}, \tag{4}$$

gdje je v_{ik} valovitost k-tog harmonika struje armature.

Amplitudna vrijednost izmjenične komponente struje armature pri šantiranome uzbudnom namotu, uz zanemarenje pada napona na radnim otporima i ispravljačkom ventilu, bit će:

$$\bar{I}_{ak} = \frac{\bar{U}_k - \bar{E}_{uk} - \bar{E}_{ppk} - \bar{E}_{ak}}{j\left(\frac{X_{tk}m}{2\pi} + X_{pk} + X_{ak}\right) \mp j\beta X_{ruk}} = I_{ak}\, e^{-j\varphi_a}. \tag{5}$$

Pri tome su izmjenične komponente induciranih napona: E_{uk} u namotu uzbude zbog glavnoga magnetskog toka u zračnom rasporu glavnih polova, E_{ppk} u namotu pomoćnih polova zbog magnetskog toka u jezgri pomoćnog pola i E_{ak} u namotu armature (napon rotacije) uslijed glavnoga magnetskog toka, a φ_a je fazni pomak struje I_{ak} prema naponu U_k.

Serijskim motorima redovito se zadaje dopuštena vrijednost valovitosti struje armaturnog kruga v_{ik}, a posljedično se određuje potrebni induktivni otpor prigušnice. U tom primjeru izmjenična je komponenta struje armature:

$$I_{ak} = I_{ai} v_{ik}, \tag{6}$$

a za izmjeničnu komponentu struje uzbudnog namota, upotrijebimo li relaciju (3), dobivamo:

$$\bar{I}_{uk} = \bar{\beta}_k \bar{I}_{ak} = \beta_k I_{ak} \, e^{-j\alpha}. \tag{7}$$

Pri tome je α kut faznog pomaka struje I_{uk} prema I_{ak}.

Amplitudna vrijednost protjecanja uzbudnog namota po polu za k-ti harmonik iznosi:

$$\bar{\Theta}_{uk} = \bar{I}_{uk} w_{ser} = \Theta_{uk} \, e^{-j\alpha}, \tag{8}$$

a amplitudna vrijednost glavnoga magnetskog toka, uz upotrebu relacije (11.3–5), bit će:

$$\bar{\Phi}_{glk} = \frac{\bar{\Theta}_{uk}}{\bar{Z}_{umk}} = \frac{\Theta_{uk} e^{-j\alpha}}{Z_{umk} e^{j\psi_g}} = \frac{\Theta_{uk}}{Z_{umk}} \, e^{-j(\alpha + \psi_g)}. \tag{9}$$

Tu je $\alpha + \psi_g$ kut faznog pomaka glavnoga magnetskog toka Φ_{glk} prema struji armature I_{ak}.

Poznavajući modul i argument glavnoga magnetskog toka k-tog harmonika, (prema struji I_{ak}) može se izraziti napon rotacije namota armature E_{ak} i napon transformacije e_{tk} svitka u komutaciji. Napon rotacije namota armature je u fazi s glavnim magnetskim tokom i iznosi:

$$\bar{E}_{ak} = \frac{p \bar{\Phi}_{glk} nz}{a60} = \frac{p}{a} \frac{\Phi_{glk} nz}{60} \, e^{-j(\alpha + \psi_g)}, \tag{10}$$

pri čemu je a broj pari paralelnih grana i z broj vodiča namota armature, a p je broj pari polova i n brzina vrtnje.

Napon transformacije svitka u komutaciji je:

$$\bar{e}_{tk} = -j\omega_k w_s \bar{\Phi}_{glk} = \omega_k w_s \Phi_{glk} e^{-j(\alpha + \psi_g + \frac{\pi}{2})}. \tag{11}$$

Pri tome je w_s broj zavoja svitka u komutaciji.

Inducirani napon E_{ppk} u namotu pomoćnih polova određen je magnetskim tokom Φ_{ppk} u jezgri pomoćnog pola. Kad su u magnetskom krugu pomoćnih polova vrtložne struje, magnetski će tok u jezgri pomoćnog pola zaostajati za kut ψ_{pp} iza protjecanja, odnosno iza struje I_{ppk} namota pomoćnih polova. Određivanje modula Φ_{ppk} i argumenta ψ_{pp} magnetskog toka jezgre pomoćnog pola bit će razmotreno u odjeljku 11.6. Amplitudna vrijednost induciranog napona namota pomoćnih polova iznosi:

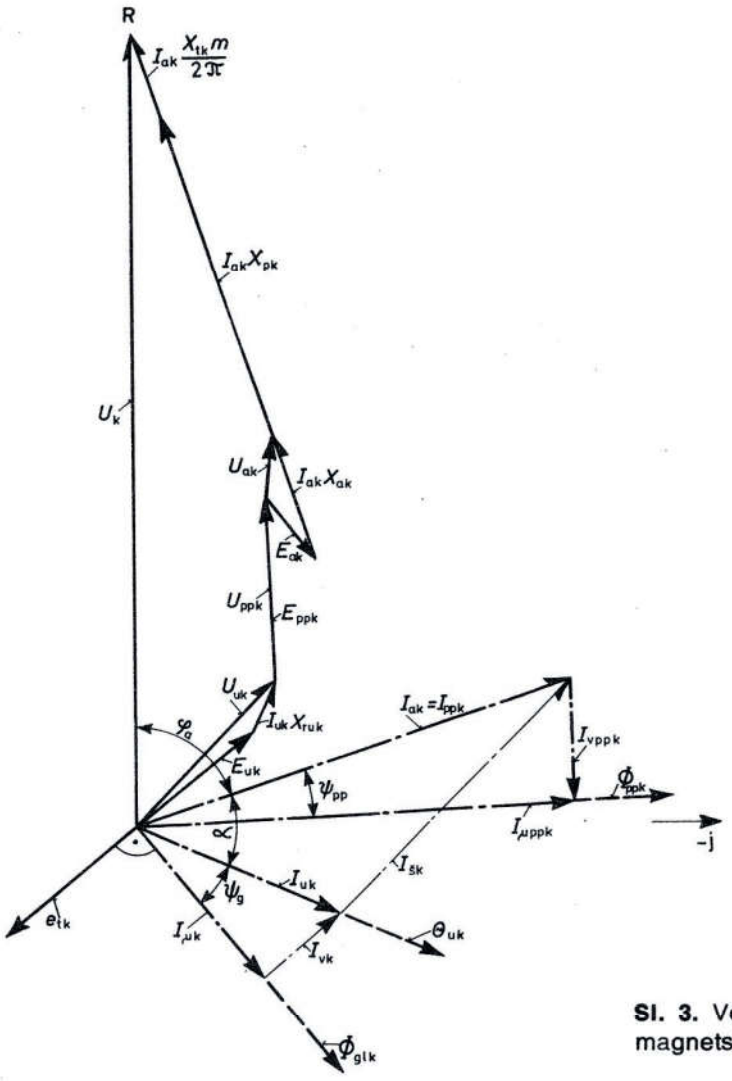
$$\bar{E}_{ppk} = j2p\omega_k w_{pp} \bar{\Phi}_{ppk}. \tag{12}$$

Tu je w_{pp} broj zavoja po polu namota pomoćnih polova. Inducirani napon E_{ppk} fazno je pomaknut za kut $\frac{\pi}{2} - \psi_{pp}$ ispred struje armature I_{ak}.

Inducirani napon E_{uk} u namotu uzbude induciran glavnim magnetskim tokom Φ_{glk} bit će:

$$\overline{E}_{uk} = j2p\omega_k w_{ser}\overline{\Phi}_{glk}, \tag{13}$$

a fazno je pomaknut za kut $\frac{\pi}{2} - \alpha - \psi_g$ ispred struje armature I_{ak}.



Sl. 3. Vektorski dijagram napona, struja i magnetskih tokova serijski uzbuđenog motora

Na slici 3. vektorski je dijagram napona, struja, protjecanja i magnetskih tokova serijskog motora uz realnu os u smjeru priključnog napona U_k. Iz dijagrama se vidi da struja armaturnog kruga I_{ak} zaostaje u fazi iza napona U_k za kut φ_a, da struja uzbude I_{uk}, pri šantiranju namota uzbude, zaostaje u fazi iza struje armature I_{ak} za kut α ili iza napona U_k za kut $\varphi_a + \alpha$. Struja magnetiziranja uzbudnog namota $I_{\mu k}$, glavni magnetski tok Φ_{glk} i napon rotacije E_{ak} armaturnog namota zaostaju u fazi iza struje armature I_{ak} za kut $\alpha + \psi_g$, ili iza napona U_k za kut $\varphi_a + \alpha + \psi_g$. Napon transformacije e_{tk} svitka u komutaciji zaostaje iza glavnoga magnetskog toka Φ_{glk} za kut $\frac{\pi}{2}$ i iza struje armature I_{ak} za kut $\alpha + \psi_g + \frac{\pi}{2}$, odnosno iza napona U_k za kut $\varphi_a + \alpha + \psi_g + \frac{\pi}{2}$. Inducirani napon E_{ppk} namota pomoćnih polova je ispred magnetskog tokaΦ_{ppk} jezgre pomoćnog pola za

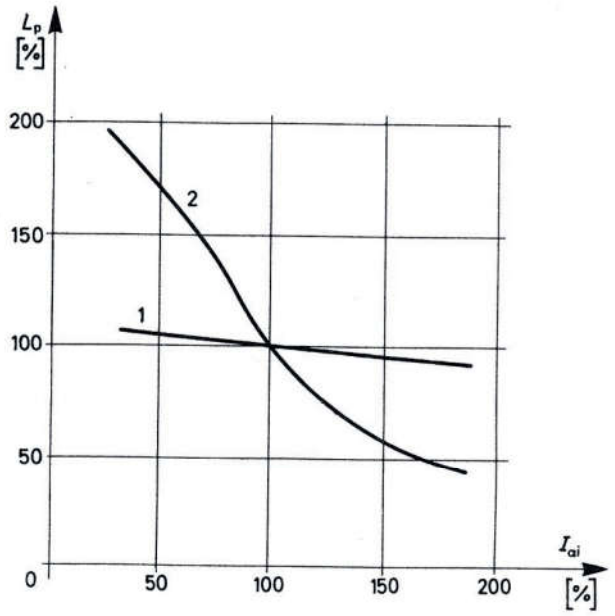
kut $\frac{\pi}{2}$ i ispred armaturne struje za kut $\frac{\pi}{2} - \psi_{pp}$. Prema tome je on ispred napona U_k za kut $\frac{\pi}{2} - \varphi_a - \psi_{pp}$ (negativne vrijednosti kuta znače zaostajanje u fazi). Inducirani napon E_{uk} namota uzbude je ispred struje armature I_{ak} za kut $\frac{\pi}{2} - \alpha - \psi_g$, a zaostaje u fazi iza napona U_k za kut $\varphi_a + \alpha + \psi_g - \frac{\pi}{2}$.

Valja napomenuti da je serijskome motoru sa šantiranim namotom uzbude svojstvena relativno mala valovitost izmjenične komponente glavnoga magnetskog toka Φ_{glk}, pa se za tehnički dovoljno točan račun može zanemariti inducirani napon namota uzbude E_{uk} i napon rotacije armaturnog namota E_{ak}. U primjerima s relativno velikim induktivnim otporom X_{pk} prigušnice smiju se još zanemariti induktivni otpor sekundara transformatora X_{tk} i induktivni otpor rasipanja namota uzbude X_{ruk}. Tad se relacija (5) za izmjeničnu komponentu struje armature pojednostavljuje:

$$\bar{I}_{ak} \approx \frac{\bar{U}_k - \bar{E}_{ppk}}{j(X_{pk} + X_{ak})} \approx \frac{\bar{U}_k}{j(X_{pk} + X_{ppk} + X_{ak})}. \tag{14}$$

Dopuštene valovitosti struje armature serijskih motora sa šantiranim namotom uzbude načelno su jednake onima nezavisno uzbuđenih motora i ovisne su o istim uvjetima.

Prigušnice se armaturnoga strujnog kruga prema konstrukcijskoj izvedbi i fizikalnim svojstvima dijele na zračne prigušnice i one s magnetskom jezgrom. Osnovna razlika između tih dviju vrsta prigušnica je ovisnost induktiviteta o opterećenju. S promjenom opterećenja, zračnoj je prigušnici svojstven praktički konstantan, a prigušnici s magnetskom jezgrom promjenjiv induktivitet. Na slici 4. prikazana je ovisnost induktiviteta L_p o istosmjernoj komponenti struje I_{ai}, pri čemu krivulja 1 vrijedi za zračnu prigušnicu, a krivulja 2 za prigušnicu s magnetskom jezgrom. U magnetskom krugu prigušnice s jezgrom nalazi se zračni raspor, pa se željena karakteristika L_p (I_{ai}) postiže izborom veličine zračnog raspora i zasićenja magnetskog kruga, što se odabire još u fazi konstruiranja.



Sl. 4. Ovisnost induktiviteta prigušnica o opterećenju

Vanjske karakteristike $n(M)$ serijskog motora napajanoga valovitim naponom po obliku su jednake, onima pri napajanju istosmjernim naponom, samo su nešto mekše zbog relativno većega ukupnog otpora u armaturnome strujnom krugu. Serijskome motoru nisu zanimljive posljedice kidanja struje u ispravljačkom ventilu pri malim opterećenjima jer on zbog povećanja brzine vrtnje nikad ne radi u području tako malih opterećenja.

11.6. Posljedice u motoru pri valovitom napajanju

Posljedice uzrokovane izmjeničnom komponentom napona struje i magnetskog toka u istosmjernome motoru napajanome valovitim naponom, jesu pogoršanje potencijalnog stanja na kolektoru, nastajanje nekompenziranog napona svitka u komutaciji, porast gubitaka snage i smanjenje korisnog momenta na osovini. U idućem izlaganju razmotrit ćemo zasebno svaku od tih posljedica.

11.6.1. Potencijalno stanje na kolektoru

Kriteriji koji prikazuju potencijalno stanje na kolektoru, i služe za ocjenu njegove potencijalne stabilnosti, jesu srednji napon po lameli e_k, maksimalni napon između susjednih lamela e_{kmax} i maksimalna promjena napona po obodu kolektora ε_{max}. Dopuštene vrijednosti spomenutih parametara, dane u odjeljku 5.4.2.2, vrijede i pri valovitom napajanju.

Potencijalno stanje na kolektoru pri valovitom napajanju mijenja se periodički s kružnom frekvencijom ω_k ovisno o spoju ispravljača na koji je priključen armaturni strujni krug. Za ocjenu potencijalnog stanja kolektora mjerodavna je amplitudna vrijednost napona (zbroj vrijednosti istosmjerne komponente i amplitudne vrijednosti izmjenične komponente). Pri tome za određivanje amplitudne vrijednosti izmjenične komponente valja uzeti u obzir fazni pomak pojedinih napona.

Srednji napon po lameli kolektora, prema izrazu (5.4–7), iznosi:

$$e_k = \frac{2p}{k} U_{Am}. \tag{1}$$

Tu je p broj polova, k broj kolektorskih lamela i U_{Am} je maksimalni napon na stezaljkama armaturnog namota.

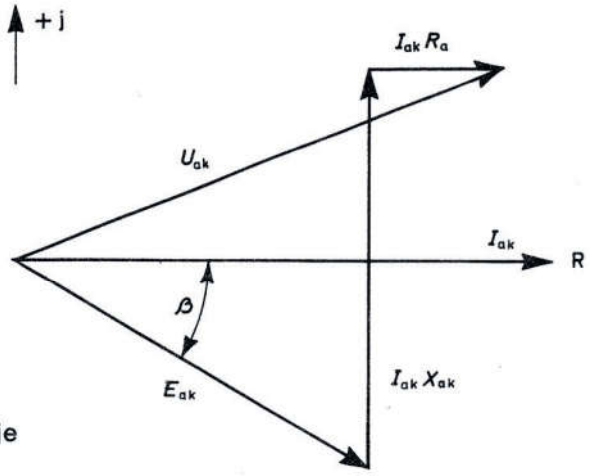
Vrijednost napona U_{Am} ovisi o opterećenju motora. U praznom hodu ona je približno (ako zanemarimo pad napona zbog struje praznog hoda) jednaka maksimalnoj ispravljenoj vrijednosti napona U_{imax} (tj. amplutudnoj vrijednosti faznog napona mreže ili transformatora). U opterećenom stanju maksimalni je napon:

$$U_{Am} = U_m + U_{ak}. \tag{2}$$

Pri tome je U_m srednja vrijednost ispravljenog napona prema relaciji (11.1–10) i U_{ak} amplitudna vrijednost napona k-tog harmonika na namotu armature. Napon U_{ak} iznosi:

$$\bar{U}_{ak} = \bar{E}_{ak} + \bar{I}_{ak}\,(R_a + jX_{ak}) = E_{ak}e^{-j\beta} + \bar{I}_{ak}(R_a + jX_{ak}). \tag{3}$$

Određivanje napona U_{ak} prikazuje slika 1, gdje je E_{ak} napon rotacije u namotu armature zbog k-tog harmonika glavnoga magnetskog toka, β je fazni pomak napona E_{ak} prema struji armature I_{ak}, a R_a i X_{ak} radni i induktivni otpor namota armature. Serijskome motoru kut je faznog pomaka β prema slici 11.5–3. $\beta = \alpha + \psi_g$, a nezavisno uzbuđenome motoru valja ga odrediti iz slika 11.4–2. i 11.4–4.



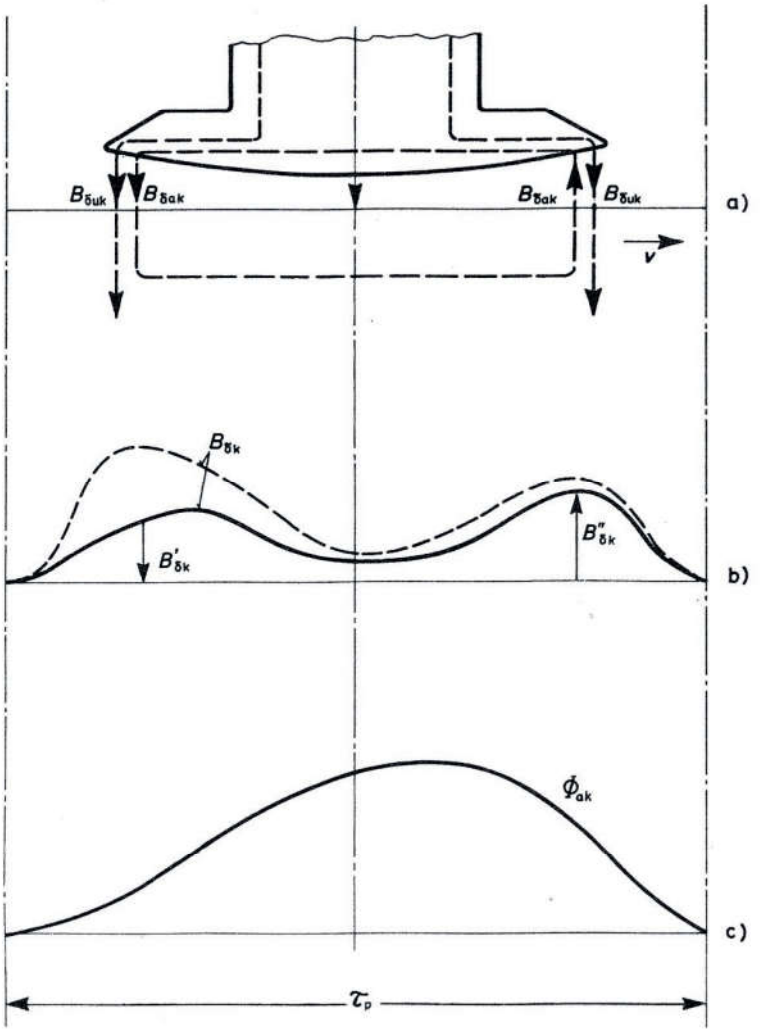
Sl. 1. Vektorski dijagram napona i struje namota armature

Da bi se ustanovila vrijednost maksimalnog napona između kolektorskih lamela, potrebno je poznavati sve inducirane napone u namotu armature i njihovu raspodjelu po kolektorskom obodu. Pri valovitom napajanju motora u namotu se armature inducira istosmjerna komponenta napona E_i utjecajem istosmjerne komponente glavnoga magnetskog toka, te izmjenične komponente: E_{ak} napon rotacije uzrokovan izmjeničnom komponentom glavnoga magnetskog toka, E_{ask} napon samoindukcije nastao zbog izmjenične komponente magnetskog toka namota armature, E_{tgk} napon transformacije nastao zbog izmjenične komponente glavnoga magnetskog toka i E_{tppk} napon transformacije uzrokovan izmjeničnom komponentom magnetskog toka pomoćnih polova.

Raspodjela istosmjerne komponente napona E_i obrazložena je u odjeljku 5.4.2.3. i za nju ne treba posebno tumačenje.

Za određivanje raspodjele napona E_{ak} potrebno je poznavati raspodjelu indukcije $B_{\delta k}$ u zračnom rasporu glavnih polova uzevši u obzir protjecanje izmjenične komponente armaturnog namota. Na slici 2.a prikazan je smjer magnetskih tokova kojih su indukcije u zračnom rasporu označene s $B_{\delta uk}$ (od izmjenične komponente magnetskog toka glavnog pola pri neopterećenome motoru) i $B_{\delta ak}$ (od izmjenične komponente magnetskog toka namota armature pri neuzbuđenome motoru). Na slici 2.b raspodjela je amplitudnih vrijednosti izmjenične komponente indukcije $B_{\delta k}$ pri čemu se isprekidanom linijom nacrtana krivulja odnosi na magnetski nezasićeno stanje, a krivulja nacrtana punom linijom na magnetski zasićeno stanje. Na slici 2.c predočena je raspodjela magnetskog toka ulančenoga sa zavojem namota armature pri različitom položaju zavoja na armaturnom obodu. Na slici 3.a prikazano je određivanje indukcije $B'_{\delta k}$ u zračnom rasporu na polovici papuče glavnog pola kad se zbrajaju protjecanja $\Theta_{\mu ak}$ (od magnetskog kruga armature) i $\Theta_{\mu uk}$ (od magnetskog kruga glavnih polova), a na slici 3.b određivanje indukcije $B''_{\delta k}$ na polovici papuče glavnog pola kad se spomenuta protjecanja odbijaju. Zbog vrtložnih struja u krugu magnetskog toka armature protjecanje $\Theta_{\mu ak}$ fazno je pomaknuto za kut ψ_a prema struji armature I_{ak}. Kut faznog pomaka protjecanja $\Theta_{\mu uk}$ (ili struje magnetiziranja uzbudnog namota) prema struji armature I_{ak} određen je za nezavisni motor na slikama

11.4–2. i 11.4–4, a za serijski motor na slici 11.5–3. Zbroj vektora $\overline{\Theta}_{\mu ak}$ i $\overline{\Theta}_{\mu uk}$ je rezultantno protjecanje izmjenične komponente, koje zbog zasićenja vrhova polne papuče i zubi istosmjernom komponentom, te posljedično većega magnetskog otpora, daje malu vrijednost indukcije $B'_{\delta k}$ u zračnom rasporu glavnih polova. Razlika vektora $\overline{\Theta}_{\mu ak}$ i $\overline{\Theta}_{\mu uk}$ je manje rezultantno protjecanje izmjenične komponente, ali, zbog manjeg zasićenja od uzbude istosmjernom komponentom i manjeg magnetskog otpora, daje veću vrijednost indukcije $B''_{\delta k}$ u zračnom rasporu glavnih polova. U nezasićenom stanju magnetskog kruga glavnih polova zbog magnetiziranja istosmjernom komponentom, indukcija je $B'_{\delta k} > B''_{\delta k}$, kao i za istosmjernu komponentu.

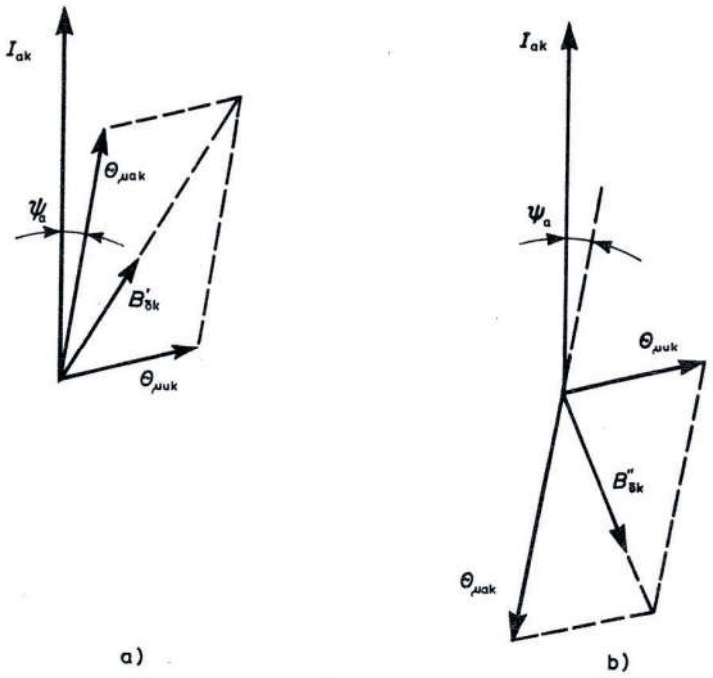


Sl. 2. Raspodjela izmjenične komponente indukcije i ulančenoga magnetskog toka u zračnom rasporu glavnog pola

Raspodjelu napona rotacije E_{ak} dobivamo određivanjem induciranog napona između susjednih kolektorskih lamela:

$$e_{ak} = 2B_{\delta k} l_i v_a w_s \frac{p}{a}. \tag{4}$$

Tu je $B_{\delta k}$ k-ti harmonik indukcije u zračnom rasporu glavnih polova na promatranom mjestu, l_i idealna dužina paketa, v_a obodna brzina armature, w_s broj zavoja između lamela kolektora, p je broj pari polova i a broj pari paralelnih grana armaturnog namota.



Sl. 3. Određivanje magnetske indukcije izmjenične komponente u zračnom rasporu glavnih polova

Raspodjelu napona samoindukcije E_{ask} dobivamo određivanjem tog napona između kolektorskih lamela, tj.:

$$e_{ask} = \omega_k w_s \Phi_{ak} \frac{p}{a}. \tag{5}$$

Pri tome je Φ_{ak} izmjenična komponenta magnetskog toka armature ulančena s w_s zavoja prema slici 2.c.

Raspodjelu napona transformacije E_{tgk} postižemo određivanjem napona transformacije između kolektorskih lamela, koji iznosi:

$$e_{tgk} = \omega_k w_s \Phi_{glk} \frac{p}{a}, \tag{6}$$

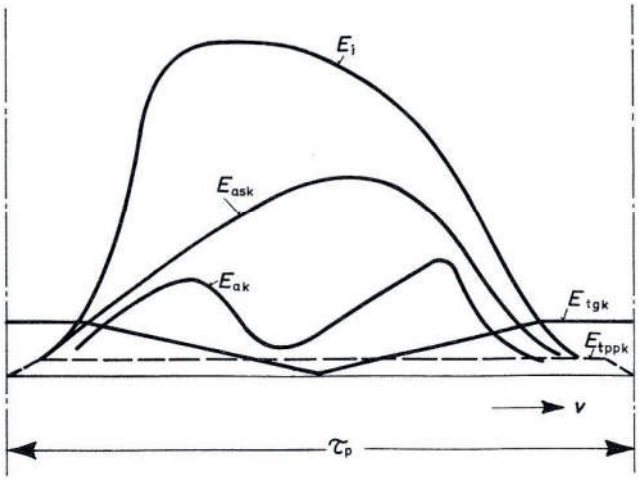
pri čemu je Φ_{glk} izmjenična komponenta glavnoga magnetskog toka.

Amplituda napona transformacije e_{tppk} jednaka je za sve zavoje namota armature (osim onih u zoni komutacije) jer magnetski tok pomoćnih polova ulazi i izlazi iz armature samo pod pomoćnim polovima. Napon transformacije između kolektorskih lamela iznosi:

$$e_{tppk} = \omega_k w_s \Phi_{\delta ppk} \frac{p}{a}. \tag{7}$$

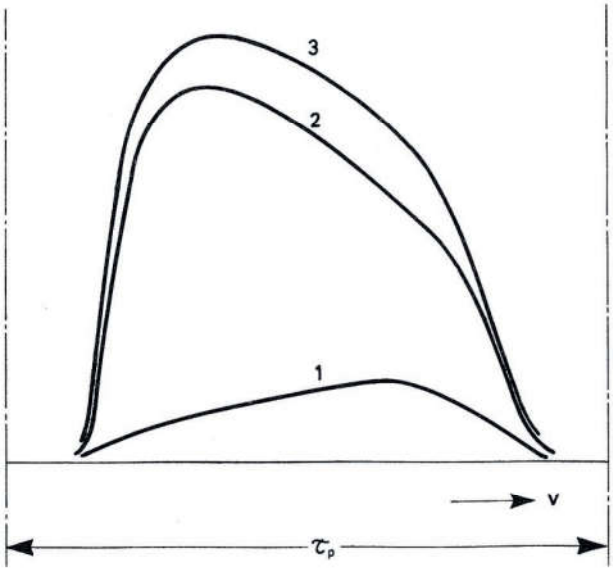
U relaciji je $\Phi_{\delta ppk}$ izmjenična komponenta magnetskog toka u zračnom rasporu pomoćnog pola.

Valja pripomenuti da su inducirani naponi dobiveni relacijama od (4) do (7) međusobno fazno pomaknuti. Napon rotacije e_{ak} je u fazi s vektorom magnetske indukcije $B_{\delta k}$, a inducirani naponi e_{ask}, e_{tgk} i e_{tppk} fazno zaostaju za kut $\frac{\pi}{2}$ iza magnetskog toka koji ih stvara. Na slici 4. je, u primjeru nekompenziranog motora, prikazana raspodjela amplitudnih vrijednosti svih razmatranih induciranih napona po kolektorskom obodu, bez obzira na njihov međusobni fazni pomak. Iz raspodjele induciranih napona na slici 4. vidi se



Sl. 4. Raspodjela induciranih napona izmjenične komponente po kolektorskom obodu

da se u zasićenom stanju magnetskog kruga glavnih polova (posebno vrhova polnih papuča i zubi armature) inducirani napon E_{ask} poprima maksimalnu vrijednost na strani simetrale glavnog pola suprotnoj onoj maksimalne vrijednosti induciranog napona E_i istosmjerne komponente. Na slici 5. prikazana je raspodjela induciranih napona po kolektorskom obodu u primjeru nekompenziranog motora, pri čemu krivulja 1 znači vektorski zbroj izmjeničnih



Sl. 5. Raspodjela induciranih napona izmjenične i istosmjerne komponente, te ukupnog napona po kolektorskom obodu

komponenata napona, krivulja 2 istosmjernu komponentu i krivulja 3 ukupni napon između kolektorskih lamela. Iz krivulje 3 vidi se da pri valovitom napajanju motora dobivamo višu vrijednost maksimalnog napona između lamela kolektora e_{kmax} i da ona nastaje na mjestu bližemu simetrali glavnog pola nego pri istosmjernom napajanju. U primjeru kompenziranog motora induktivitet je namota armature manji, pa je smanjen utjecaj induciranog napona E_{ask} na raspodjelu napona po kolektorskom obodu.

Provedenim je razmatranjem obrazloženo potencijalno stanje na kolektoru istosmjernog motora pri valovitom napajanju. Određivanje vrijednosti maksimalnog napona između lamela kolektora pomoću raspodjele svih induciranih napona izmjenične komponente dugotrajan je rad i zahtijeva poznavanje raznih konstrukcijskih podataka. Zato se u praksi, pri maloj valovitosti glavnoga magnetskog toka, vrijednost maksimalnog napona između lamela kolektora određuje približnom metodom. Pretpostavlja se da maksimalni napon pri valovitom napajanju nastaje na jednakoj udaljenosti od simetrale glavnog pola kao pri istosmjernom napajanju. Vrijednost maksimalnog napona između susjednih kolektorskih lamela izračunava se prema relaciji (5.4–27) za nekompenzirane i prema (5.4–31) za kompenzirane motore, s tim što se protjecanje istosmjerne komponente namota armature poveća za amplitudnu vrijednost protjecanja izmjenične komponente. Provedena ispitivanja pokazuju da porast vrijednosti maksimalnog napona između kolektorskih lamela valovito napajanim motorima iznosi od 10 do 20 % kad su nekompenzirani i do 5 % kad su oni kompenzirani.

11.6.2. Nekompenzirani napon svitka u komutaciji

Pri valovitom napajanju istosmjernog motora, u svitku koji komutira pojavljuju se izmjenične komponente induciranih napona. To su napon samoindukcije e_{sk} uzrokovan izmjeničnom komponentom struje armature I_{ak}, napon e_{ppk} zbog izmjenične komponente magnetskog toka $\Phi_{\delta ppk}$ u zračnom rasporu pomoćnog pola i napon transformacije e_{tk} nastao djelovanjem izmjenične komponente glavnoga magnetskog toka Φ_{glk}.Spomenuti inducirani naponi imaju međusobni fazni pomak i njihov vektorski zbroj nije jednak nuli, pa u svitku koji komutira nastaje nekompenzirani napon Δe_k i, kao posljedica, teškoće u komutaciji.

Napon samoindukcije približno je u fazi sa strujom armature I_{ak}, a njegova amplitudna vrijednost k-tog harmonika iznosi:

$$e_{sk} = v_{ik} e_s. \tag{8}$$

Pri tome je v_{ik} valovitost k-tog harmonika struje armature, a e_s napon samoindukcije istosmjerne komponente.

Amplitudna vrijednost *napona transformacije* bit će:

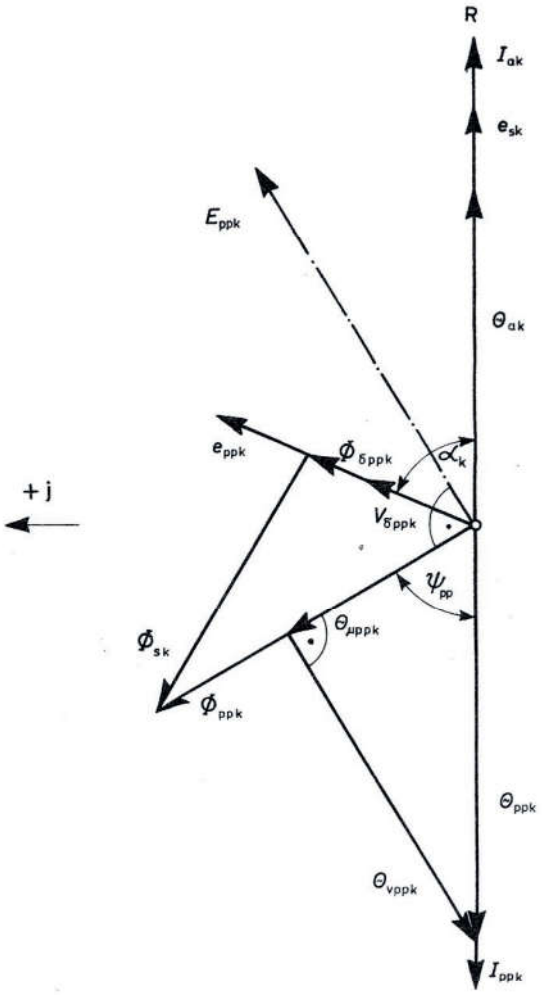
$$\bar{e}_{tk} = -j\omega_k w_s \bar{\Phi}_{glk} = \omega_k w_s \Phi_{glk} e^{-j\alpha_t}, \tag{9}$$

pa je α_t kut faznog pomaka napona transformacije prema struji armature I_{ak}. Serijskom je motoru kut faznog pomaka prema slici 11.5–3. $\alpha_t = \alpha + \psi_g + \frac{\pi}{2}$, a nezavisnom motoru valja α_t odrediti iz slika 11.4–2. i 11.4–4.

Prije određivanja vektora napona e_{ppk} svitka u komutaciji valja se detaljnije upoznati sa zbivanjima u magnetskom krugu pomoćnih polova, s magnetskim otporima specifičnima

za taj magnetski krug i s postupkom dobivanja izmjenične komponente magnetskog toka $\Phi_{\delta ppk}$ u zračnom rasporu i magnetskog toka Φ_{ppk} u jezgri pomoćnog pola.

Na slici 6. prikazan je vektorski dijagram protjecanja, magnetskih tokova i napona izmjenične komponente za magnetski krug pomoćnih polova u primjeru nekompenziranog motora s masivnim jarmom statora i masivnom jezgrom pomoćnog pola. Napon samoindukcije e_{sk} svitka u komutaciji u fazi je sa strujom armature I_{ak}. Protjecanje namota

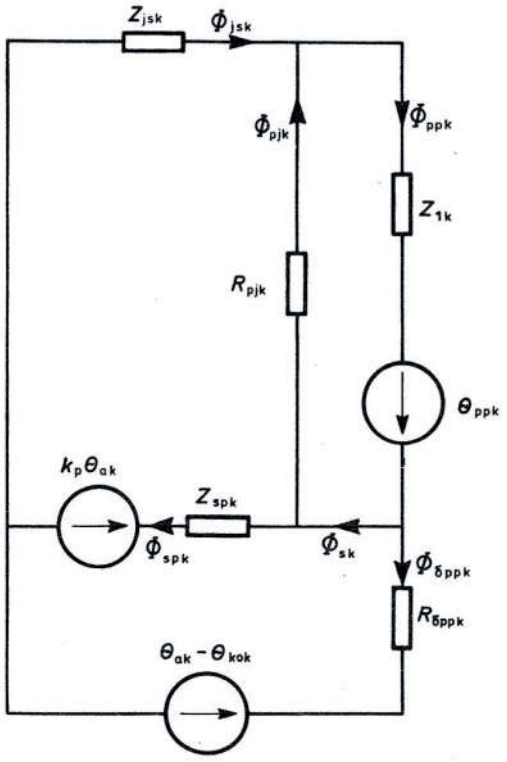


Sl. 6. Vektorski dijagram izmjenične komponente za magnetski krug pomoćnih polova

pomoćnih polova Θ_{ppk} smanjeno za protjecanje vrtložnih struja Θ_{vppk} magnetskog kruga pomoćnih polova daje protjecanje magnetiziranja $\Theta_{\mu ppk}$, pa je magnetski tok u jezgri pomoćnog pola Φ_{ppk} u fazi s protjecanjem $\Theta_{\mu ppk}$. Napon u namotu pomoćnog pola induciran od magnetskog toka Φ_{ppk} označen je s E_{ppk}. Magnetski tok jezgre pomoćnog pola Φ_{ppk} dijeli se na dva dijela. Prvi, označen s $\Phi_{\delta ppk}$, prolazi kroz zračni raspor pomoćnog pola u armaturu i u svitku koji komutira inducira napon rotacije e_{ppk} s njim u fazi. Drugi dio, označen s Φ_{sk}, rasipni je magnetski tok. Kut faznog pomaka između magnetskih tokova $\Phi_{\delta ppk}$ i Φ_{sk} ovisi o izvedbi magnetskog kruga kojim se zatvaraju ti magnetski tokovi, i jako se povećava s porastom magnetskog toka rasipanja Φ_{sk}. Uz masivne dijelove u magnetskom krugu, magnetski tok $\Phi_{\delta ppk}$ i s njim u fazi magnetski napon zračnog raspora pomoćnog pola $V_{\delta ppk}$ relativno su mali (zbog djelovanja vrtložnih struja i velikoga rasipnog magnetskog toka) i takva su faznog položaja da stvoreni napon e_{ppk} u osnovi ne kompenzira napon samoindukcije e_{sk}, jer je manjeg iznosa i suprotno je usmjeren. Za

potpunu kompenzaciju napona samoindukcije e_{sk} naponom e_{ppk} uzrokovanim magnetskim tokom pomoćnih polova, morao bi napon e_{ppk} biti jednakog iznosa i suprotnog smjera naponu e_{sk}.

Da se ustanovi izmjenična komponenta magnetskog toka $\Phi_{\delta ppk}$ u zračnom rasporu pomoćnog pola i magnetskog toka Φ_{ppk} u jezgri pomoćnog pola, upotrebljava se nadomjesna shema [L 41] prikazana na slici 7. Na nadomjesnoj shemi magnetskog kruga



Sl. 7. Nadomjesna shema spoja magnetskih otpora u magnetskom krugu pomoćnih polova

pomoćnih polova za izmjeničnu komponentu k-tog harmonika Θ_{ppk} je protjecanje namota pomoćnog pola, Θ_{ak} protjecanje namota armature i Θ_{kok} je protjecanje namota kompenzacije. Također je $k_p\Theta_a$ magnetski napon polne papuče glavnog pola nekompenziranog motora i Φ_{sk} je ukupni rasipni magnetski tok, koji dijelom Φ_{pjk} prelazi od jezgre pomoćnog pola na jaram statora a dijelom Φ_{spk} od jezgre pomoćnog pola na papuču glavnog pola. Tu je magnetski otpor jarma statora Z_{jsk}, zatim su rasipanja na papuču glavnog pola Z_{spk} i rasipanja na jaram statora R_{pjk}, pa prvoga zračnog raspora pomoćnog pola (prema armaturi) $R_{\delta ppk}$, te jezgre pomoćnog pola i drugoga zračnog raspora (prema jarmu) Z_{1k}.

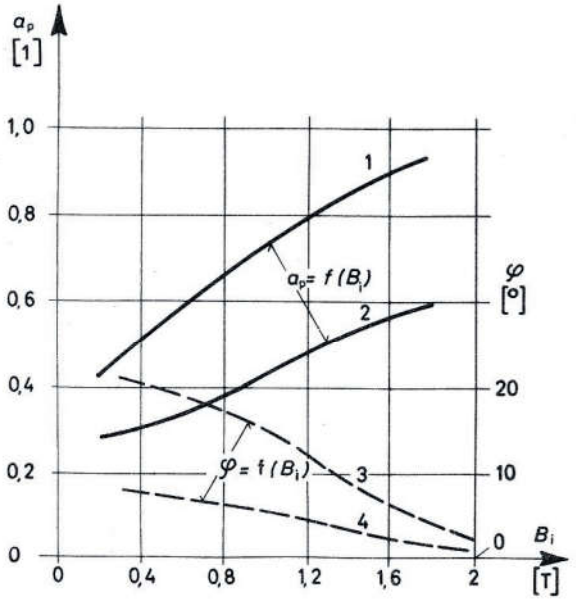
Određivanje rasipnoga magnetskog toka Φ_{spk} razlikuje se nekompenziranom i kompenziranom motoru. *Nekompenzirani motor*, zbog protjecanja namota armature, ima između vrhova polne papuče istoga glavnog pola određeni magnetski napon, koji smanjuje rasipni magnetski tok pomoćnih polova Φ_{spk}. Utjecaj magnetskog napona na polnoj papuči glavnog pola u shemi je na slici 7. prikazan protjecanjem $k_p\Theta_a$. U tom primjeru magnetski je otpor Z_{spk} jednak otporu R_{spk} međuprostora između jezgre pomoćnog pola i polne papuče glavnog pola. *Kompenziranom motoru* protjecanje je namota armature poništeno djelovanjem protjecanja namota kompenzacije, pa je $k_p\Theta_a = 0$. U tom se primjeru magnetski otpor Z_{spk} sastoji iz otpora R_{spk} (kao pri nekompenziranom motoru) i otpora Z_{pk} polne papuče glavnog pola.

Magnetski otpor Z_{1k} sastoji se od magnetskog otpora jezgre pomoćnog pola Z_{jpk} i magnetskog otpora drugoga zračnog raspora pomoćnog pola (prema jarmu) $Z_{\delta pjk}$. U magnetskom krugu pomoćnih polova može se zanemariti magnetski otpor zubi i jarma armature zbog niskih vrijednosti magnetske indukcije u tim dijelovima magnetskog kruga.

Koeficijent k_p, za određivanje magnetskog napona polne papuče glavnog pola nekompenziranog motora, kompleksna je veličina i iznosi:

$$\bar{k}_p = a_p \alpha_p e^{j\varphi}, \tag{10}$$

Pri tome je α_p prekrivanje glavnog pola, a a_p i φ su modul i argument, ovisni o istosmjernoj komponenti magnetske indukcije B_i u papuči glavnog pola. Vrijednosti modula a_p i argumenta φ ovisno o magnetskoj indukciji B_i za kružnu frekvenciju od 628 rad s^{-1} prikazuje slika 8. Tu se krivulje 1 i 3 odnose na neizolirani lim debljine od 1 do 2 mm s neizoliranim zakovicama, a krivulje 2 i 4 na izolirani magnetski lim debeo 1 mm.



Sl. 8. Modul i argument koeficijenta k_p za određivanje magnetskog napona papuče glavnog pola

Magnetski otpor Z_{pk} polne papuče glavnog pola, pri određivanju rasipanja s jezgre pomoćnoga na papuču glavnog pola kompenziranih motora, računa se načelno prema relaciji (11.3–20) i iznosi:

$$\bar{Z}_{pk} = K e^{j\psi_k} \frac{b_p}{2\bar{\mu}_p h_p l_p k_{\check{z}}} \left[\frac{A}{Vs}\right]. \tag{11}$$

U izrazu je K modul koeficijenta povećanja magnetskog otpora uzrokovanoga konstrukcijsko-tehnološkom izvedbom glavnog pola, zatim je ψ_k argument modula K predočen na slici 11.3–7 i $\bar{\mu}_p$ pulsacijski magnetski permeabilitet prikazan na slici 11.3–8. Također su l_p dužina jezgre glavnog pola, $k_{\check{z}}$ koeficijent punjenja željezom, te b_p i h_p dimenzije polne papuče glavnog pola predočene na slici 9.

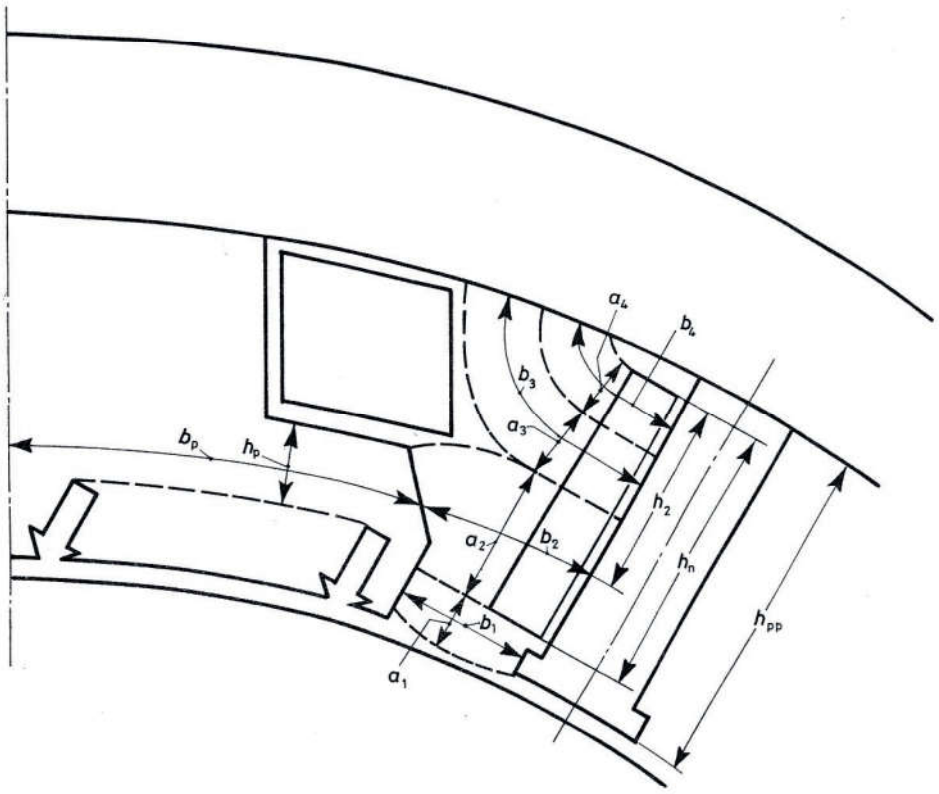
Magnetski otpor rasipanja između jezgre pomoćnog pola i polne papuče glavnog pola kompenziranog i nekompenziranog motora, uz oznake na slici 9, iznosi:

$$R_{spk} = \frac{1}{\mu_o (l_{pp} + l_p)\left(\frac{a_1}{b_1} + \frac{a_2}{b_2} c_2\right)} \left[\frac{A}{Vs}\right]. \tag{12}$$

Tu je l_{pp} dužina jezgre pomoćnog pola, a c_2 je koeficijent ulančenja rasipnoga magnetskog toka sa zavojima pomoćnog pola. Na slici 9. prikazan je smještaj glavnog i pomoćnog pola s pripadnim namotima, te su ucrtane silocijevi magnetskih rasipnih tokova s jezgre pomoćnog pola na papuču glavnog pola i jaram statora. Određivanjem srednje širine silocijevi od a_1 do a_n i pripadne srednje dužine silocijevi naći ćemo rasipni magnetski tok, a na osnovi visina namota od h_2 do h_n još i ulančeni rasipni magnetski tok sa zavojima pomoćnog pola. Koeficijent ulančenja pojedinih dijelova (silocijevi) rasipnoga magnetskog toka bit će:

$$c_{2...n} = \frac{h_{2...n}}{h_n}. \tag{13}$$

Valja pripomenuti da je za dio rasipnoga magnetskog toka ispod namota (silocijev širine a_1 i dužine b_1 na sl. 9) koeficijent ulančenja jednak jedan.



Sl. 9. Objašnjenje dimenzija za određivanje magnetskog otpora rasipanja pomoćnog pola

Magnetski otpor rasipanja od jezgre pomoćnog pola na jaram statora, uz oznake na slici 9, iznosi:

$$R_{pjk} = \frac{1}{2\mu_0\left[l_{pp}\left(\frac{a_3}{b_3}c_3 + \frac{a_4}{b_4}c_4\right) + \frac{0{,}045}{h_{pp}}(l_{pp} - l_a + \pi b_{pps})\right]} \left[\frac{A}{Vs}\right]. \tag{14}$$

U relaciji su b_{pps} i h_{pp} srednja širina i visina jezgre pomoćnog pola, l_a je dužina paketa limova armature, a c_3 i c_4 koeficijenti su ulančenja rasipnoga magnetskog toka sa zavojima pomoćnog pola.

Magnetski otpor prvoga zračnog raspora pomoćnog pola (prema armaturi) iznosi:

$$R_{\delta ppk} = \frac{\delta_{pp} k_{c3}}{\mu_o l_{pp}(b_{\delta pp} + 2{,}5\delta_{pp})} \left[\frac{A}{Vs}\right]. \tag{15}$$

Tu je δ_{pp} zračni raspor pod sredinom pomoćnog pola, k_{c3} je Carterov koeficijent pod pomoćnim polom i $b_{\delta pp}$ je širina polne papuče pomoćnog pola prema slici 4.5–13.

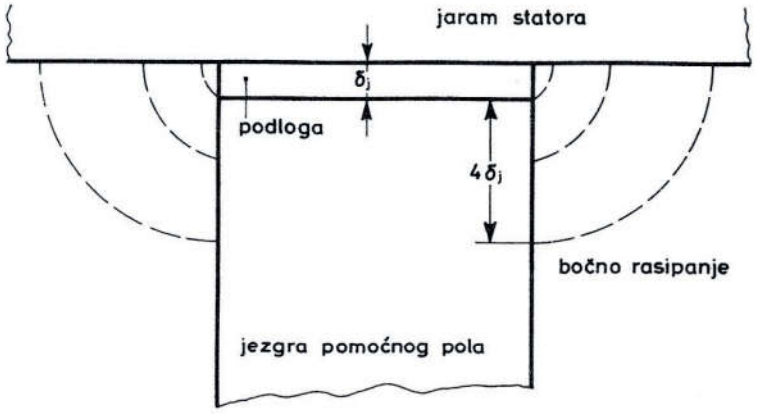
Podijeljenome zračnom rasporu pomoćnog pola može drugi zračni raspor (prema jarmu statora) biti izveden s podlogom od električki nevodljivog (izolacijskog) ili od električki vodljivog materijala (metalna nemagnetska podloga). Magnetski otpor drugoga zračnog raspora pomoćnog pola u primjeru izvedbe s izolacijskim materijalom iznosi:

$$Z_{\delta pjk} = R_{\delta pjk} = \frac{\delta j}{\mu_o l_{pp}(b_{pp} + 2{,}5\delta j)} \left[\frac{A}{Vs}\right], \tag{16}$$

pri čemu je δ_j drugi zračni raspor.

Magnetski otpor drugoga zračnog raspora pomoćnog pola $Z_{\delta pjk}$ u primjeru izvedbe s podlogom od električki vodljivoga nemagnetskog materijala sastoji se od dva paralelna otpora, onog same podloge Z_{pok} i onog od bočnog rasipanja $R_{b\delta}$. Magnetske silocijevi bočnog rasipanja za određivanje magnetskog otpora $R_{b\delta}$ prikazuje slika 10. Magnetski otpor podloge je:

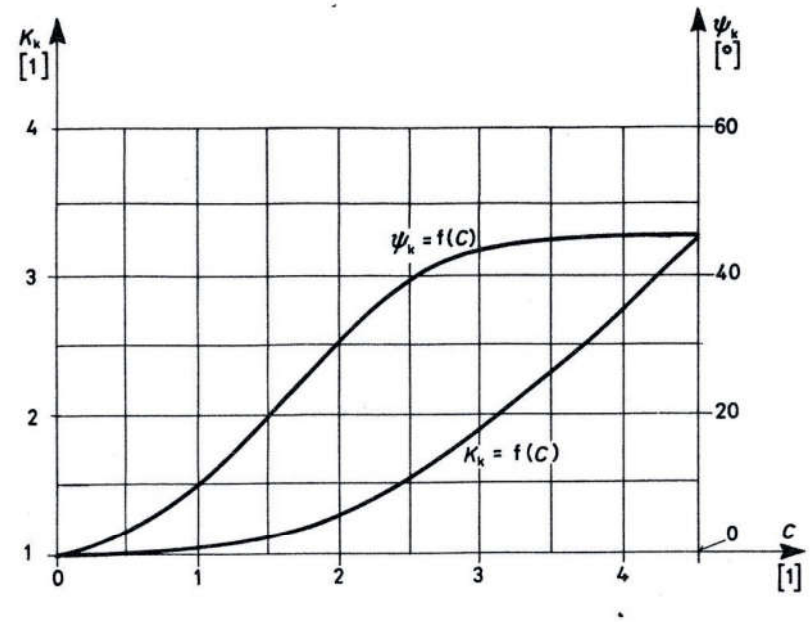
$$\underline{Z}_{pok} = K_k e^{j\psi_k} \frac{\delta_j}{\mu_o a_{po} b_{po}} \left[\frac{A}{Vs}\right]. \tag{17}$$



Sl. 10. Prikaz bočnog rasipanja drugoga zračnog raspora pomoćnog pola

Pri tome su K_k i ψ_k modul i argument koeficijenta povećanja magnetskog otpora, te a_{po} i b_{po} širina i dužina podloge okomito na smjer magnetskog toka. Koeficijent povećanja magnetskog otpora $\underline{K}_k$ pokazuje koliko se puta povećava magnetski otpor drugome zračnom rasporu kad se u njemu nalazi električki vodljiva podloga umjesto zraka. Na slici 11. prikazana je ovisnost modula $K_k = f(C)$ i argumenta $\psi_k = f(C)$ koeficijenta povećanja magnetskog otpora, a vrijednost C iznosi:

$$C = g\sqrt{\frac{\omega_k \varkappa \mu_o}{2}} \quad [1]. \tag{18}$$



Sl. 11. Modul i argument koeficijenta povećanja magnetskog otpora podloge

Tu je $\varkappa$ specifična električna vodljivost podloge [$\Omega^{-1}m^{-1}$], ω_k kružna frekvencija [rad s^{-1}], μ_o permeabilitet zraka [Vs $A^{-1}m^{-1}$] i g je manja od dviju dimenzija (a_{po} ili b_{po}) podloge [m].

Magnetski otpor bočnog rasipanja bit će;

$$R_{b\delta} = \frac{1}{2\lambda\mu_o(l_{pp} + b_{pp})}, \tag{19}$$

a uz magnetsku vodljivost bočnog rasipanja (na visini pola jednakoj četiri zračna raspora) $\lambda = 1{,}4$ iznosi:

$$R_{b\delta} = \frac{28{,}4}{l_{pp} + b_{pp}} 10^4 \left[\frac{A}{Vs}\right]. \tag{20}$$

U relaciji su l_{pp} i b_{pp} dužina i širina jezgre pomoćnog pola [m].
Magnetski otpor drugoga zračnog raspora pomoćnog pola je:

$$\bar{Z}_{\delta pjk} = \frac{\bar{Z}_{pok} + R_{b\delta}}{\bar{Z}_{pok} + R_{b\delta}} \left[\frac{A}{Vs}\right]. \tag{21}$$

Nakon upoznavanja s nadomjesnom shemom, magnetskim, otporima i zbivanjima u magnetskom krugu pomoćnih polova možemo preći na određivanje izmjenične komponente magnetskog toka u zračnom rasporu i jezgri pomoćnog pola. Primjenom Kirchhoffovih zakona na zamke i čvorišta nadomjesne sheme prema slici 7, uz realnu os u smjeru struje armature I_{ak}, odnosno protjecanja namota armature Θ_{ak}, dobivamo za izmjeničnu komponentu magnetskog toka u zračnom rasporu pomoćnog pola:

$$\bar{\Phi}_{\delta ppk} = \frac{(\Theta_{ak} - \Theta_{kok})[1 + (1 - \bar{k}_p)\bar{A}_1] - \Theta_{ppk}(1 - \bar{A}_2)}{\bar{A}_1(\bar{Z}_{spk} + R_{\delta ppk}) + R_{\delta ppk}} = \Phi_{\delta ppk} e^{j\alpha_k} \quad [Vs], \tag{22}$$

pri čemu je:

$$\bar{A}_1 = \frac{\bar{Z}_{jsk} + \bar{A}_2 R_{pjk}}{\bar{Z}_{spk}} \quad \text{i} \quad \bar{A}_2 = \frac{\bar{Z}_{1k}}{\bar{Z}_{1k} + R_{pjk}}.$$

Izmjenična komponenta magnetskog toka u jezgri pomoćnog pola iznosi:

$$\bar{\Phi}_{ppk} = \frac{\Theta_{ak} - \Theta_{kok} - \Theta_{ppk} A_3 - \Phi_{\delta ppk} R_{\delta ppk}}{\bar{Z}_{jsk} + \bar{A}_3 \bar{Z}_{lk}} = \Phi_{ppk} e^{j\alpha_{pp}}, \tag{23}$$

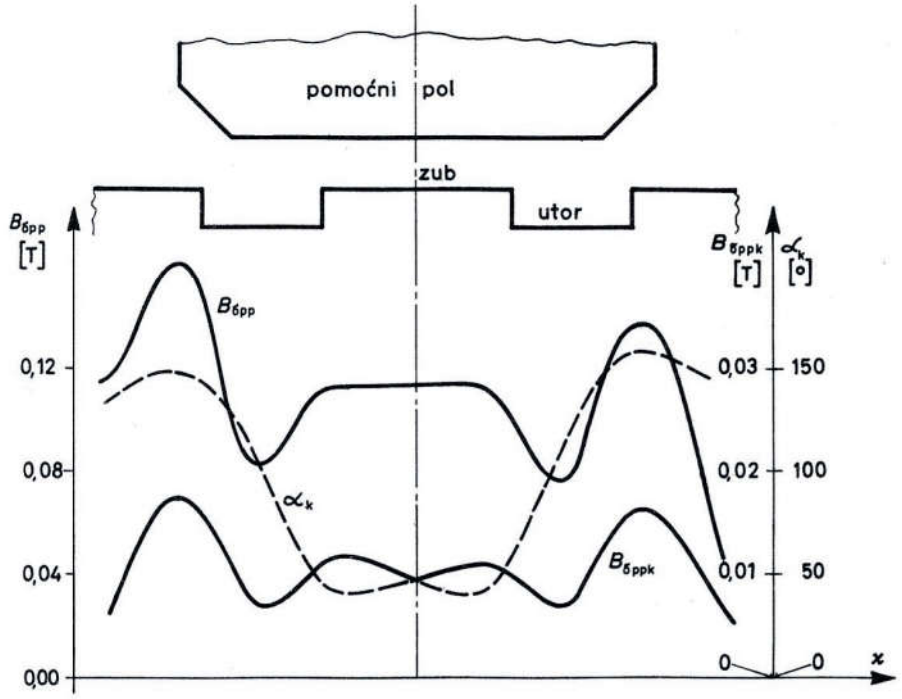
gdje je:

$$\bar{A}_3 = \frac{\bar{Z}_{jsk} + R_{pjk}}{R_{pjk}}.$$

Na osnovi izmjenične komponente magnetskog toka u jezgri pomoćnog pola Φ_{ppk} možemo odrediti izmjeničnu komponentu induciranog napona namota pomoćnih polova $\bar{E}_{ppk}$. Taj smo napon već upotrebljavali za određivanje vektorskog dijagrama napona armaturnoga strujnog kruga nezavisno uzbuđenog motora na slici 11.4–4. ili serijsko uzbuđenog motora na slici 11.5–3. Pri tome se ne smije zaboraviti da kut ψ_{pp} faznog pomaka struje I_{ak} i magnetskog toka Φ_{ppk} na slikama 11.4–4. i 11.5–3. iznosi $\psi_{pp} = \pi - |\alpha_{pp}|$.

Napon rotacije e_{ppk} uzrokovan magnetskim tokom u zračnom rasporu pomoćnog pola s njim je u fazi, a za amplitudnu vrijednost k-tog harmonika dobivamo:

$$\bar{e}_{ppk} = \frac{2 v_a w_s \bar{\Phi}_{\delta ppk}}{b_{\delta pp} + 2{,}5\delta_{pp}} = e_{ppk} e^{j\alpha_k}. \tag{24}$$



Sl. 12. Raspodjela istosmjerne i izmjenične komponente indukcije, te faznog pomaka pod pomoćnim polom

Pri tome je α_k kut faznog pomaka napona e_{ppk} prema struji armature I_{ak}, a v_a je obodna brzina armature. Na slici 12. prikazana je načelno raspodjela magnetske indukcije pod pomoćnim polom, istosmjerne komponente $B_{\delta pp}$, izmjenične komponente $B_{\delta ppk}$ i kuta α_k faznog pomaka indukcije $B_{\delta ppk}$ prema struji namota armature I_{ak} kad je riječ o izvedbi magnetskog kruga pomoćnih polova s masivnim dijelovima.

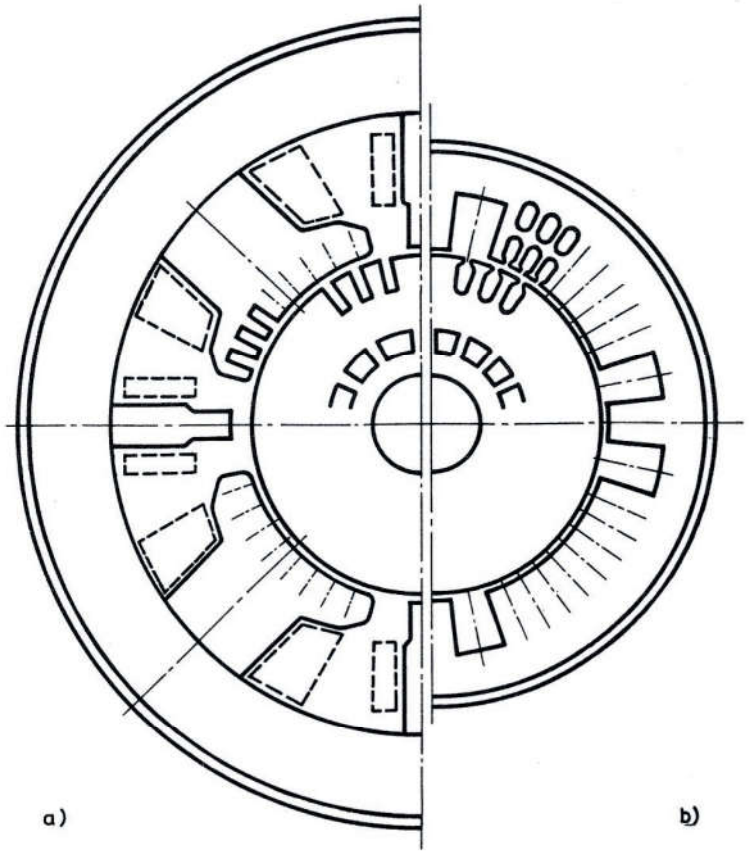
U primjeru nekompenziranog motora s masivnim jarmom statora i masivnom jezgrom pomoćnih polova (vektorski dijagram na sl. 6) vrijednost napona e_{ppk} relativno je mala i nepovoljnoga faznog položaja, tako da se naponom $\bar{e}_{ppk}$ ne kompenzira napon samoindukcije $\bar{e}_{sk}$. Iz vektorskog dijagrama na slici 6, nadomjesne sheme magnetskog kruga pomoćnih polova na slici 7. i provedenih razmatranja dobivamo dva osnovna uzroka smanjenja napona e_{ppk} i njegova nepovoljnoga faznog položaja. To su vrtložne struje protjecanja Θ_{vppk} i rasipni magnetski tok Φ_{sk} magnetskog kruga pomoćnih polova. Osjetno poboljšanje kompenzacije napona e_{sk} možemo ostvariti smanjenjem vrtložnih struja u magnetskom krugu pomoćnih polova, a to znači da jaram statora i jezgre pomoćnih polova moraju biti u lameliranoj izvedbi. Tim postupkom ne samo da se smanjuje fazni pomak između magnetskog toka Φ_{ppk} i protjecanja Θ_{ppk} već se i povećava modul magnetskog toka u zračnom rasporu pomoćnog pola $\Phi_{\delta ppk}$, a time i modul napona e_{ppk}. Lameliranjem jarma statora smanjuju se vrtložne struje i u magnetskom krugu glavnih polova, zbog čega se mijenja napon transformacije e_{tk} po modulu i argumentu, pa to valja uzeti u obzir kad se izračunava ukupni nekompenzirani napon svitka u komutaciji. Pri lameliranju magnetskog kruga, s obzirom na smanjenje vrtložnih struja, valja, u načelu, razlikovati tri izvedbe. Najnepovoljnija je izvedba dijelova magnetskog kruga (posebno jaram, posebno polovi) od neizoliranoga konstrukcijskog lima debljine od 1 do 2 mm. Povoljnija je izvedba dijelova magnetskog kruga od izoliranoga magnetskog lima debljine od 1,0 mm uz učvršćenje polova na jaram svornjacima i vijcima. Najpovoljnija je izvedba kad je stator izrađen od izoliranih magnetskih limova debelih 0,5 mm, a oblikom lima je u jednom komadu izrađen jaram, glavni i pomoćni pol.

Efikasan način kompenzacije napona e_{sk} postiže se pomoću kompenzacijskog namota, pri čemu se, zbog manjeg protjecanja namota pomoćnih polova, smanjuju vrtložne struje i rasipni magnetski tok kruga pomoćnih polova. Jasno je da najefikasniju kompenzaciju napona e_{sk} postižemo ako upotrijebimo kompenzacijski namot uz lameliranu i izoliranu izvedbu magnetskog kruga.

Izvedba motora	Izvedba magnetskog kruga pomoćnih polova			α_k [°]
	jaram statora	jezgra pola	drugi zračni raspor	
Kompenziran	lamelirano		izolacija	~ 180
	lamelirano		mjed 5 mm	160
	masivan	lamelirana	izolacija	140
Nekompenziran	lamelirano		izolacija	~ 180
	masivan	lamelirana	izolacija	105
	masivan	lamelirana	mjed 5 mm	70

Sl. 13. Utjecaj izvedbe magnetskog kruga pomoćnih polova na kut α_k

Utjecaj izvedbe magnetskog kruga pomoćnih polova kompenziranih i nekompenziranih motora na kut α_k faznog pomaka između struje armature I_{ak} i napona e_{ppk} (vidi sl. 6) za harmonik kružne frekvencije $\omega_k = 628$ rad s^{-1}, prikazan je u tablici na slici 13. Iz podataka tu se vidi da masivna izvedba bilo kojeg dijela magnetskog kruga pomoćnih polova ili upotreba električki vodljivog materijala za izvedbu drugoga zračnog raspora pomoćnog pola, smanjuje kut α_k (poželjna vrijednost $\alpha_k \approx 180°$) i stvara teškoće u komutaciji. Zato se pri valovitom napajanju ne upotrebljavaju istosmjerni motori klasične izvedbe (masivni jaram statora i masivni pomoćni polovi), već posebne serije istosmjernih motora kojima se lameliranjem smanjuju vrtložne struje u magnetskom krugu pomoćnih polova i ugrađuje se kompenzacijski namot. Pri tome se, za motore manjih nazivnih momenata (do cca 500 Nm), pa i nekima za posebnu namjenu (npr. električna vuča), statorski paket izvodi od izoliranih magnetskih limova gdje su u obliku lima zajednički sadržani jaram, glavni i pomoćni polovi. Slika 14.a sadrži izvedbu istosmjernoga kompenziranog motora s masivnim jarmom

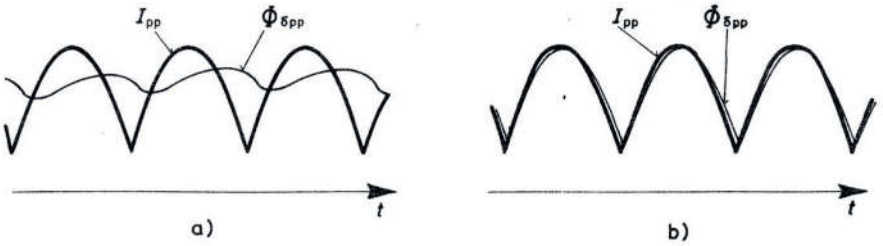


Sl. 14. Izvedbe istosmjernoga kompenziranog motora

statora i pojedinačnim lameliranim polovima koji se na jaram statora učvršćuju svornjacima i vijcima, a na slici 14.b izvedba je istog motora sa statorskim paketom limova. Na slici 15.a nalazimo oscilogram vremenske ovisnosti struje namota pomoćnih polova I_{pp} i magnetskog toka u zračnom rasporu pomoćnog pola $\Phi_{\delta pp}$ za izvedbu istosmjernog motora prema slici 14.a, a na slici 15.b isti je oscilogram za izvedbu istosmjernog motora prema slici 14. b. Valja napomenuti da kut faznog zaostajanja magnetskog toka $\Phi\delta$pp za strujom I_{pp} odgovara kutu $\pi - \alpha_k$.

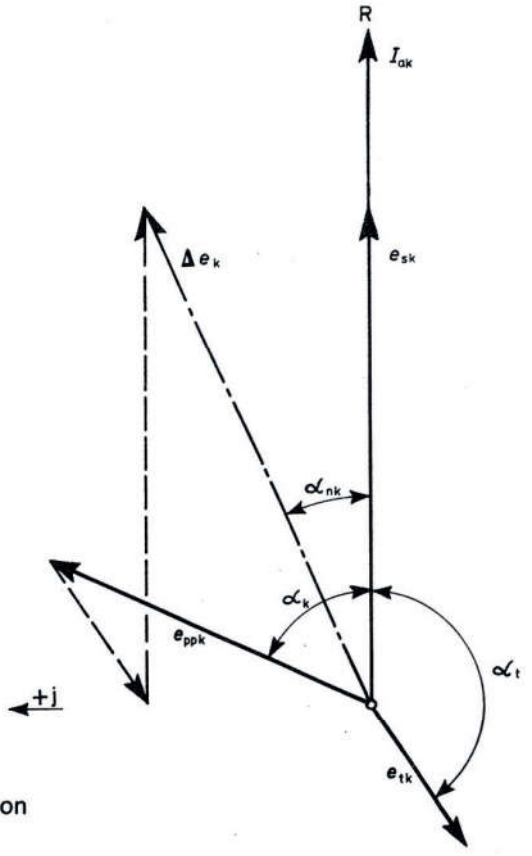
Kad znamo napon samoindukcije $\dot{e}_{sk}$, napon transformacije $e_{tk}e^{-j\alpha_t}$ i napon uzrokovan magnetskim tokom u zračnom rasporu pomoćnih polova $e_{ppk}e^{j\alpha_k}$, možemo odrediti *nekompenzirani napon* svitka u komutaciji za k-ti harmonik:

$$\Delta\bar{e}_k = \bar{e}_{sk} + \bar{e}_{ppk} + \bar{e}_{tk}. \tag{25}$$



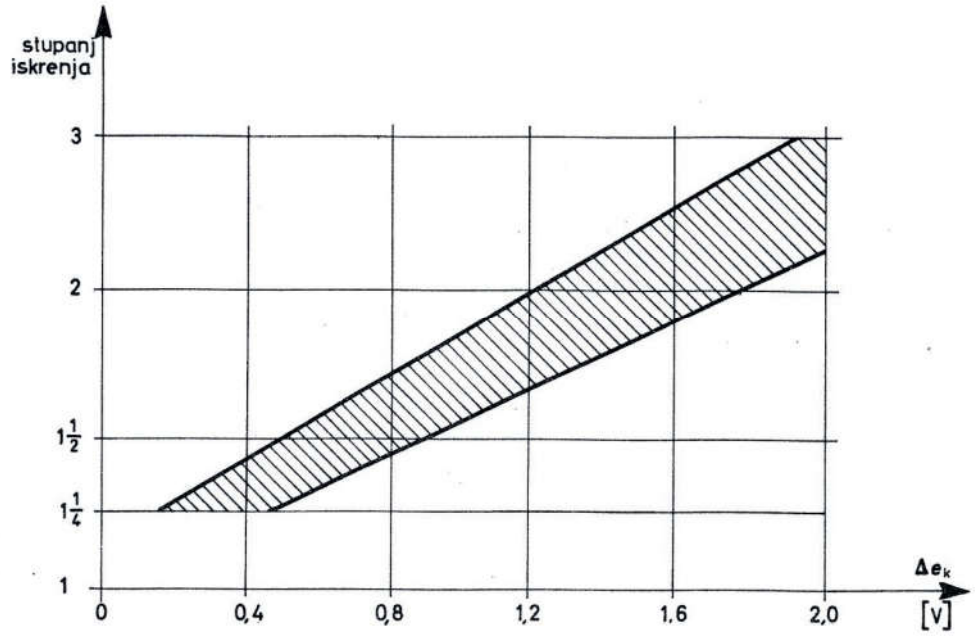
Sl. 15. Vremenski tok struje I_{pp} i magnetskog toka $\Phi_{\delta pp}$

Na slici 16. prikazan je načelni vektorski dijagram pojedinih napona i nekompenziranoga napona svitka u komutaciji uz realnu os u smjeru izmjenične komponente struje armature I_{ak}. Dopuštena amplitudna vrijednost nekompenziranog napona Δe_k iznosi od 0,5 do 1 V, što ovisi o zahtijevanoj kvaliteti komutacije. Na slici 17. predočena je ovisnost očekivanog stupnja iskrenja četkica (vidi tablicu na sl. 5.2-18) o vrijednosti nekompenziranog napona.



Sl. 16. Inducirani naponi i nekompenzirani napon svitka u komutaciji

Modul i argument nekompenziranog napona svitka u komutaciji mijenjaju se s promjenom opterećenja i podešavanjem brzine vrtnje ovisno o vrsti motora (serijski, nezavisni), magnetskom zasićenju istosmjernom komponentom, vrtložnim strujama i rasipnome magnetskom toku.



Sl. 17. Stupanj iskrenja ovisno o nekompenziranom naponu svitka u komutaciji

11.6.3. Gubici

Gubici istosmjernog stroja pri valovitom napajanju veći su od onih pri istosmjernom napajanju, a možemo ih podijeliti na nastale od istosmjerne komponente i one koje posebno stvara izmjenična komponenta. Podjela gubitaka i njihovo određivanje za istosmjenu komponentu već su obrazloženi u odjeljku 6.5, pa ćemo ovdje razmotriti samo gubitke uzrokovane izmjeničnom komponentom. Budući da se gubici naglo smanjuju s povećanjem reda harmonika, za tehnički dovoljno točan račun redovito se uzimaju u obzir gubici samo prvoga harmoničkog člana.

11.6.3.1. Gubici na kolektoru

Valovito napajanome motoru mijenjaju se gubici prelaza struje, a mehanički gubici ostaju konstantni. Prelazni otpori između četkice i kolektora mijenja se s gustoćom struje. Zato povećanje gubitka prelaza zbog izmjenične komponente struje možemo odrediti kao razliku gubitaka pri efektivnoj vrijednosti valovite struje I_{aef} i gubitaka pri srednjoj vrijednosti ispravljene struje I_{ai}, tj.:

$$P_{elčk} = \Delta U_{čef} I_{aef} - \Delta U_{č} I_{ai} \ [W]. \tag{26}$$

Pri tome je $\Delta U_{\text{čef}}$ pad napona četkica pri efektivnoj vrijednosti valovite struje i $\Delta U_{\text{č}}$ pri srednjoj vrijednosti ispravljene struje. Efektivna vrijednost valovite struje u relaciji (26) je:

$$I_{\text{aef}} = \sqrt{I_{\text{ai}}^2 + \frac{I_{\text{ak}}^2}{2}}, \tag{27}$$

a I_{ak} je amplitudna vrijednost izmjenične komponente struje.

11.6.3.2. Gubici u namotima

Gubici u namotima istosmjernog motora zbog izmjenične komponente struje, dijele se na osnovne i dodatne gubitke. Osnovnim gubicima smatraju se oni koje stvara efektivna vrijednost izmjenične komponente struje na radnom otporu namota istosmjernoj struji, a dodatnima oni nastali od vrtložnih struja koje u namotu uzrokuje rasipno magnetsko polje izmjenične komponente.

Osnovni gubici u bilo kojem namotu su:

$$P_{\text{Cuok}} = \left(\frac{I_{\text{xk}}}{\sqrt{2}}\right)^2 R_{\text{i}} \text{ [W]}, \tag{28}$$

pri čemu je I_{xk} amplitudna vrijednost izmjenične komponente struje k-tog harmonika i R_{i} je otpor istosmjernoj struji namota kojem se određuju osnovni gubici.

Dodatni gubici namota armature, te namota glavnih i pomoćnih polova, određuju se različitim postupcima, a u kompenzacijskom se namotu redovito zanemaruju.

Dodatni gubici u namotu armature, nastali zbog izmjenične komponente rasipnoga magnetskog toka utora, bit će:

$$P_{\text{Cudk}} = \left(\frac{I_{\text{ak}}}{\sqrt{2}}\right)^2 R_{ai} k_{\text{ak}} \text{[W]}, \tag{29}$$

a k_{ak} je koeficijent povećanja radnog otpora namota armature. Djelovanjem izmjenične komponente rasipnoga magnetskog toka utora nastupa potiskivanje struje, tj. nejednolika raspodjela gustoće struje po visini vodiča armaturnog namota. To se može nadomjestiti predodžbom kao da je jednolika raspodjela gustoće po visini vodiča, ali je radni otpor vodiča povećan. Koeficijent povećanja radnog otpora namota armature [L34], za vodiče pravokutnog presjeka, iznosi:

$$k_{\text{ak}} = \frac{R_{\text{ak}} - R_{\text{ai}}}{R_{\text{ai}}} = \left\{[\varphi'(\xi') + \frac{1}{3}(m_{\text{v}}^2 - 1)\,\psi'(\xi')] - 1\right\}\frac{l_{\text{a}}}{l_{\text{v}}} \text{ [1]}. \tag{30}$$

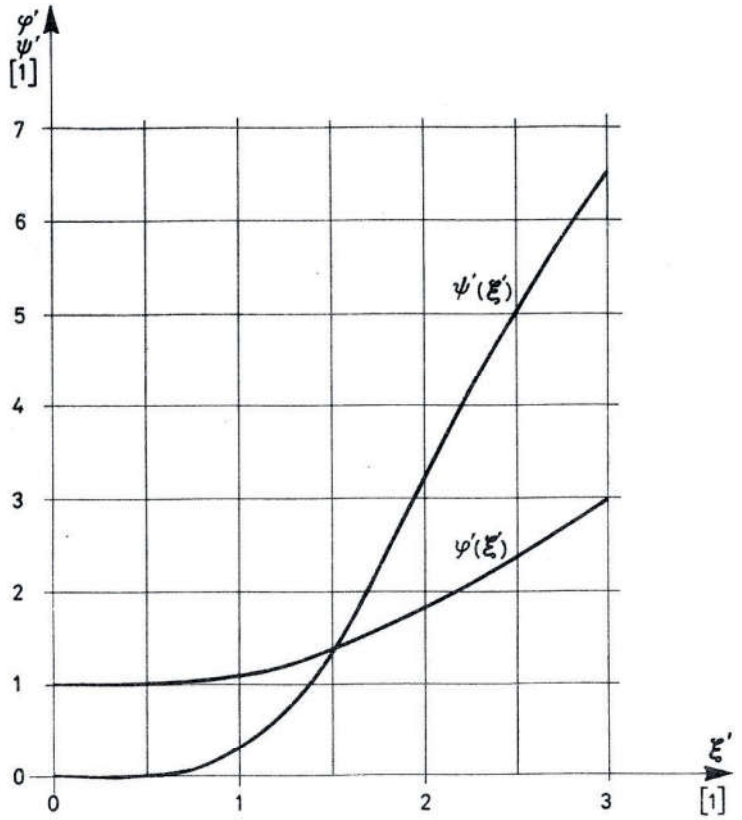
U jednadžbi (30) znače:

$$\varphi'(\xi') = \xi' \frac{\text{sh}2\xi' + \sin 2\xi'}{\text{ch}2\xi' - \cos 2\xi'}, \qquad \psi'(\xi') = 2\xi' \frac{\text{sh}\xi' - \sin\xi'}{\text{ch}\xi' + \cos\xi'} \quad \text{i}$$

$$\xi' = \frac{h_{\text{v}}}{503}\sqrt{\frac{b_{\text{Cu2}}\varkappa_{\text{hl}} f_{\text{k}}}{b_{\text{u2}}}\,\frac{255}{235 + \vartheta}}.$$

Pri tome je ξ' brojna visina vodiča prema izrazu (4.5-31.a), f_{k} je frekvencija k-tog harmonika, m_{v} broj vodiča (ne dionih) po dubini utora, a l_{a} je dužina paketa limova armature i l_{v} dužina vodiča armaturnog namota.

Vrijednosti $\varphi'(\xi')$ i $\psi'(\xi')$ prema prethodnom izrazu nalazimo na slici 18. U namotu armature nastaju još dodatni gubici zbog promjene izmjenične komponente struje armature za trajanja komutacije, no ti se gubici redovito zanemaruju.



Sl. 18. Ovisnost $\varphi'(\xi')$ i $\psi'(\xi')$ za određivanje dodatnih gubitaka u namotu armature

Dodatni gubici u namotu uzbude ili pomoćnih polova koji su nastali zbog vrtložnih struja uzrokovanih izmjeničnom komponentom rasipnoga magnetskog toka, iznose:

$$P_{\text{Cudpk}} = 2p\omega_k \Phi^2_{rk} R_k K_k \text{tg}\psi_k \text{ [W]}. \tag{31}$$

Tu je za proračunavani namot ω_k kružna frekvencija k-tog harmonika, Φ_{rk} izmjenična komponenta rasipnoga magnetskog toka namota i R_k je magnetski otpor zraka u smjeru silnica rasipnoga magnetskog toka za volumen namota, a K_k i ψ_k su modul i argument koeficijenta povećanja magnetskog otpora. Modul $K_k(C)$ i argument $\psi_k(C)$ određuju se prema slici 11, a vrijednost C prema relaciji (18), pri čemu za vrijednost g valja uzeti visinu vodiča namota (manju dimenziju vodiča okomito na rasipni magnetski tok). U izvedbama motora kojima je valovitost izmjenične komponente glavnoga magnetskog toka mala (nezavisna uzbuda s kvalitetnim spojem ispravljača ili šantiran uzbudni namot serijskom motoru), mogu se zanemariti dodatni gubici u namotu uzbude.

11.6.3.3. Gubici u magnetskom krugu

Gubici magnetskog kruga istosmjernog motora, uzrokovani izmjeničnom komponentom magnetskog toka, dijele se na gubitke u željezu i na gubitke u podlogama od električki vodljivoga nemagnetskog materijala (drugi zračni raspor pomoćnih polova).

Gubici u željezu određenog dijela magnetskog kruga glavnih i pomoćnih polova, nastali zbog vrtložnih struja uzrokovanih izmjeničnom komponentom magnetskog toka u tom dijelu, prema relaciji (11.3-9), iznose:

$$P_{\mathrm{Fek}} = 2p\omega_{\mathrm{k}}\Phi^2_{\mathrm{k}}Z_{\mathrm{mk}}\sin\psi_{\mathrm{mk}} \ [\mathrm{W}]. \tag{32}$$

Pri tome je za proračunavani dio magnetskog kruga Φ_{k} izmjenična komponenta magnetskog toka k-tog harmonika, a Z_{mk} i ψ_{mk} su modul i argument magnetskog otpora.

Gubici u podlogama od električki vodljivoga nemagnetskog materijala drugoga zračnog raspora pomoćnih polova, uz pomoć relacije (11.3-9), bit će:

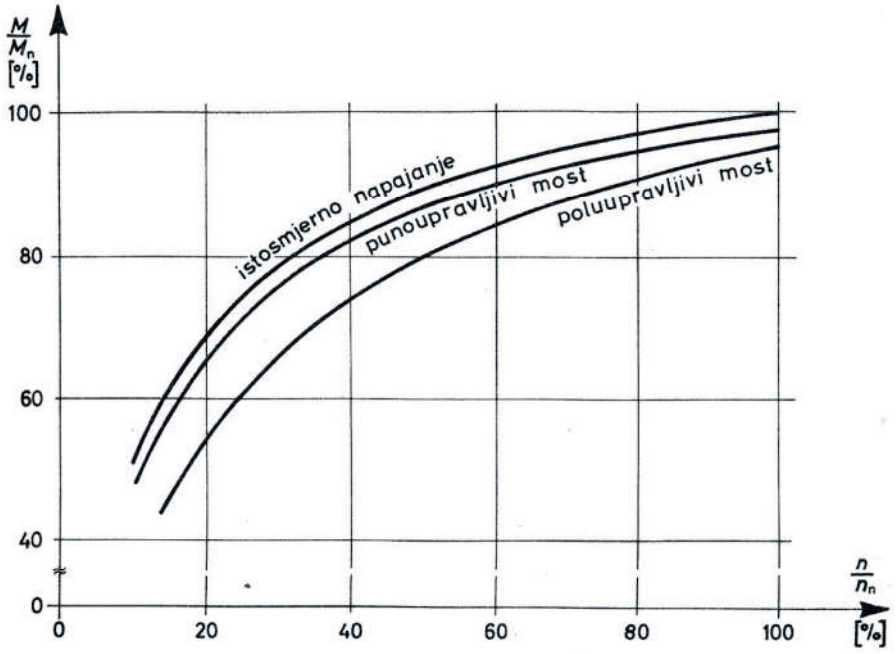
$$P_{\mathrm{pok}} = 2p\omega_{\mathrm{k}}\Phi^2_{\mathrm{ppk}}Z_{\mathrm{pok}}\sin\psi_{\mathrm{k}} \ [\mathrm{W}]. \tag{33}$$

Tu je Φ_{ppk} izmjenična komponenta magnetskog toka jezgre pomoćnog pola k-tog harmonika, a Z_{pok} i ψ_{k} su modul i argument magnetskog otpora podloge pod jednim pomoćnim polom prema relaciji (17).

11.6.4. Korisni moment motora

U odjeljku 11.2. protumačen je opći izraz razvijenog momenta valovito napajanih istosmjernih motora, iz kojega se vidi da valovito napajani motori ostvaruju neznatno veću srednju vrijednost razvijenog momenta u usporedbi s istosmjernim napajanjem. No valovito napajani motori imaju veće gubitke, pa im je korisni moment na osnovi nešto manji nego pri istosmjernom napajanju.

Na slici 19. uspoređeni su korisni momenti nezavisno uzbuđenog motora s vlastitom ventilacijom (ventilator na osovini motora) kad mu se brzina vrtnje podešava naponom iz različitih izvora napajanja. Smanji li se napon, bez obzira na vrstu napajanja, dopušteni će



Sl. 19. Usporedba momenata istosmjernih motora pri podešavanju brzine vrtnje promjenom napona za istosmjerno i valovito napajanje

termički moment blago padati zbog pogoršanih uvjeta hlađenja. Na slici su približno prikazani ostvarljivi momenti za istosmjerno napajanje, te za napajanje iz punoupravljivog i poluupravljivog trofaznog mosta, a za istosmjerne motore srednjih snaga. Vidi se da je smanjenje korisnog momenta pri istoj brzini vrtnje uz napajanje punoupravljivim mostom malo u usporedbi s istosmjernim napajanjem. Međutim, to je smanjenje momenta već veće uz napajanje iz poluupravljivog mosta. Može se zaključiti da će korisni moment (i snaga) valovito napajanog motora biti to bliži korisnome momentu u istosmjernom napajanju što je manja valovitost parametara izmjenične komponente, tj. što je upotrijebljen pretvarački spoj koji izaziva manju valovitost napona.

11.7. Zadaci i problemi

11.7.1. Zadaci

1. Uzbuda osmeropolnoga nezavisnog istosmjernog motora napaja se iz dvofaznoga punoupravljivog mosta s jednofazne izmjenične mreže frekvencije od 50 Hz. Protjecanje istosmjerne komponente uzbude po polu je 6557 A, a namot nezavisne uzbude ima 30 zavoja po polu i radni otpor od 0,183 Ω. Zbog potrebe regulacije strujom uzbude mora srednja vrijednost ispravljenog napona uzbude biti 50% veća od pada napona na uzbudnom namotu. Nazivna brzina vrtnje motora je 1061 min^{-1}, kolektor ima 420 lamela, a armaturni je namot petljasti jednovojni s jednim zavojem po kolektorskoj lameli.

Magnetski krug glavnih polova je lameliran, a koeficijent povećanja magnetskog otpora za feromagnetske dijelove kruga iznosi $\bar{K} = 1{,}3\ \text{e}^{\text{j}20^\circ}$ i za zračni raspor $K_\text{g} = 1{,}1$. Utjecaj rasipnoga magnetskog toka glavnih polova valja uzeti u obzir koeficijentom $\bar{\sigma}_\text{s} = 1{,}2\ \text{e}^{\text{j}5^\circ}$. Podaci presjeka, dužine magnetskih silnica i vrijednosti magnetske indukcije istosmjerne komponente feromagnetskih dijelova magnetskog kruga su: 0,02531 m^2, 0,133 m i 1,44 T za jaram statora, 0,040375 m^2, 0,0472 m i 1,75 T za jezgru glavnog pola, 0,03807 m^2, 0,0328 m i 1,685 T za zube kompenzacijskog namota, 0,0271 m^2, 0,038 m i 2,13 T za zube armature, te 0,026772 m^2, 0,126 m i 1,141 T za jaram armature. Zračnom rasporu glavnog pola presjek je 0,06798 m^2, a dužina je magnetskih silnica 0,00448 m.

Za uzbudni krug valja odrediti:

a) napon sekundara transformatora;
b) kut kašnjenja paljenja ispravljačkog ventila pri nazivnom naponu uzbude;
c) napon harmonika;
d) kompleksni magnetski otpor kruga glavnih polova;
e) kompleksni električni otpor uzbudnoga strujnog kruga;
f) izmjeničnu komponentu struje uzbude i glavnoga magnetskog toka;
g) izmjeničnu komponentu napona transformacije svitka u komutaciji i napona rotacije u armaturnom namotu;
h) valovitost struje uzbude.

2. Istosmjernome motoru s podacima prema 1. zadatku izvedimo masivan jaram statora umjesto lameliranoga. Dimenzije jezgre glavnog pola kod jarma statora su 0,125 × 0,34 m, dužina je magnetskih silnica u jarmu statora 0,133 m, a istosmjerna komponenta magnetske indukcije 1,2 T.

   Za uzbudni krug treba odrediti:

   a) kompleksni magnetski otpor kruga glavnih polova i kompleksni električni otpor cijeloga uzbudnog kruga;
   b) izmjeničnu komponentu napona rotacije armaturnog namota i napona transformacije svitka u komutaciji.

3. Može li se nezavisno uzbuđenome motoru, uz nepromijenjeno protjecanje i gustoću struje istosmjerne komponente namota uzbude, smanjiti vrijednost napona transformacije svitka u komutaciji primjenom višeg napona uzbude ili je za to potreban kvalitetniji spoj ispravljača (više faza i veći broj anoda)?

4. Istosmjerni nezavisno uzbuđen motor s podacima kao u 1. zadatku ima nazivni napon od 945 V, a armaturni mu se krug napaja iz jednofazne izmjenične mreže od 50 Hz, i to dvofaznim punoupravljivim mostom. Zbog regulacije napona armature mora srednja vrijednost ispravljenog napona biti 20 % veća od nazivnoga. Namotu armature su radni i induktivni otpor 0,0114 Ω i 0,086 Ω, a namotu kompenzacije 0,011 Ω i 0,052 Ω. Radni otpor namota pomoćnih polova je 0,00315 Ω, a izmjenična komponenta induciranog napona $\overline{E}_{ppk} = 615{,}4 \cdot 10^{-4}\ \bar{I}_{ak} e^{j84{,}44°}$ V. Dopuštena izmjenična komponenta struje armature je 335 A.

   Potrebno je odrediti:

   a) napon harmonika armaturnoga strujnog kruga;
   b) izmjeničnu komponentu pada napona na pojedinim namotima armaturnog kruga motora i ukupni pad napona na motoru;
   c) vektorski položaj naponâ i strujâ izmjenične komponente uzbudnog i armaturnog strujnog kruga;
   d) približnu vrijednost induktiviteta prigušnice armaturnoga strujnog kruga.

5. Osmeropolnome istosmjernom nezavisno uzbuđenome motoru napaja se armatura iz jednofazne mreže od 50 Hz dvofaznim punoupravljivim mostom. Nazivna brzina vrtnje je 1 061 min^{-1}, kolektor ima 420 lamela, a armaturni je namot petljast jednovojan s jednim zavojem po kolektorskoj lameli. Promjer armature je 720 mm, a napon samoindukcije svitka u komutaciji iznosi 1,48 V pri dopuštenoj izmjeničnoj komponenti struje armature od 335 A.

   Namot pomoćnih polova ima tri zavoja po polu, širina je zone komutacije 54,24 mm, zračni je raspor pomoćnog pola (kod armature) 9 mm, a širina papuče pomoćnog pola 25 mm. Kompenzacijski namot ima pet zavoja po polu. Napon transformacije svitka u komutaciji iznosi $\bar{e}_{tk} = 0{,}2695\ e^{-j89{,}52°}$ V, gdje je kut faznog pomaka prema struji armature I_{ak}.

   Magnetski krug pòmoćnih polova je lameliran, a koeficijent povećanja magnetskog otpora za feromagnetske dijelove kruga iznosi $\overline{K} = 1{,}3\ e^{j20°}$. Magnetski otpor rasipanja između jezgre pomoćnog pola i polne papuče glavnog pola je $R_{spk} = 81 \cdot 10^4\ AV^{-1}s^{-1}$, a rasipni magnetski tok od jezgre pomoćnog

pola na jaram statora može se zanemariti. Drugi zračni raspor pomoćnog pola ostvaren je podlogom od izolacijskog materijala. Podaci o presjeku, dužini magnetskih silnica i vrijednosti magnetske indukcije istosmjerne komponente feromagnetskih dijelova magnetskog kruga su: 0,02531 m^2, 0,203 m i 1,44 T za jaram statora, 0,005491, 0,094 m i 0,34 T za jezgru pomoćnog pola, te 0,00646 m^2, 0,113 m i 0,964 T za papuču glavnog pola. Prvome zračnom rasporu pomoćnog pola presjek je 0,01615 m^2 i dužina magnetskih silnica 0,0098 m, a drugome zračnom rasporu 0,01997 m^2 i 0,0055 m.

Potrebno je odrediti:

a) magnetske otpore kruga pomoćnih polova;
b) magnetski tok u prvome zračnom rasporu pomoćnog pola i napon rotacije svitka u komutaciji;
c) magnetski tok u jezgri pomoćnog pola i inducirani napon u namotu pomoćnih polova;
d) nekompenzirani napon svitka u komutaciji.

6. Istosmjernome motoru s podacima prema 5. zadatku izveden je masivan jaram statora umjesto lameliranoga i drugi zračni raspor pomoćnog pola s podlogom od mjedi umjesto izolacijskog materijala. U jarmu statora istosmjerna je komponenta magnetske indukcije 1,2 T i dužina magnetskih silnica 203 mm, a dimenzije jezgre pomoćnog pola kod jarma statora su 45 × 340 mm. Mjedena podloga ima dimenzije jezgre pomoćnog pola i debljinu od 5,5 mm, a specifična električna vodljivost joj je $15{,}4 \cdot 10^6$ $\Omega^{-1}m^{-1}$. Napon transformacije svitka u komutaciji je $\bar{e}_{tk} = 0{,}265\ e^{-j88{,}5^\circ}$ V, gdje je kut označen prema struji armature I_{ak}.

Valja naći:

a) magnetske otpore kruga pomoćnih polova;
b) magnetski tok u prvome zračnom rasporu pomoćnog pola i napon rotacije svitka u komutaciji;
c) nekompenzirani napon svitka u komutaciji.

7. Osmeropolni serijski istosmjerni motor vrti se brzinom od 1061 min^{-1}, ima petljasti jednovojni armaturni namot s ukupno 840 vodiča i jednim zavojem po kolektorskoj lameli, a napaja se iz dvofaznoga punoupravljivog mosta u jednofaznoj izmjeničnoj mreži od 50 Hz. Amplitudna vrijednost izmjenične komponente napona je 1045,5 V.

Magnetski krug glavnih polova je lameliran (kao u 1. zadatku), a kompleksni magnetski otpor kruga glavnih polova je $\bar{Z}_{umk} = 65{,}68 \cdot 10^4\ e^{j21{,}15^\circ}$ $AV^{-1}s^{-1}$.

Namot serijske uzbude ima pet zavoja po polu i šantiran je radnim otporom, a koeficijent je šantiranja (istosmjerna komponenta struje) $\beta_i = 0{,}94$. Radni i induktivni otpor armaturnom su namotu 0,0114 Ω i 0,086 Ω, a namotu kompenzacije 0,011 Ω i 0,052 Ω. Namot uzbude ima radni otpor od 0,00525 Ω i rasipni induktivni otpor 0,039 Ω, a namotu je pomoćnih polova radni otpor 0,00315 Ω.

Magnetski krug pomoćnih polova je lameliran (kao u 5. zadatku), a izmjenična komponenta induciranog napona u namotu pomoćnih polova je $\bar{E}_{ppk} = 20{,}615\ e^{j84{,}44^\circ}$ V. Napon je rotacije svitka u komutaciji $\bar{e}_{ppk} = 1{,}182\ e^{j173{,}8^\circ}$ V. Dopuštena je izmjenična komponenta struje armature $I_{ak} = 335$ A, a napon samoindukcije svitka u komutaciji pri toj struji $e_{sk} = 1{,}48$ V.

Potrebno je odrediti:

a) izmjenične komponente struje uzbudnog namota, glavnoga magnetskog toka, napona rotacije (u armaturnom namotu) i napona transformacije u svitku koji komutira;
b) izmjeničnu komponentu pada napona na pojedinim namotima i ukupni pad napona na motoru;
c) vektorski dijagram izmjenične komponente napona i struja serijskog motora;
d) približnu vrijednost induktiviteta prigušnice;
e) nekompenzirani napon svitka u komutaciji.

8. Istosmjernom serijskome motoru s podacima iz 7. zadatka izvedimo masivan jaram statora i drugi zračni raspor pomoćnog pola s podlogom od mjedi. U tom primjeru kompleksni je magnetski otpor kruga glavnih polova $\overline{Z}_{umk} = 112{,}7 \cdot 10^4\ e^{j34{,}25^\circ}$ $AV^{-1}s^{-1}$, a napon rotacije svitka u komutaciji $\overline{e}_{ppk} = 0{,}408\ e^{j124{,}33^\circ}$ V.

Valja ustanoviti:

a) izmjeničnu komponentu glavnoga magnetskog toka i napona transformacije svitka u komutaciji;
b) nekompenzirani napon svitka u komutaciji.

9. Istosmjernom serijskome motoru s podacima prema 7. zadatku smanjimo koeficijent šantiranja istosmjerne komponente struje namota uzbude s 0,94 na 0,89, uz nepromijenjenu dopuštenu izmjeničnu komponentu struje armature od $I_{ak} = 335$ A.

Zbog neznatnog smanjenja istosmjerne komponente magnetske indukcije kruga glavnih polova (zasićenje!) smanjit će se kompleksni magnetski otpor kruga glavnih polova na $\overline{Z}_{umk} = 65{,}1 \cdot 10^4\ e^{j21{,}2^\circ}$ $AV^{-1}s^{-1}$, a porast će brzina vrtnje motora na 1 070 min^{-1}. Svitku u komutaciji napon samoindukcije raste na $e_{sk} = 1{,}492$ V, a napon rotacije na $\overline{e}_{ppk} = 1{,}19\ e^{j173{,}7^\circ}$ V.

Potrebno je:

a) odrediti napon transformacije i nekompenzirani napon svitka u komutaciji;
b) usporediti dobivene rezultate s rezultatima iz 7. zadatka.

10. Osmeropolni istosmjerni nezavisno uzbuđeni motor s podacima prema 4. zadatku ima na kolektoru 420 lamela. Valja izračunati srednju vrijednost napona između kolektorskih lamela u primjeru:

a) praznog hoda;
b) nazivnog opterećenja.

11.7.2. Rješenja

1. Uvodno određujemo broj vodiča armaturnog namota z, broj pari paralelnih grana namota armature a, istosmjernu komponentu struje uzbude i_u i pad napona na namotu uzbude U_u pri nazivnom opterećenju, zatim srednju vrijednost ispravljenog napona U_i pri otvorenom zasunu i kružnu frekvenciju prvog harmonika ω_k: $z = 840$, $a = p = 4$, $i_u = 218{,}6$ A, $U_u = 40$ V, $U_i = 60$ V i $\omega_k = 628$ rad s^{-1}.

a) Efektivna vrijednost napona sekundara transformatora uz kut paljenja $\alpha = 0$ računa se prema relaciji (11.1–2).

$$[U_2 = 66{,}64 \text{ V}]$$

b) Kut kašnjenja paljenja ispravljačkog ventila, za napon uzbude od 40 V uz napon sekundara transformatora od 66,64 V, bit će:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{U_u \pi}{m\sqrt{2}\, U_2 \sin\frac{\pi}{m}}\right) = 48{,}19°.$$

$$[\alpha = 48{,}19°]$$

c) [Prema jednadžbi (11.1-1) je $A_\nu = 33{,}125$ V i $B_\nu = -56{,}293$ V, a amplitudna vrijednost napona harmonika $U_{uk} = 65{,}32$ V.]

d) Kompleksni magnetski otpor feromagnetskih dijelova kruga određujemo izrazom (11.3-20) uz modul i argument pulsacijskog permeabiliteta prema slici 11.3-8, krivulja 1, 4 i 5. Vrijednosti pojedinih kompleksnih magnetskih otpora, uz oznake prema nadomjesnoj shemi na slici 11.4-1, jesu:

$\overline{Z}_{jsk} = 5{,}098 \cdot 10^4\ e^{j26°}$, $\overline{Z}_{gk} = 12{,}67 \cdot 10^4\ e^{j22°}$

$\overline{Z}_{zak} = 38{,}78 \cdot 10^4\ e^{j21°}$ i $\overline{Z}_{jak} = 1{,}33 \cdot 10^4\ e^{j30°}$ AV^{-1} s^{-1}.

Pri ustanovljivanju magnetskog otpora jarma statora i armature valja računati s dvostrukim presjekom jer se magnetski tok pola grana na dva dijela.

Magnetski otpor zračnog raspora glavnog pola određen izrazom (11.3-22) iznosi $R_\delta = 5{,}769 \cdot 10^4$ AV^{-1}s^{-1}. Kompleksni magnetski otpor kruga glavnih polova prema izrazu (11.4-2) je:

$$\overline{Z}_{umk} = \overline{Z}_{jsk} + \overline{\sigma}_s \overline{Z}_{gk} + R_\delta + \overline{Z}_{zak} + \overline{Z}_{jak} = 65{,}68 \cdot 10^4 e^{j21{,}15°} \frac{A}{Vs}.$$

$$[\overline{Z}_{umk} = 65{,}68 \cdot 10^4 e^{j21{,}15°}\ AV^{-1}s^{-1} \text{ po polu}]$$

e) Kompleksni električni otpor uzbudnog kruga bit će prema izrazu (11.4-2):

$$\overline{Z}_{uek} = j\,\frac{2p\omega_k w_u^2}{\overline{Z}_{umk}} + R_u = j\,\frac{8 \cdot 628 \cdot 30^2}{65{,}68 \cdot 10^4 e^{j21{,}15°}} = 6{,}956\ e^{j67{,}44°}\ \frac{V}{A}.$$

$$\left[\overline{Z}_{uek} = 6{,}956\ e^{j67{,}44°}\ \frac{V}{A}\right]$$

f) Amplitudna vrijednost izmjenične komponente struje uzbude iznosi prema relaciji (11.4-3):

$$\overline{i}_{uk} = \frac{\overline{U}_{uk}}{\overline{Z}_{uek}} = 9{,}39\ e^{-j67{,}44°}\ A,$$

a njezino protjecanje po polu prema relaciji (11.4-4):

$$\overline{\Theta}_{uk} = \overline{i}_{uk} w_u = 281{,}7\ e^{-j67{,}44°}\ A.$$

Izmjenična komponenta glavnoga magnetskog toka, prema izrazu (11.4-5), bit će:

$$\bar{\Phi}_{glk} = \frac{\bar{\Theta}_{uk}}{\bar{Z}_{umk}} = 4{,}289 \cdot 10^{-4}\ e^{-j88{,}59^\circ}\ Vs.$$

$$[\bar{i}_{uk} = 9{,}39\ e^{-j67{,}44^\circ}\ A \text{ i } \bar{\Phi}_{glk} = 4{,}289 \cdot 10^{-4}\ e^{-j88{,}59^\circ}\ Vs]$$

g) Amplitudna vrijednost izmjenične komponente napona transformacije svitka u komutaciji, prema izrazu (11.4-7), iznosi:

$$\bar{e}_{tk} = -j\omega_k w_s \bar{\Phi}_{glk} = 0{,}2695\ e^{-j178{,}59^\circ}\ V,$$

a napona rotacije, prema relaciji (11.4-6), je:

$$\bar{E}_{ak} = \frac{p}{a}\frac{\bar{\Phi}_{glk} nz}{60} = 6{,}37\ e^{-j88{,}59^\circ}\ V.$$

$$[\bar{e}_{tk} = 0{,}2695\ e^{-j178{,}59^\circ}\ V \text{ i } \bar{E}_{ak} = 6{,}37\ e^{-j88{,}59^\circ}\ V]$$

h) [Valovitost je struje uzbude $v_{iuk} = \frac{i_{uk}}{i_u} = 0{,}0429.$]

2. Kompleksni magnetski otpor jarma statora u masivnoj izvedbi prema izrazu (11.3-19) bit će:

$$\bar{Z}_{jsk} = \frac{C}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi l_s}{b_{gp} + l_{gp}}\right) e^{j\psi} = 55{,}61 \cdot 10^4\ e^{j49^\circ}\ \frac{A}{Vs},$$

pri čemu su vrijednosti C i ψ otčitane sa slike 11.3-5.

a) $[\bar{Z}_{umk} = 112{,}7 \cdot 10^4\ e^{j34{,}25^\circ}\ \frac{A}{Vs}$ i, $\bar{Z}_{uek} = 4{,}12\ e^{j53{,}65^\circ}\ \frac{V}{A}]$

b) $[\bar{e}_{tk} = 0{,}265\ e^{-j177{,}9^\circ}\ V$ i $\bar{E}_{ak} = 6{,}27\ e^{-j87{,}9^\circ}\ V]$

3. Pri promjeni istosmjerne komponente napona nezavisne uzbude, uz nepromijenjenu istosmjernu komponentu protjecanja uzbude, mijenja se broj zavoja namota uzbude i izmjenična komponenta napona linearno s istosmjernom komponentom napona, a s drugom potencijom istosmjerne komponente napona mijenja se otpor namota uzbude istosmjernoj struji i kompleksni električni otpor uzbudnog kruga. Pri tome kompleksni magnetski otpor kruga glavnih polova ostaje nepromijenjen. Budući da se izmjenična komponenta uzbudne struje mijenja obrnuto proporcionalno izmjeničnoj komponenti napona, to izmjenična komponenta protjecanja uzbude ostaje nepromijenjena, pa se ne mijenja izmjenična komponenta glavnoga magnetskog toka ni napon transformacije svitka u komutaciji.
[Neophodan je kvalitetniji spoj ispravljača].

4. a) [Amplitudna je vrijednost napona harmonika $U_k = 1046{,}5$ V.]

b) Izmjeničnu komponentu pada napona računamo uz realnu os u smjeru struje armature I_{ak}. Pad napona na namotu pomoćnih polova iznosi:

$$\bar{U}_{ppk} = \bar{E}_{ppk} + I_{ak} R_{pp} = 20{,}744\ e^{j81{,}54^\circ}\ V,$$

a na namotu kompenzacije:

$$\overline{U}_{kk} = (R_k + jX_{kk})I_{ak} = 17{,}805\ e^{j78{,}05^\circ}\ V.$$

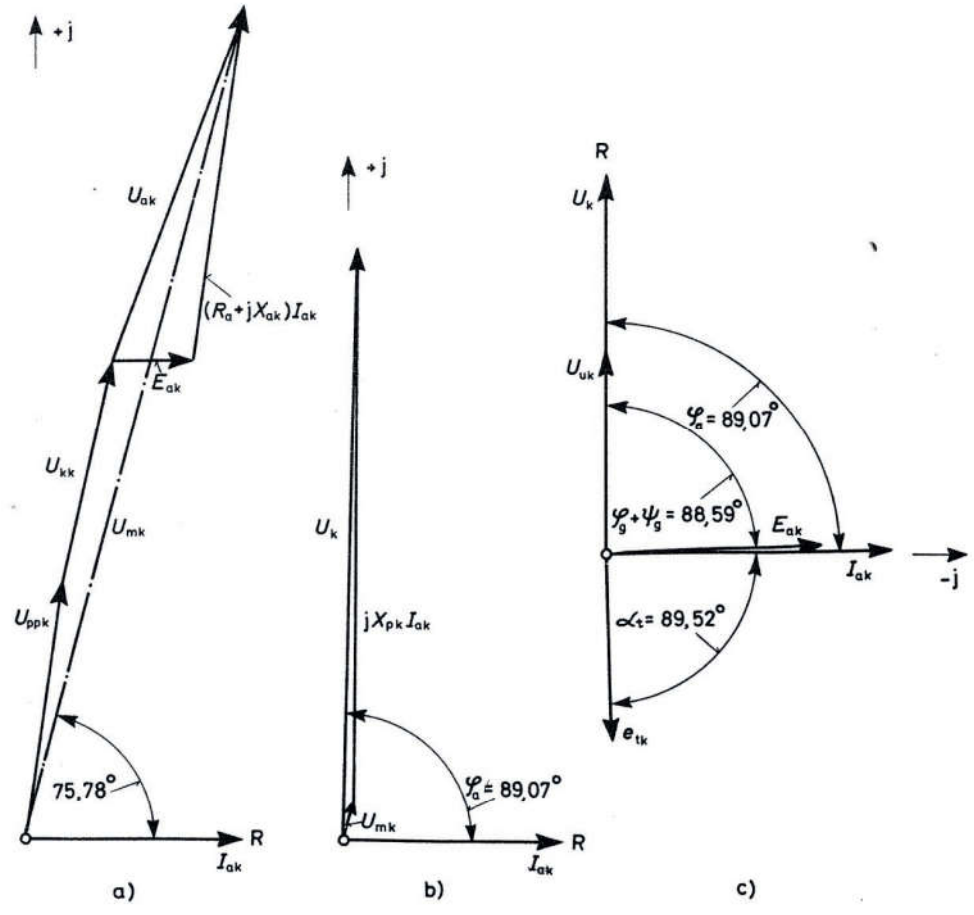
Napon rotacije u armaturnom namotu E_{ak} određen je u rješenju 1. zadatka pod g) i iznosi $\overline{E}_{ak} = 6{,}37\ e^{-j88{,}59^\circ}$ V, pri čemu je fazni pomak prema naponu uzbude U_{uk}. Prenosom napona rotacije E_{ak} u vektorski dijagram napona armaturnog kruga valja, uz nepromijenjeni modul, pretpostaviti kut faznog pomaka prema struji armature I_{ak}. U našem primjeru pretpostavljamo da je kut faznog pomaka od 0,5°, pa će vektor napona rotacije biti $\overline{E}_{ak} = 6{,}37\ e^{j0{,}5^\circ}$. Izmjenična komponenta napona na namotu armature je:

$$\overline{U}_{ak} = \overline{E}_{ak} + (R_a + jX_{ak})I_{ak} = 30{,}611\ e^{j70{,}56^\circ}\ V.$$

Izmjenična komponenta pada napona na motoru iznosi:

$$\overline{U}_{mk} = \overline{U}_{ppk} + \overline{U}_{kk} + \overline{U}_{ak} = 68{,}91\ e^{j75{,}78^\circ}\ V.$$

Vektorski dijagram pada napona na motoru prikazuje slika 1.a.



Sl. 1.

$$[\overline{U}_{ppk} = 20{,}744\ e^{j81{,}54^\circ}\ V,\quad \overline{U}_{kk} = 17{,}805\ e^{j78{,}05^\circ}\ V,$$

$$\overline{U}_{ak} = 30{,}611\ e^{j70{,}56^\circ}\ V \text{ i } \overline{U}_{mk} = 68{,}91\ e^{j75{,}78^\circ}\ V;\ \text{vidi sliku 1.a}]$$

c) Pretpostavljamo izmjeničnu komponentu pada napona na prigušnici $\overline{U}_{pk} = j979{,}6$ V i određujemo ukupni pad napona u armaturnome strujnom krugu:

$$\Delta\overline{U}_k = \overline{U}_{mk} + \overline{U}_{pk} = 1046{,}54\ e^{j89{,}07^\circ}\ V.$$

Kad je modul pada napona armaturnog kruga $\Delta\overline{U}_k$ jednak naponu harmonika U_k, dobivamo kut faznog pomaka φ_a napona $\overline{U}_k$ (vidi sl. 11.4–4) i struje armature $\overline{I}_{ak}$. Postavljanjem napona uzbude U_{uk} i napona $\overline{U}_k$ u isti fazni položaj i realnu os dobivamo da struja armature I_{ak} fazno zaostaje iza priključnog napona U_k za kut $\varphi_a = 89{,}07°$, a napon rotacije E_{ak} za kut $\varphi_g + \psi_g = 88{,}59°$. Iz toga izlazi da napon rotacije E_{ak} fazno prethodi struji I_{ak} za kut $\varphi_a - \varphi_g - \psi_g = 89{,}07° - 88{,}59° = 0{,}48°$.

Budući da je izračunata vrijednost kuta faznog pomaka E_{ak} i I_{ak} od 0,48° praktički jednaka pretpostavljenoj vrijednosti 0,5° i da je modul pada napona $\Delta\overline{U}_k$ jednak naponu U_k, mogu se pretpostavljene vrijednosti pada napona na prigušnici U_{pk} i fazni položaj napona E_{ak} (u vektorskom dijagramu armaturnog kruga) smatrati konačnim vrijednostima. Vektorski dijagram pada napona armaturnoga strujnog kruga, uz realnu os u smjeru struje I_{ak}, vidi se na slici 1.b.

Budući da napon transformacije e_{tk} fazno zaostaje za naponom U_{uk}, kut $\varphi_g + \psi_g + \frac{\pi}{2}$ (vidi sl. 11.4–2), a struja armature I_{ak} za naponom U_k, kut φ_a, to napon transformacije e_{tk} fazno zaostaje iza struje armature I_{ak} za kut $\alpha_t = \varphi_g + \psi_g + \frac{\pi}{2} - \varphi_a$. U razmatranom je primjeru $\alpha_t = 89{,}52°$, pa vektor napona transformacije (uz realnu os u smjeru struje armature I_{ak}) ima vrijednost:

$$\overline{e}_{tk} = 0{,}2695\ e^{-j89{,}52^\circ}\ V.$$

[Vektorski položaj napona i struja izmjenične komponente uzbudnog i armaturnog strujnog kruga prikazuje slika 1.c.]

d) Približna vrijednost (zbog zanemarenja pada napona na radnom otporu prigušnice) induktiviteta prigušnice iznosi:

$$L_p = \frac{U_{pk}}{\omega_k I_{ak}}.$$

$$[L_p = 4{,}656 \cdot 10^{-3}\ H]$$

5. Uvodno određujemo broj zavoja armaturnog namota w_a, broj pari njegovih paralelnih grana a, polni korak τ_p, obodnu brzinu armature v_a, kružnu

frekvenciju prvog harmonika ω_k i magnetski otpor rasipanja jezgre pomoćnog pola na jaram statora R_{pjk}: $w_a = 420$, $a = p = 4$, $\tau_p = 0{,}2827$ m, $v_a = 40$ ms^{-1}, $\omega_k = 628$ rad s^{-1} i $R_{pjk} = \infty$ AV^{-1} s^{-1}.

a) Pri izračunavanju magnetskog otpora jarma statora i polne papuče glavnog pola valja računati s dvostrukim presjekom jer se magnetski tok jezgre pomoćnog pola grana na dva dijela.

Kompleksni magnetski otpor prema relaciji (11.3–20) iznosi za jaram statora $\underline{Z}_{jsk} = 7{,}781 \cdot 10^4\ e^{j26°}$ AV^{-1}s^{-1} i za jezgru pomoćnog pola $\underline{Z}_{jpk} = 4{,}121 \cdot 10^4\ e^{j35°}$ AV^{-1}s^{-1}.

Magnetski otpor drugoga zračnog raspora pomoćnog pola prema izrazu (11.6–16) bit će $R_{\delta pjk} = 21{,}91 \cdot 10^4$ AV^{-1}s^{-1}.

Kompleksni magnetski otpor Z_{1k} prema nadomjesnoj shemi na slici 11.6–7. je:

$$\underline{Z}_{1k} = \underline{Z}_{jpk} + R_{\delta pjk} = 25{,}396 \cdot 10^4\ e^{j5{,}34°}\ \frac{A}{Vs}.$$

Magnetski otpor prvoga zračnog raspora pomoćnog pola prema relaciji (11.6–15) je $R_{\delta ppk} = 47{,}26 \cdot 10^4$ AV^{-1}s^{-1}.

Magnetski otpor polne papuče glavnog pola prema izrazu (11.6–11) iznosi $\underline{Z}_{pk} = 3{,}445 \cdot 10^4\ e^{j31°}$ AV^{-1}s^{-1}, pa je kompleksni magnetski otpor Z_{spk} u nadomjesnoj shemi na slici 11.6–7. kompenziranog motora:

$$\underline{Z}_{spk} = \underline{Z}_{pk} + R_{spk} = 83{,}972 \cdot 10^4\ e^{j1{,}21°}\ \frac{A}{Vs}.$$

[$\underline{Z}_{jsk} = 7{,}781 \cdot 10^4\ e^{j26°}$ AV^{-1}s^{-1}, $\underline{Z}_{1k} = 25{,}396 \cdot 10^4\ e^{j5{,}34°}$ AV^{-1}s^{-1},

$R_{\delta ppk} = 47{,}26 \cdot 10^4$ AV^{-1}s^{-1}, $\underline{Z}_{spk} = 83{,}97 \cdot 10^4\ e^{j1{,}21°}$ i

$R_{pjk} = \infty$ AV^{-1}s^{-1}]

b) Za određivanje magnetskog toka u zračnom rasporu pomoćnog pola treba najprije izračunati vrijednosti $\underline{A}_1$ i $\underline{A}_2$ prema izrazu (11.6–22). Uz $R_{pjk} = \infty$ bit će vrijednost $\underline{A}_2 = 0$. Tad je neodređena vrijednost $R_{pjk}\underline{A}_2$ u izrazu za $\underline{A}_1$, pa je valja odrediti matematičkom transformacijom. Množenjem izraza $\underline{A}_2$ s R_{pjk} dobivamo:

$$R_{pjk}\underline{A}_2 = R_{pjk}\frac{\underline{Z}_{1k}}{\underline{Z}_{1k} + R_{pjk}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{pjk}} + \frac{1}{Z_{1k}}}$$

i kad R_{pjk} teži beskonačnosti, vrijednost je $R_{pjk}\underline{A}_2 = \underline{Z}_{1k}$, pa izraz za $\underline{A}_1$ glasi:

$$\bar{A}_1 = \frac{\bar{Z}_{jsk} + \bar{Z}_{1k}}{\bar{Z}_{spk}}, \text{ iz čega izlazi } \bar{A}_1 = 0{,}3905\ e^{j8{,}93°}.$$

Protjecanja po polu su: namotu pomoćnih polova $\Theta_{ppk} = 3I_{ak}$, kompenzacijskom namotu $\Theta_{kok} = 5I_{ak}$, a armaturnom namotu pod sredinom pomoćnog pola prema izrazu (4.5–33):

$$\Theta_{ak} = \frac{w_a}{4ap}\left(1 - 0{,}7\,\frac{b_{zk}}{\tau_p}\right) I_{ak} = 5{,}681\ I_{ak}.$$

Izmjenična će komponenta magnetskog toka u zračnom rasporu pomoćnog pola prema izrazu (11.6–22) biti:

$$\bar{\Phi}_{\delta ppk} = \frac{(\Theta_{ak} - \Theta_{kok})[1 + (1 - \bar{k}_p)\bar{A}_1] - \Theta_{ppk}(1 - \bar{A}_2)}{\bar{A}_1(\bar{Z}_{spk} + R_{\delta ppk}) + R_{\delta ppk}} =$$

$$= 2{,}0954\ I_{ak} \cdot 10^{-6}\ e^{j173{,}8°} = 7{,}02 \cdot 10^{-4}\ e^{j173{,}8°}\ \text{Vs}.$$

Napon rotacije svitka u komutaciji iznosi prema izrazu (11.6–24):

$$\bar{e}_{ppk} = \frac{2v_a w_s \bar{\Phi}_{\delta ppk}}{b_{\delta pp} + 2{,}5\delta_{pp}} = 1{,}182\ e^{j173{,}8°}\ \text{V}.$$

[Uz struju armature I_{ak} u realnoj osi je $\bar{\Phi}_{\delta ppk} = 7{,}02 \cdot 10^{-4}\ e^{j173{,}8°}$ Vs, a $\bar{e}_{ppk} = 1{,}182\ e^{j173{,}8°}$ V.]

c) Uz $R_{pjk} \doteq \infty$ bit će $\bar{A}_3 = 1$, a za izmjeničnu komponentu magnetskog toka u jezgri pomoćnog pola prema relaciji (11.6–23) dobivamo:

$$\bar{\Phi}_{ppk} = \frac{\Theta_{ak} - \Theta_{kok} - \Theta_{ppk}\bar{A}_3 - \bar{\Phi}_{\delta ppk} R_{\delta ppk}}{\bar{Z}_{jsk} + \bar{A}_3 \bar{Z}_{1k}} =$$

$$= -\,4{,}083\ I_{ak} \cdot 10^{-6} \cdot e^{j5{,}56°} = -13{,}68 \cdot 10^{-4} e^{-j5{,}56}\ \text{Vs}.$$

Inducirani napon u namotu pomoćnih polova prema izrazu (11.4–8) bit će:

$$\bar{E}_{ppk} = j2p\omega_k w_{pp} \bar{\Phi}_{ppk} = 615{,}4\ I_{ak}\ 10^{-4} e^{j84{,}44°} = 20{,}62\ e^{j84{,}44°}\ \text{V}.$$

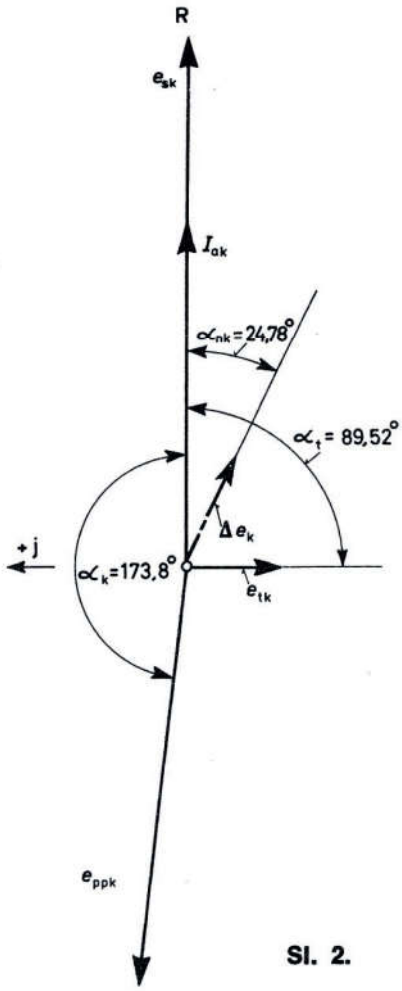
[Uz struju armature I_{ak} u realnoj osi je $\bar{\Phi}_{ppk} = -13{,}68 \cdot 10^4 \cdot e^{-j5{,}56°}$ Vs, a $\bar{E}_{ppk} = 20{,}62\ e^{j84{,}44°}$ V.]

d) Za izmjeničnu komponentu nekompenziranog napona svitka u komutaciji, prema relaciji (11.6–25), izlazi:

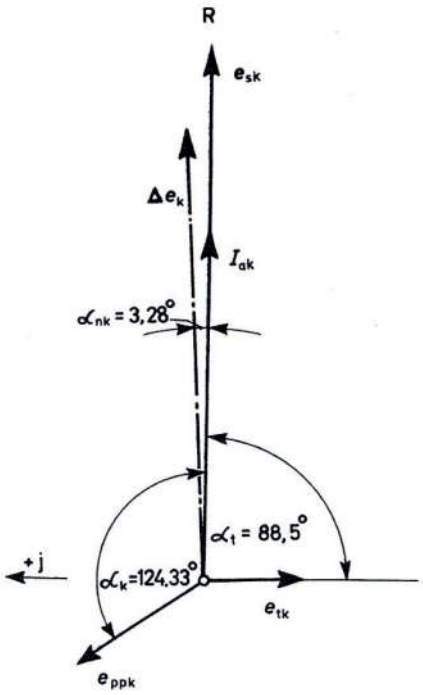
$$\Delta\bar{e}_k = \bar{e}_{sk} + \bar{e}_{ppk} + \bar{e}_{tk} = 0{,}338\ e^{-j24{,}8°}\ \text{V}.$$

Na slici 2. prikazan je vektorski dijagram napona i nekompenziranog napona svitka u komutaciji.

$[\Delta\overline{e}_k = 0{,}338\ e^{-j24{,}8°}\ V]$



Sl. 2.



Sl. 3.

6. a) Kompleksni magnetski otpor jarma statora u masivnoj izvedbi prema izrazu iznosi (11.3–19):

$$\overline{Z}_{jsk} = \frac{C}{2\pi} \ln\left(1 + \frac{\pi l_s}{b_{pp} + l_{pp}}\right) e^{j\psi} = 84{,}74 \cdot 10^4\ e^{j49°}\ \frac{A}{Vs},$$

pri čemu su vrijednosti C i ψ otčitane sa slike 11.3–5.

Za kompleksni magnetski otpor mjedene podloge prema izrazu (11.6–17) dobivamo:

$$\overline{Z}_{pok} = K_k\ e^{j\psi_k} \frac{\delta_j}{\mu_o a_{po} b_{po}} = 65{,}79 \cdot 10^4\ e^{j45°}\ \frac{A}{Vs};$$

vrijednost je koeficijenta $\overline{K}_k \cdot 2{,}3 \cdot e^{j45°}$ otčitana na slici 11.6–11.

Magnetski otpor bočnog rasipanja drugoga zračnog raspora pomoćnog pola prema relaciji (11.6–20) bit će:

$$R_{b\delta} = \frac{28,4}{l_{pp} + b_{pp}} 10^4 = 73,76 \doteq 10^4 \frac{A}{Vs}.$$

Kompleksni magnetski otpor drugoga zračnog raspora pomoćnog pola iznosi prema izrazu (11.6–20):

$$\underline{Z}_{\delta pjk} = \frac{\underline{Z}_{pok} R_{b\delta}}{\underline{Z}_{pok} + R_{b\delta}} = 37,63 \cdot 10^4 \, e^{j23,86°} \frac{A}{Vs}.$$

Budući da se kompleksni magnetski otpor jezgre pomoćnog pola nije mijenjao, vrijednost kompleksnoga magnetskog otpora $\underline{Z}_{1k}$ (vidi sl. 11.6–7) bit će:

$$\underline{Z}_{1k} = \underline{Z}_{jpk} + \underline{Z}_{\delta pjk} = 41,68 \cdot 10^4 \, e^{j24,95°} \frac{A}{Vs}.$$

[$\underline{Z}_{jsk} = 84,74 \cdot 10^4 \, e^{j49°}$ $AV^{-1}s^{-1}$, $\underline{Z}_{1k} = 41,68 \cdot 10^4 \, e^{j24,95°}$ $AV^{-1}s^{-1}$,

$R_{\delta ppk} = 47,26 \cdot 10^4$ $AV^{-1}s^{-1}$, $\underline{Z}_{spk} = 83,97 \cdot 10^4 \, e^{j1,21°}$ $AV^{-1}s^{-1}$

i $R_{pjk} = \infty$ $AV^{-1}s^{-1}$]

b) [Uz struju armature I_{ak} u realnoj osi je $\underline{\Phi}_{\delta ppk} = 2,426 \cdot 10^{-4} \, e^{j124,33°}$ Vs, a $\underline{e}_{ppk} = 0,408 \, e^{j124,33°}$ V.]

c) [$\underline{\Delta e}_k = 1,26 \, e^{j3,28°}$ V; vidi sliku 3.]

7. a) Kompleksni će električki otpor prema relaciji (11.5–1) biti:

$$\underline{Z}_{uek} = j \frac{2p\omega_k w_{ser}^2}{\underline{Z}_{umk}} + R_u = 0,1931 \, e^{j67,39°}.$$

Radni otpor šanta serijskoga uzbudnog namota je:

$$R_š = \frac{\beta_i}{1 - \beta_i} R_u = 82,25 \cdot 10^{-3} \, \Omega,$$

pa je koeficijent šantiranja za izmjeničnu komponentu struje, prema izrazu (11.5–3):

$$\underline{\beta}_k = \frac{R_š}{R_š + \underline{Z}_{uek}} = 0,3467 \, e^{-j48,72°}.$$

Vektorski položaj svih parametara izmjenične komponente određujemo uz položaj struje armature I_{ak} u realnoj osi. Izmjenična će komponenta struje uzbudnog namota prema relaciji (11.5–7) biti:

$$\underline{I}_{uk} = \underline{\beta}_k I_{ak} = 116,14 \, e^{-j48,72°} \text{ A},$$

a za protjecanje, prema izrazu (11.5–8), dobivamo:

$$\underline{\Theta}_{uk} = \underline{I}_{uk} w_{ser} = 580,72 \, e^{-j48,72°} \text{ A}.$$

Amplitudna vrijednost glavnoga magnetskog toka prema izrazu (11.5–9) bit će:

$$\bar{\Phi}_{glk} = \frac{\bar{\Theta}_{uk}}{\bar{Z}_{umk}} = 8{,}842 \cdot 10^{-4}\, e^{-j69{,}87^\circ}\ \text{Vs},$$

pa napon rotacije u armaturnom namotu iznosi $\bar{E}_{ak} = 13{,}13\ e^{-j69{,}87^\circ}$ V, a napon transformacije svitka u komutaciji $\bar{e}_{tk} = 0{,}555\ e^{-j159{,}87^\circ}$ V.

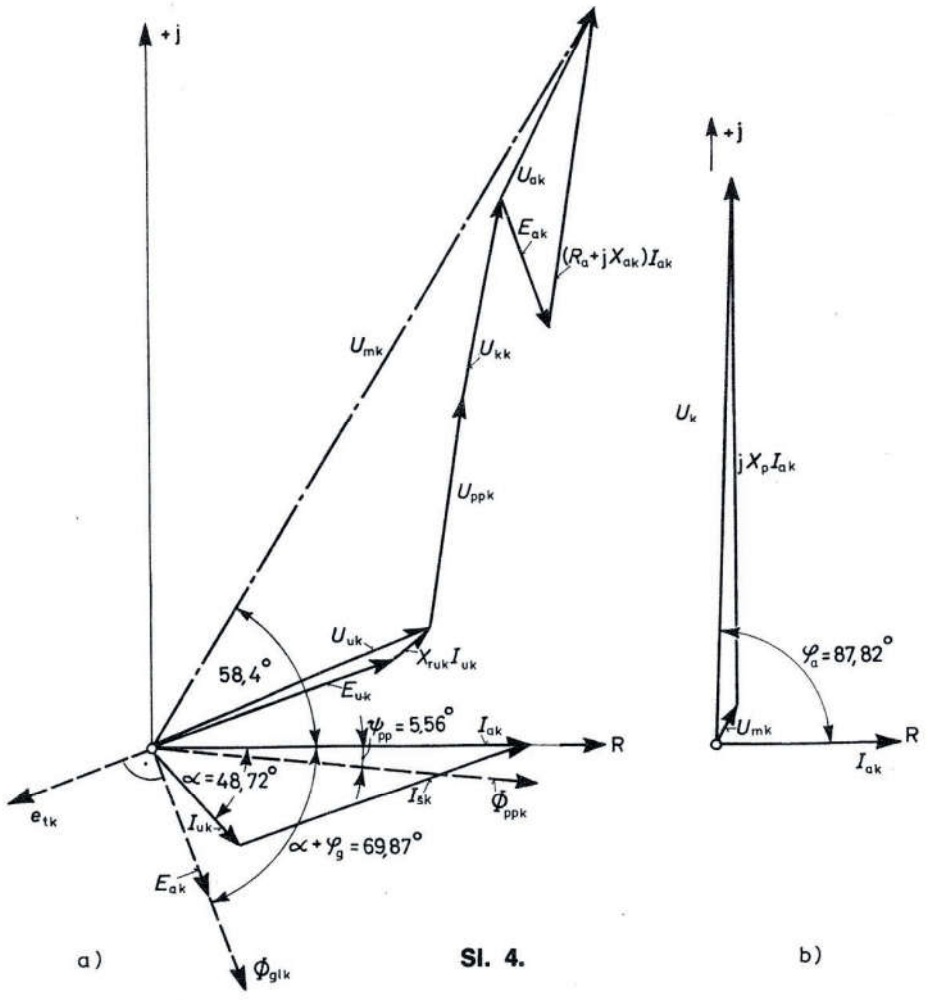
[$\bar{I}_{uk} = 116{,}14\ e^{-j48{,}72^\circ}$ A, $\bar{\Phi}_{glk} = 8{,}842 \cdot 10^{-4}\ e^{-j69{,}87^\circ}$ Vs, $\bar{E}_{ak} = 13{,}13\ e^{-j69{,}87^\circ}$ V i $\bar{e}_{tk} = 0{,}555\ e^{-j159{,}87^\circ}$ V]

b) [$\bar{U}_{ppk} = 20{,}74\ e^{j81{,}54^\circ}$ V, $\bar{U}_{kk} = 17{,}805\ e^{j78{,}05^\circ}$ V, $\bar{U}_{ak} = 18{,}47\ e^{j63{,}16^\circ}$ V, $\bar{U}_{uk} = 26{,}675\ e^{j22{,}42^\circ}$ V i $\bar{U}_{mk} = 75{,}84\ e^{j58{,}4^\circ}$ V]

c) [Vektorski dijagram izmjenične komponente napona i struja motora prikazuje slika 4 a, a armaturnoga strujnog kruga slika 4b.]

d) [$\bar{U}_{pk} = j980{,}15$ V i $L_p = 4{,}659 \cdot 10^{-3}$ H]

e) [$\Delta\bar{e}_k = 0{,}225\ e^{-j163{,}65^\circ}$ V; vidi sliku 5.]



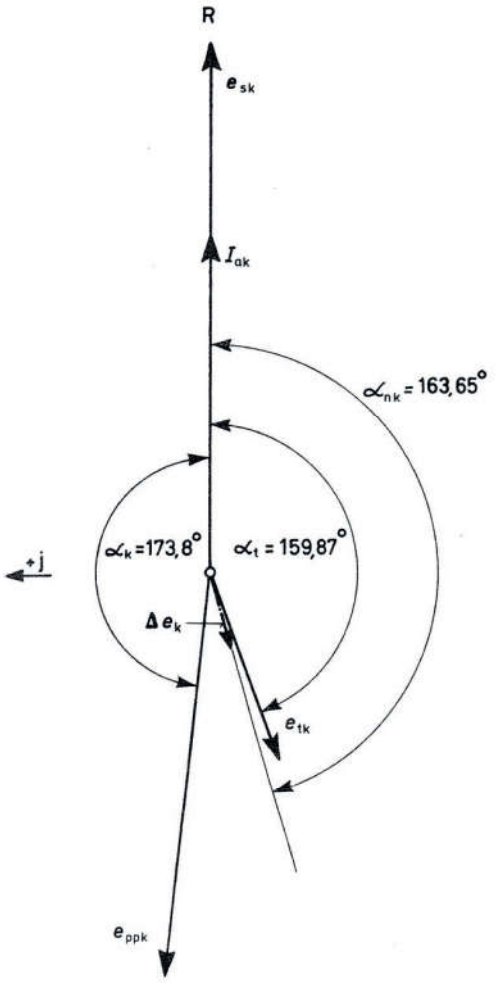
Sl. 4.

8. a) $[\bar{\Phi}_{glk} = 6{,}937 \cdot 10^{-4}\ e^{-j65{,}77^\circ}$ Vs i $\bar{e}_{tk} = 0{,}4356\ e^{-j155{,}77^\circ}$ V]

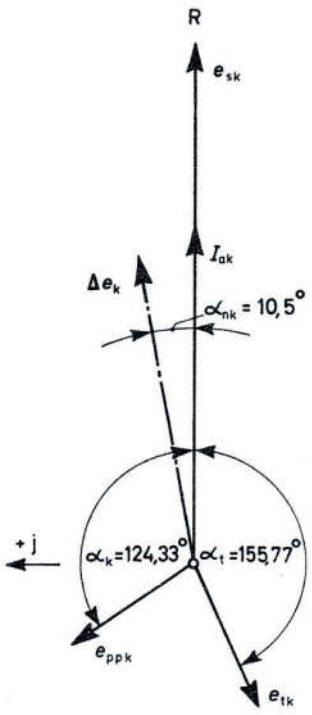
b) $[\Delta\bar{e}_k = 0{,}867\ e^{j10{,}5^\circ}$ V; vidi sliku 6.]

9. a) $[\bar{e}_{tk} = 0{,}3194\ e^{-j168^\circ}$ V i $\Delta\bar{e}_k = 0{,}0645\ e^{j92{,}9^\circ}$ V; vidi sliku 7.]

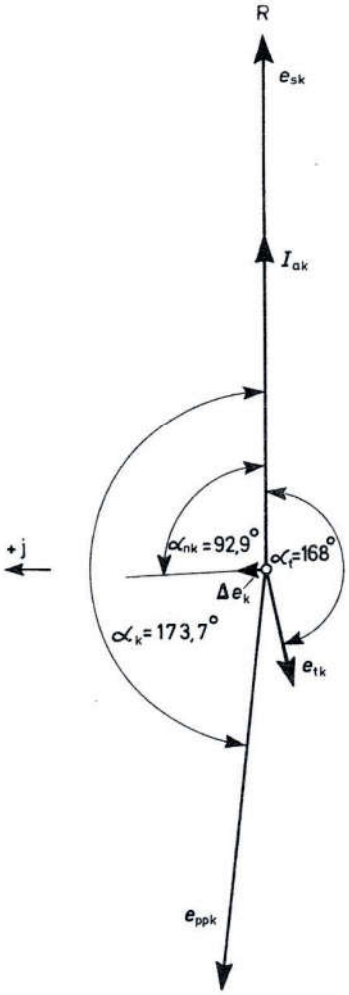
b) [Iz rezultata 7. i 9. zadatka vidi se da nema mogućnosti za potpunu kompenzaciju napona samoindukcije, rotacije i transformacije svitka u komutaciji, te da je za neku stvarnu konstrukcijsko-tehnološku izvedbu magnetskog kruga svojstven jedan koeficijent šantiranja istosmjerne komponente struje namota uzbude kojim se postiže minimalna vrijednost nekompenziranog napona svitka u komutaciji Δe_k, dakako za zadanu radnu točku motora.]



Sl. 5.



Sl. 6.



Sl. 7.

10. a) $[U_{Am} = U_{imax} = 1781{,}2$ V i $e_k = 33{,}93$ V]

b) $[U_{Am} = U_m + U_{ak} = 975{,}6$ V i $e_k = 18{,}58$ V]

POPIS LITERATURE

1. Appleton A. D.: »Motors, Generators and Flux Pumps«, Supplement an Bulletin de l'Institut International du Froid-Extrait-Commission 1, Londrer (R.U.) 1969, Annexe 1969 – 1.
2. Atherton D. L.: »Practical Aspect of Homopolar Superconducting D.C. Generators«, Cryogenic Engineers News, Oct. 1968.
3. Bašta J., Chládek J., Mayer I.: »Teorie elektrických strojů«, SNTL Praha, 1968.
4. Bedjanić V.: »Namoti električnih strojeva i transformatora«, Uprava Elektrotehničkog Vjesnika, Ljubljana, 1952.
5. Bödefeld Th., Sequenz H.: »Elektrische Maschinen«, Wien-Springer Verlag, 1962.
6. Chládek J., Lammeraner J.: »Elektrické stroje na stejnosměrný proud«, SNTL Praha, 1957.
7. Dinić D.: »Kolektorske mašine – I, II, III deo«, Građevinska knjiga Beograd, 1970.
8. Dolenc A., Jurković B.: »Kolektorski strojevi« (skripta), Sveučilište u Zagrebu, 1966.
9. Dreifus L.: »Zusätzliche Kommutierungsverluste bei Gleichstrommaschinen«, E und M, Heft 14, 1914.
10. Dreifus L.: »Die Theorie der zusätzlichen Kommutierungsverluste von Gleichstrommaschinen«, Archiv für Elektrotechnik III Band, 10 und 11 Heft, 1915.
11. Essman U., Traeuble H.: »The Magnetic Structure of Superconductors«, Scientific American, March 1971.
12. Fialkov A.S.: »Ugljegrafitovije matjeriali«, Energija Moskva, 1979.
13. Firth I.M.: »Superconductivity«, Mills and Boon Limited London, 1972.
14. Gurin J.S., Kuročkin M.N.: »Projektirovanije mašin postojanovo toka«, Gosenergoizdat Moskva, 1961.
15. Hindmarsh J.: »Electrical Machines«, Pergamon Press, Oxford-London-Edinburgh-New York-Toronto, Sydney-Paris-Braunschweig, 1968.
16. Joffe A.B.: »Tjagovije eljektričeskije mašini«, Energija Moskva, 1965.
17. Jurković B.: »Specijalna poglavlja iz kolektorskih strojeva« (skripta), ETF Zagreb, Zavod za elektrostrojarstvo, 1973.
18. Kurbasov A.S.: »Osnovi enjergjetičjeskoj tjeoriji komutaciji mašin postojanovo toka«, Eljektričjestvo, No 7, 1962.
19. Kurbasov A.S.: »O rasčjete komutaciji mašin postojanovo toka«, Eljektričjestvo, No 8, 1962.
20. Kurbasov A.S.: »Povišjenije rabotosposobnosti tjagovih eljektrodvigateljej«, Transport Moskva, 1977.
21. List V., Hak J.: »Elektrotechnika II, elektrické stroje, část 1«, SNTL Praha, 1969.
22. Livšic M.: »Električne mašine – knjiga I«, Naučna knjiga, Beograd, 1950.
23. Livšic P.S.: »Skoljzjašćij kontakt eljektričeskih mašin«, Energija Moskva, 1974.
24. Moeller F.: »Elektrotechnik-Gleichstrommaschinen«, Teubner Verlag Leipzig-Berlin, 1943.
25. Morganite: »Carbon Brushes and Electrical Machines«, Morganite Electrical Carbon Limited, 1978.

26. Nahodkin M.D. i autori: »Projektirovanije tjagovih eljektričeskih mašin«, Transport Moskva, 1976.
27. Perko B.: »Neka pitanja iz oblasti graničnih snaga istosmjernih strojeva«, magistarski rad ETF Zagreb, 1981.
28. Perko B.: »Perspektive povećanja granične snage istosmjernog stroja izvedbom armature bez utora«, Elektrotehnika Zagreb, 1983, br. 3.
29. Petrov G.N.: »Koljektornije mašini postojanovog i pjerjemjenovo toka-čast trjetja«, Energija Moskva, 1968.
30. Rabinović I.N., Šubov I.G.: »Projektirovanije mašin postojanova toka«, Energija Lenjingrad, 1967.
31. Reiser J.: »Elektrische Maschinen – III Gleichstrommaschinen«, C. Hanser Verlag München, 1971.
32. Reiser J.: »Elektrische Maschinen – IV Wechselstromkommutatormaschinen, Synchronmaschinen«, C. Hanser Verlag München, 1970.
33. Richter R.: »Elektrische Maschinen – funfter Band«, Berlin Springer Verlag, 1950.
34. Richter R.: »Elektrische Maschinen – erster Band«, Birkhäuser Verlag Basel, 1967.
35. Schyiski W.: »Berechnung elektrischer Maschinen«, Wien-Springer Verlag, 1960.
36. Sečić I.: »Neke specifičnosti istosmjernog stroja s permanentnim magnetima«, magistarski rad ETF Zagreb, 1978.
37. Sečić I.: »Gleichstrom-Rollgangmotoren mit Permanentmagnet-Erregung«, BBC Mitteilungen 55, H.10/11, S.618.
38. Sequenz H.: »Die Wiclungen elektrischer Maschinen – erster Band«, Wien-Springer Verlag, 1950.
39. Sequenz H.: »Die Wicklungen elektrischer Maschinen – zweiter Band«, Wien-Springer Verlag, 1952.
40. Sergjejev P.S., Vinogradov N.V., Gorjainov F.A.: »Projektirovanije eljektričeskih mašin«, Energija Moskva, 1970.
41. Skobjeljev V.E.: »Dvigatjeli puljsirajuščevo toka«, Energija Lenjingrad, 1968.
42. Smolčić Z.: »Specijalna poglavlja iz kolektorskih strojeva« (skripta), ETF Zagreb, Zavod za elektrostrojarstvo, 1971.
43. Smolčić Z., Ban D.: »Asinhroni i kolektorski strojevi – Zbirka zadataka« (skripta), Sveučilište u Zagrebu, 1972.
44. Smolčić Z.: »Suvremeni istosmjerni strojevi velikih snaga«, JAZU Simpozij Nikola Tesla, I knjiga, 1975.
45. Tustin A.: »Direct Current Machines for control Systems«, Spon LTD London, 1952.
46. Voljdek A.I.: »Eljektričeskije mašini«, Energija Lenjingrad, 1978.
47. Volkman W.: »Kohlebürsten«, Schunk und Ebe, Giessen, 1980.
48. Vrana V.E.: »The D.C. Motor and the Thyristor Power Supply«, Westinghouse Engineer, July 1967.
49. Wachob J.C.: »The Modern Permanent-Magnet D.C. Motor«, Westinghouse Engineer, March 1969, Volume 29, Number 2.
50. Wolf R.: »Uvod u teoriju električkih strojeva«, Školska knjiga Zagreb, 1975.
51. Zimin V.I.: »Obmotki eljektričeskih mašin«, Energija Lenjingrad, 1975.
52. Zorn M.: »Gleichstrommaschinen hoher Leistung«, Siemens, 1954.
53. Zoubek Z., Měřička J.: »Elektrické stroje«, ČVUT Praha, 1977.

54. Kuročka A. L., Surovikov A.A., Janov V.P.: »Isledovanije visokovoljtnih mašin postojanovo i puljsirujušćevo toka«, Energija, Moskva, 1975.
55. Lončar J.: »Osnovi elektrotehnike I«, Naklada pisca, Zagreb, 1946.
56. Humburg K.: »Die Wirkung der Ausgleichsverbindungen bei Wellenwicklungen«, E u M, 1940, Heft 19/20.
57. Knapp V.: »Uvod u fiziku materijala«, (III izdanje) Naklada Liber, 1983.
58. Jurković B.: »Elektromotorni pogoni«, Školska knjiga, Zagreb, 1982.
59. Livšic M.: »Električne mašine – knjiga III«, Naučna knjiga, Beograd, 1950.
60. Kindler A.E.: »Der Einfluss von Imprägnierungen auf das Verschleissverhalten von Kohlebürsten«, Ringsdorff Werke, Tehnische Mitteilungen, 1977, Heft 8.
61. Hultman C.: »Eine neue Baureiche läufergespeister Drehstrom-Kommutatormotoren«, ASEA – Zeitschrift 1978, Jahrgang 23, Heft 5.
62. Brüderlink R., Geigenmüller K.: »Uber die physikalischen Vorgänge in Gleichstromschweissgeneratoren«, E und M, 1950, Jahrgang 67, Heft 11.
63. Fujii T.: »Study of universal motors with lag angle brushes«, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol. PAS-101, No 6, June 1982.

INDEKS OZNAKA

A — strujni oblog
- općenito (4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.7, 5.4, 5.6, 6.6, 9.1, 9.2, 9.6, 9.8)

A_2 – rotora serijskog kolektorskog stroja (10.7)

A_{ko} – kompenzacijskog namota (5.4, 5.6)

A_m – fiktivan, jednak djelovanju magnetiziranja (8.1)

A — konstanta integracije (dif. jedn.) (7.4)

A_1, A_2... – u raznim okolnostima (8.5)

A_1, A_2, A_3...– omjeri raznih magnetskih otpora (11.6, 11.7)

A_ν – članovi Fourierovog reda ν-tog harmonika (11.1, 11.7)

A — formalna oznaka
- armature (2.1)
- položaja (3.8, 5.1, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6)
- stezaljki (6.3, 7.6, 11.4)
- četkice (8.5)

A — klasa izolacije

a — broj
- pari paralelnih grana armaturnog namota (3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.6, 3.8, 4.1, 4.2, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 5.4, 5.6, 6.2, 6.5, 6.6, 7.5, 7.6, 8.5, 9.4, 9.8, 10.2, 10.4, 10.8, 10.9, 11.1, 11.4, 11.5, 11.6, 11.7)
- eksponent ovisnosti gubitaka u željezu o frekvenciji (4.3)

a_1, a_2... – pari paralelnih grana armaturnog namota u prvom, drugom ... primjeru (6.6)

a_{min} – pari paralelnih grana armaturnog namota, najmanji (3.1)

a_p – koeficijent za određivanje magnetskog napona papuče glavnog pola (11.6)

a — geometrijska dimenzija
- dužina četkice (5.3)

a_1, a_2 ...a_n – širina silocijevi pri određivanju rasipanja magnetskog toka (11.6)

a_2 – visina otvora utora (4.5, 4.7)

a_{po} – širina podloge pod pomoćnim polom (11.6, 11.7)

a — oznaka četkice amplidina ili metadina (8.3, 8.4, 8.5)

a — oznaka pola tropolnog generatora (8.5)

B — magnetska indukcija
- općenito (2.1, 2.2, 2.3, 3.4, 4.1, 4.2, 4.3, 7.5, 7.6, 8.2, 8.7, 9.7, 10.4, 11.3)
- u (permanentnom) magnetu (8.1)

B_o – u polu (jezgri) u statičkom stanju (7.5)

B_A – donja vrijednost pri pulsirajućem magnetiziranju (11.3)

B_B – gornja vrijednost pri pulsirajućem magnetiziranju (11.3)

B_{Femax} – u željezu, maksimalna vrijednost (4.3)

B_{gp} – u jezgri glavnog pola (7.5)

B_i – srednja vrijednost pri valovitom napajanju (11.4, 11.6)

B_{jr} – u jarmu (rotoru) armature (6.5, 6.6)

B_{js} – u jarmu statora (7.5)

B_{jspp} – u jarmu statora pri statičkom stanju (7.5)

B_m – u permanentnom magnetu (8.1)

B_{mo} – u permanentnom magnetu za nestabilizirani i neopterećeni stroj (8.1)
B_{mop} – u permanentnim magnetima za stabilizirani ali neopterećeni stroj (8.1)
B_{mp} – u permanentnim magnetima za stabiliziran i opterećen stroj (8.1)
B_{pp} – u jezgri pomoćnog pola (4.5, 7.5)
B_r – u točki remanencije (8.1)
B_s – u rasipnom magnetskom polju stroja s permanentnim magnetima (8.1)
B_{sr} – srednja vrijednost (4.1, 4.2)
B_{zo} – u zubima armature u praznom hodu (4.3)
B_{zd} – u korijenu zuba armature (6.5)
B'_{zd} – prividna, u korijenu zuba armature (6.5, 6.6)
B_{zgub} – u zubu armature mjerodavna za proračun gubitaka (6.5, 6.6)
B_{zmax} – u zubu armature, maksimalna vrijednost pod teretom (4.3)
B_{zs} – na sredini zuba armature (6.5)
B_δ – u zračnom rasporu pod glavnim polom (4.1, 4.3, 4.7, 5.6, 6.5, 8.1, 9.1, 9.2, 9.6, 9.8)
$B_{\delta o}$ – u zračnom rasporu pod glavnim polom za stroj u praznom hodu (4.3, 4.7)
$B_{\delta ak}$ – pod glavnim polom, k-ti harmonik uzrokovan protjecanjem armaturnog namora (11.6)
$B_{\delta k}$ – u zračnom rasporu, k-ti harmonik (11.3, 11.6)
$B'_{\delta k}$, $B''_{\delta k}$ – k-ti harmonik pod vršcima polnih papuča u zračnom rasporu (11.6)
$B_{\delta max}$ – u zračnom rasporu pod glavnim polom, maksimalna vrijednost (4.3, 5.4)
$B_{\delta p}$ – u zračnom rasporu glavnog pola pri pokretanju stroja (4.7)
$B_{\delta pp}$ – u zračnom rasporu pod pomoćnim polom (4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 11.6)
$B_{\delta ppk}$ – k-ti harmonik pod pomoćnim polom (11.6)
$B_{\delta ppm}$ – u zračnom rasporu pomoćnog pola i to u osi pola (4.5, 4.7)
$B_{\delta uk}$ – pod glavnim polom, k-ti harmonik uzrokovan protjecanjem uzbudnog namota (11.6)
$B_{\delta x}$ – u zračnom rasporu pod glavnim polom na x-tom mjestu (5.4, 5.6)

B — formalna oznaka
– položaja (3.8, 5.1, 5.3, 5.4, 5.5)
– četkice (8.5)
– stezaljki (6.3, 7.6, 11.5)
B′ – položaja (5.4)
B — klasa izolacije (5.4)
B′ — trajanje komutacije svih svitaka jednog utora (4.5, 4.7)
B_e — induktivna vodljivost električkog kruga (11.3)
B_ν — članovi Fourier-ovog reda ν-tih harmonika (11.1, 11.7)
b — širina
– jezgre magnetskog pola (7.5)
b_{Cu2} – bakra (ukupna) u utoru armature (4.5, 4.7, 6.5, 6.6, 11.6)
b_{Cu2d} – bakra (ukupna) u donjem sloju armature (6.5)
b_{Cu2g} – bakra (ukupna) u gornjem sloju armature (6.5)
$b_č$ – četkice (4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 6.5, 6.6)
$b'_č$ – četkice reducirana na promjer armature (4.4)
$b_{či}$ – četkice idealna (4.4, 4.5, 4.7)
$b'_{či}$ – četkica idealna reducirana na promjer armature (4.5, 4.7)

b_{dr} – držača četkica (5.6)
b_g – papuče glavnog pola u električkom smislu (5.4, 5.6)
b_{gg} – papuče glavnog pola u geometrijskom smislu (5.4, 5.6)
b_{gp} – jezgre glavnog pola (7.5, 11.3, 11.7)
b_{ipp} – (idealna) zračnog raspora pod pomoćnim polom (4.5)
b_l – lamele (4.4)
b_p – papuče glavnog pola (2.2, 4.1, 4.3)
b_p – polne papuče, polovica srednje vrijednosti (11.6)
b_{pp} – pomoćnog pola u zračnom rasporu (4.4)
b_{pp} – jezgre pomoćnog pola (4.5, 4.7, 7.5, 11.3, 11.6, 11.7)
b_{pp} – papuče glavnog pola izrađenog s preklopljivim limovima (9.5)
b_{pps} – jezgre pomoćnog pola, srednja vrijednost (11.6)
b_{u2} – utora armature kod zračnog raspora (4.5, 4.7, 6.5, 6.6, 11.6)
b'_{u2} – dna utora armature (4.5, 4.7, 6.5)
b_{zl} – vrha zuba armature (4.5, 4.7)
b_{zk} – komutacijske zone (4.4, 4.5, 4.7, 6.5, 11.6)
b'_{zk} – komutacijske zone manjkavih namota (4.4)
b_{zkl} – komutacijske zone jednog utora (6.5)
$b_{\delta pp}$ – pomoćnog pola kod zračnog raspora (4.5, 4.7, 11.7)
$b_{\delta pp}$ – papuče pomoćnog pola (7.5, 11.6)

b — dužina
– proširenog dijela zračnog raspora glavnog pola (5.4, 5.6)
b_{po} – podloge pod pomoćnim polom (11.6, 11.7)
$b_{1,2,...n}$ – silocijevi pri određivanju rasipanja magnetskog toka (11.6)

b — razmak
b_a – na kolektoru potreban zbog napona (5.6)
b_r – između držača četkica (5.6)

b — oznaka četkica metadina ili amplidina (8.3, 8.4, 8.5)
b — oznake pola tropolnog generatora (8.5)
C — konstanta s dimenzijom – »C«-vrijednost (4.5, 4.7, 6.6)
C — broj, konstanta karakteristična za neku izvedbu stroja (7.5, 7.6)
C — koeficijent kompleksnog oblika za određivanje magnetskog otpora u masivnom željezu (11.3, 11.6, 11.7)

C — formalna oznaka
– položaja (3.8, 5.1, 5.4)
– stezaljki (6.3, 7.5)
C′ – položaja (5.4)

C_{uydl} — faktor proporcionalnosti y-te uzbudne struje metadina s naponom među četkicama d i l (8.3)
C_{xdl} — faktor proporcionalnosti x-te armaturne struje metadina s naponom među četkicama d i l (8.3)
c — geometrijska ekscentričnost (5.4)
c — dužina jezgre magnetskog pola (7.5)
c — oznaka četkice amplidina ili metadina (8.3, 8.4, 8.5)
c — omjer ili faktor proporcionalnosti između
– induciranog napona i protjecanja (7.4)
– izlaznog napona amplidina i umnoška primarnog uzbudnog protjecanja s kvadratom brzine vrtnje (8.4)
– induciranog napona rotacije i struje serijskog kolektorskog stroja, svedeno na sinhronu brzinu vrtnje (10.3, 10.9)

– momenta serijskog trofaznog kolektorskog stroja i umnoška glavnog magnetskog toka s protjecanjem sekundara (10.7)

c_1 – induciranog napona prvog stepena pojačala i uzbudne struje (7.4)

c_1, c_{1A} – magnetskog toka i protjecanja u prvom stepenu amplidina (8.4)

c_{1K} – magnetskog toka i protjecanja u prvom stepenu kaskade (8.4)

c_2, c_{2A} – magnetskog toka i protjecanja u drugom stepenu amplidina (8.4)

c_{2K} – magnetskog toka i protjecanja u drugom stepenu kaskade (8.4)

c_e – induciranog napona i glavnog magnetskog toka (7.5)

c_g – induciranog napona generatora i uzbudne struje (7.4)

c_k – magnetskog toka i protjecanja kompenzacijskog namota amplidina (8.4)

c — konstanta za određivanje induktiviteta armaturnog kruga nezavisnog motora (11.1)

$c_2, c_3, \ldots c_n$ — koeficijent ulančenja rasipnog magnetskog toka sa zavojima pomoćnog pola (11.6)

c_{Cu} — specifična toplina bakra (8.7)

Č — oznaka četkica (2.1, 2.2)

D — promjer

– hvatišta sila (2.1)

– armature (4.1, 4.2)

D_a – armature (2.3, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 5.1, 5.6, 6.5, 6.6, 8.2, 8.7, 9.1, 9.2, 9.8)

D_{amax} – armature, maksimalno dopuštena vrijednost (9.3)

D_k – kolektora (4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 5.1, 5.4, 5.6, 6.5, 6.6)

D — prostorni pomak djelovanja induktiviteta različitih svitaka u komutaciji (4.5, 4.7)

D — oznaka stezaljki (6.3, 11.5)

d — oznaka za donji sloj namota (3.2, 3.3, 3.8, 9.4)

d — dubina prodiranja magnetskog toka u jezgru (7.5)

d — debljina magnetskog svitka u zavojima (8.1)

d — oznaka četkica amplidina ili metadina (8.3, 8.4, 8.5)

d_r — promjer rashladnih kanala u armaturi (6.5)

E — inducirani napon

– općenito (2.2, 3.8, 4.1, 4.3, 4.7, 6.1, 6.4, 6.6, 7.1, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 8.2, 8.4, 9.2, 9.7, 10.9, 11.3)

– na izlazu amplidina (8.7)

ΔE – razlika (6.6)

E' – stroja s utjecajem reakcije armature (4.3)

E', E'' – amplidinu pri promijenjenim okolnostima (8.7)

E_0 – u praznom hodu (4.3, 6.1, 6.2, 6.4)

E_1 – primara trofaznog kolektorskog stroja (10.7, 10.8)

E_1, E_2 – u raznim uvjetima (4.7, 6.6)

E'_1, E'_2 – pri minimalnom i maksimalnom otporu regulatora (6.6)

E_2 – u prvom stepenu metadina (8.7)

E_2 – sekundara asinhronog motora (10.6, 10.8, 10.9)

E_{20} – sekundara zakočenog asinhronog motora (10.6, 10.8, 10.9)

E_3 – u izlaznoj grani amplidina u statičkom stanju (8.4)

E_{30} – u izlaznoj grani amplidina u praznom hodu (8.4)

E_{3A} – u izlaznom krugu amplidina u statičkom stanju (8.4)

E_3 – u izlaznom krugu kaskade u statičkom stanju (8.4)

E_a – (pad) na armaturnom namotu (7.5)

E_{ak} – rotacije, k-ti harmonik u armaturnom namotu (11.4, 11.5, 11.6, 11.7)

E_{ask} – samoindukcije k-ti harmonik u armaturnom namotu (11.6)
E_d – u direktnoj osi metadina (8.5)
E_{dl} – među četkicama d i l metadina (8.3)
E_{ef} – izmjeničnog napona, efektivna vrijednost (4.1)
E_g – glavnog uzbudnika (7.4)
E_i – istosmjerni u namotu armature (11.6)
E_n – pri nazivnom teretu (6.6)
E_n – u prvom stepenu pojačala sa samouzbudom (7.4)
E_p – pri nazivnoj struji i uključenom pokretaču (6.6)
E_p – na izlazu pojačala (7.4)
E_{pp} – (pad) na namotu pomoćnih polova (7.5)
E_{ppk} – k-ti harmonik u namotu pomoćnih polova (11.4, 11.5, 11.6, 11.7)
E_q – u poprečnoj osi metadina (8.5)
E_r – rotacije, općenito (10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.9)
E_{r2} – ukupni u sekundaru porednog trofaznog kolektorskog stroja (10.8)
E_{rem} – remanentni (6.2, 8.5)
E_{rmax} – rotacije, izmjenični, maksimalna vrijednost (10.2)
E_{rs} – rotacije pri sinhronoj brzini vrtnje (10.2)
$E_{r=}$ – rotacije istosmjerni (10.4)
$E_{r\sim}$ – rotacije izmjenični (10.4)
E_t – transformacije (10.2, 10.3)
E_{tgk} – transformacije, k-ti harmonik u armaturnom namotu induciran glavnim magnetskim tokom (11.6)
E_{tppk} – transformacije, k-ti harmonik u armaturnom namotu induciran tokom pomoćnih polova (11.6)
E_u – (pad) na uzbudnom namotu serijskog stroja (7.5)
E_u – samoindukcije na uzbudnom namotu univerzalnog stroja (10.4, 10.9)
E_{uk} – u uzbudnom namotu, k-ti harmonik (11.5)
E_α – rotacije na svicima obuhvaćenim kutom α zakreta četkice (10.4)
$E_=$ – istosmjerni (10.9)
$E_\sim$ – izmjenični (10.9)
E_m — jakost električnog polja (11.3)
E — klasa izolacije (5.4)
E — oznaka stezaljki (6.3)

e — inducirani napon
– općenito (2.1, 2.3, 3.4, 4.1, 5.4, 7.2, 8.4, 9.7, 10.2)
– koji tjera vrtložne struje (7.5)
Δe – valovitost (2.2, 2.3)
Δe – gubitak uzrokovan reakcijom armature (4.3)
Δe – u komutacijskom svitku, nekompenziran (7.5)
Δe – razlika između ovoja dvovojnog petljastog namota (9.5, 9.6)
e_1 – razlika u praznom hodu prema onom rasterećenog vrha polne papuče stroja pod teretom (4.3, 4.7)
e_2 – razlika u praznom hodu prema onom za preopterećeni rub polne papuče stroja pod teretom (4.3, 4.7)
e_2 – u poprečnoj grani amplidina (8.4)
e_3 – u izlaznom krugu amplidina (8.4)
e_{30} – u izlaznom krugu amplidina, za prazni hod (8.4)
e_{ak} – rotacije među lamelama kolektora, k-ti harmonik (11.6)
e_{ask} – samoindukcije među lamelama kolektora, k-ti harmonik (11.6)

e_k – između lamela kolektora (4.3, 5.4, 5.6, 6.6, 7.5, 9.1, 9.2, 9.4, 9.5, 9.6, 9.8, 11.6)

Δe_k – nekompenzirani dio u komutacijskom svitku, k-ti harmonik (11.6, 11.7)

e_{kmax} – između lamela kolektora, maksimalni (5.4, 5.6, 9.1, 11.6)

e_{kn} – između lamela kolektora pri nazivnom naponu (7.6)

e_{kom} – u komutacijskom svitku, zbroj napona transformacije i samoindukcije (10.9)

Δe_{kom} – svitka u komutaciji, ukupni nekompenzirani (5.4, 10.9)

e_{ksr} – između lamela kolektora, srednja vrijednost na jednom polnom koraku (4.3)

e_{kx} – između lamela kolektora, na x-tom mjestu (5.4, 5.6)

e_{max} – najveća vrijednost (2.2)

e_{min} – najmanja vrijednost (2.2)

e_p – u komutacijskom svitku uzrokovan djelovanjem pomoćnih polova (10.2, 10.3, 10.9)

e_{pp} – nastao djelovanjem pomoćnih polova na svitak u komutaciji (4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 6.6, 7.5)

e_{pp1}, e_{pp2}... – nastao djelovanjem pomoćnih polova u različitim okolnostima (4.5)

e_{ppk} – u komutacijskom svitku, k-ti harmonik nastao djelovanjem pomoćnih polova (11.6, 11.7)

e_{ppx} – prosječna vrijednost u komutacijskom svitku, nastao djelovanjem pomoćnih polova na x-toj udaljenosti od simetrale pomoćnog pola (4.5, 4.7)

Δe_{pr} – nekompenzirani, srednja vrijednost prostorne raspodjele komutacijskog svitka (4.5, 4.7)

Δe_{pr1}, Δe_{pr2}, ... Δe_{pru} – srednja vrijednost nekompenziranog dijela prostorne raspodjele prvog, drugog, ... u-tog svitka (4.5, 4.7)

e_r – rotacije u komutacijskom svitku (10.2)

e_s – samoindukcije u komutacijskom svitku (4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 6.6, 7.5, 9.1, 9.2, 9.5, 9.8, 10.2, 10.3, 10.6, 10.8, 10.9, 11.6)

e_{s1}, e_{s2}... – samoindukcije komutacijskog svitka u različitim okolnostima (4.5, 4.7)

e_{sk} – samoindukcije, k-ti harmonik u komutacijskom svitku (11.6, 11.7)

e_{smax} – samoindukcije, maksimalno dopuštena vrijednost (4.4, 9.8)

e_{sr} – vodiča srednja vrijednost (4.1)

e_{ssr} – samoindukcije, srednja vrijednost (4.4, 4.5, 4.6, 4.7)

e_{sud} – samoindukcije svitka u komutaciji pri udarnoj struji (9.1)

e_{sv} – rezultantni u svitku (serijskog izmjeničnog stroja) koji komutira, a namotu pomoćnih polova priključen je poredni otpor (10.3)

e_t – transformacije u komutacijskom svitku (7.5, 10.2, 10.3, 10.6, 10.8, 10.9)

e_{tgk} – transformacije, k-ti harmonik u svitku armaturnog namota, uzrokovan glavnim magnetskim tokom (11.6)

e_{tk} – transformacije, k-ti harmonik u komutacijskom svitku (11.4, 11.5, 11.6, 11.7)

e_{tppk} – transformacije, k-ti harmonik u svitku armaturnog namota, uzrokovan magnetskim tokom pomoćnih polova (11.6)

F — funkcija koja predstavlja gubitke energije u sistemu (4.6)

F — sila – na vodič (2.1, 2.3)

– stezanja konusa kolektora (5.1)
F_c – centrifugalna (5.1)
F_l – rezultantna (5.1)
F_s – svodna (5.1)
F — prostorni pomak djelovanja induktiviteta različitih svitaka u komutaciji (4.5, 4.7)
F_{izl} — izlazna veličina pojačala (7.4)
F_{ul} — ulazna veličina pojačala (7.4)
F — klasa izolacije (5.4, 6.6)
F — oznaka stezaljki (6.3)
f — frekvencija
– mreže (4.1, 10.2, 10.3, 10.4, 10.6, 10.9)
– u rotoru kolektorskog stroja (4.5, 4.7, 10.2, 10.3, 10.4, 10.6, 10.9)
f_1 – u primaru stroja (10.6, 10.8)
f_2 – u sekundaru stroja (10.6, 10.8)
f_i – u rotoru kolektorskog stroja (11.1)
f_k – k-tog harmonika (11.1, 11.4, 11.6)
f_m – mreže (11.1)
f — faktor
f_{dA} – dobrote amplidina kao pojačala (8.4)
f_{dK} – dobrote kaskade kao pojačala (8.4)
f_n – namota (4.1, 8.5, 10.2)
f_{n1} – namota primarnog namota stroja (10.7, 10.8)
f_{n2} – namota sekundarnog namota stroja (10.7, 10.8)
f_{nt} – namota tetivni (10.8)
f_p – dobrote pojačala snage (7.4)
f_u – dobrote naponskog pojačala (7.4)
G — prostorni pomak djelovanja induktiviteta različitih svitaka u komutaciji (4.5, 4.7)
G — oznaka stezaljki (6.3)
G_1, G_2 — oznaka prvog i drugog generatora (6.6)
G_e — djelatna vodljivost električkog kruga (11.3)
g — oznaka za gornji sloj namota (3.2, 3.3, 3.8, 9.4)
g — manja od dimenzija (širine ili dužine) podloge pod pomoćnim polom (11.6)
H — jakost magnetskog polja
– općenito (8.1, 9.7, 11.3)
– u permanentnom magnetu (8.1)
H_o – pri apsolutnoj temperaturi nula [K] (9.7)
H_o – magnetiziranja permanentnog magneta u praznom hodu (II kvadrant) (8.1)
H_A – donja vrijednost pri pulsirajućem magnetiziranju (11.3)
H_B – gornja vrijednost pri pulsirajućem magnetiziranju (11.3)
H_c – koercitivna sila (8.1)
H_{em} – elektromagnetskog vala (11.3)
H_i – istosmjerna komponenta pri valovitom napajanju (11.3)
H_k – izmjenična komponenta pri valovitom napajanju (11.3)
H_{kr} – kritična za vodič u supravodljivom stanju (9.7)
H_m – magnetiziranja permanentnog magneta (8.1)
ΔH_m – dodatni utjecaj opterećenja stroja na magnetiziranje (8.1)
H_{mz} – u permanentnom magnetu pri potpuno zasićenom stanju (8.7)
ΔH_{m1}, ΔH_{m2} – dodatni utjecaj raznih opterećenja stroja na magnetiziranje (8.1)
ΔH_{mmax} – dodatni utjecaj na magnetiziranje izazvan maksimalnim dozvoljenim opterećenjem (8.1)

ΔH_{mn} – dodatni utjecaj nazivnog opterećenja stroja na magnetiziranje (8.1)
H_x – u zračnom rasporu na x-tom mjestu (5.4)
H_z – pri magnetiziranju permanentnog magneta do potpuno zasićenog stanja (8.1)
H_{zx} – u zubu armature na x-tom mjestu (5.4)
H_δ – u zračnom rasporu (8.1)
$H_{\delta pp}$ – u zračnom rasporu pomoćnog pola (4.4)
H — jedinična vodljiva vrijednost magnetskog rasipanja
– strane svitka zbog samoinduktiviteta (4.5, 4.7)
H_o – nadomjesna glave namota (4.5, 4.7)
H_d – strane svitka u donjem sloju (4.5, 4.7)
H_g – strane svitka u gornjem sloju (4.5, 4.7)
H_m – strane svitka zbog međuinduktiviteta (4.5, 4.7)
H_{sr} – srednja vrijednost ukupnih jediničnih vodljivih vrijednosti rasipanja svitka (4.7)
H — klasa izolacije (5.4)
H — oznaka stezaljki (6.3)
H'_m — širina svitka u glavi namota armature (4.5, 4.7)
h — geometrijska dimenzija, visina
$h_1, h_2 \ldots h_n$ – pozicijska silocijevi (11.6)
h_{20} – razmaka gornjeg i donjeg sloja namota u utoru armature (4.5, 4.7)
h_{21} – bakra u utoru armature (od gornjeg ruba gornjeg sloja do donjeg ruba donjeg sloja) (4.5, 4.7)
h_{22} – izolacijskog razmaka između klina i bakra u utoru armature (4.5, 4.7)
h_{23} – kosog dijela glave utora armature (4.5, 4.7)
h_{25} – gornjeg dijela dvostepenog ravnog utora armature (4.5, 4.7)
h_{gp} – jezgre glavnog pola (7.5)
h_{jr} – jarma armature (6.5, 6.6, 8.1)
h_{js} – jarma statora (7.5, 8.1)
h_{kr} – kritična vodiča armaturnog namota (6.5, 6.6)
h_p – od vrha utora u polu do gornjeg ruba polne papuče (11.6)
h_{pp} – jezgre pomoćnog pola (7.5, 11.3, 11.6)
h_r – rashladnog kanala armature (6.5, 6.6)
h_{u2} – ukupna utora armature (4.5, 4.7, 5.4)
h_v – vodiča (4.5, 4,7, 6.5, 6.6, 11.6)
h'_v – dionog vodiča armature (6.5)
h_{vad} – vodiča u donjem sloju armaturnog utora (4.5, 4.7, 6.5)
h_{vag} – vodiča u gornjem sloju armaturnog utora (4.5, 4.7, 6.5)
h'_{vd} – dionog vodiča armature u donjem sloju namota (6.5)
h'_{vg} – dionog vodiča armature u gornjem sloju namota (6.5)
h_k — koeficijent odvoda topline (5.4, 5.6)
I — struja
– općenito (4.5, 4.7, 5.4, 7.4, 8.1, 8.4, 9.2, 11.1, 11.3)
– stroja (armature) (6.1, 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6, 9.7, 10.3, 10.4, 10.7, 10.9)
– vodiča (2.1)
– tereta amplidina (8.3, 8.4)
ΔI – vršna vrijednost u prelaznom stanju (7.5, 7.6)
$I', I'_1, I'_2 \ldots$ – u raznim krugovima amplidina uz promijenjene okolnosti (8.7)
I_o – praznog hoda motora (6.6)
I_o – pokretanja trofaznog serijskog kolektorskog motora pri kutu zakreta četkica od 0° (10.7)

I_{I} I_{II} – prvog i drugog stroja u paralelnom radu (6.2)
I_1 – primarnog kruga amplidina (8.3, 8.7)
I_1 – primarna stroja (10.5, 10.8)
I_1, I_2 – stroja u raznim uvjetima (4.5, 4.7, 6.6)
I_2 – poprečnog kruga amplidina (8.3, 8.4, 8.7)
I_2 – sekundara stroja (10.8)
I_{20} – sekundara u praznom hodu stroja (10.8)
$I_{2\infty}$ – sekundara pri beskonačnoj brzini vrtnji (10.8)
$I_{2\mathrm{as}}$ – sekundara asinhronog motora (10.8)
$I_{2\mathrm{r}}$ – radna komponenta sekundara (10.8)
I_3 – izlazna amplidina u statičkom stanju (8.4)
$I_{3\mathrm{A}}$ – izlazna amplidina u statičkom stanju (8.4)
$I_{3\mathrm{K}}$ – izlazna kaskade u statičkom stanju (8.4)
I_{R} – kroz otpor paralelan namotu pomoćnih polova (10.3)
I_{a} – armature stroja (2.3, 3.2, 3.6, 4.1, 4.3, 4.5, 4.7, 5.2, 5.6, 6.2, 6.3, 6.5, 6.6, 7.1, 7.3, 7.4, 7.6, 8.1, 8.5, 9.2, 10.2, 10.5, 11.2)
$I_{\mathrm{a}}, I_{\mathrm{b}}, \ldots I_{\mathrm{n}}$ – koja teče četkicom *a*, *b*, ... *n*, metadina (8.3)
I_{a1}, I_{a2} – armature stroja u raznim uvjetima (4.7, 6.6)
I_{aef} – efektivna vrijednost valovite struje armature (11.6)
I_{ag} – u armaturi generatora (7.4)
I_{ai} – u armaturi, istosmjerna komponenta (11.1, 11.2, 11.4, 11.5, 11.6)
I_{ak} – armature u kratkom spoju (6.2)
I_{ak} – u armaturi, *k*-ti harmonik (11.1, 11.4, 11.5, 11.6)
I_{an} – armature stroja pri nazivnom naponu (4.3, 6.6)
I_{an} – armature, nazivna (6.2)
$I_{\check{\mathrm{c}}}$ – četkice (3.2, 3.6)
I_{g} – grane namota (3.6)
I_{i} – izjednačenja (6.6)
I_{i} – istosmjerna komponenta valovite struje (11.1)
I_{k} – u kratkom spoju (6.2, 7.1, 8.5, 10.3)
I_{k} – *k*-ti harmonik (11.1, 11.6)
I'_{k} – idealna u kratkom spoju (6.2)
I_{kmax} – maksimalna u kratkom spoju (8.5)
I_{kt} – trajna u kratkom spoju (6.6)
I_{kud} – udarna u kratkom spoju (8.5)
I_{l} – električkog luka (5.4)
I_{m} – iz mreže (6.2)
I_{max} – maksimalna serijskog stroja (10.3)
I_{max} – maksimalna vrijednost valovite struje (11.1)
I_{min} – minimalna vrijednost valovite struje (11.1)
I_{n} – stroja, nazivna (4.7, 5.4, 6.2, 6.4, 6.6, 7.5, 7.6, 11.1)
I_{p} – prilikom pokretanja (4.7, 7.1, 7.6, 10.7)
I_{p} – u namotu pomoćnih polova (10.3)
I_{pp} – u namotu pomoćnih polova pri valovitom napajanju (11.6)
I_{ppk} – u namotu pomoćnih polova, *k*-ti harmonik (11.4, 11.5, 11.6)
I_{q} – u poprečnom krugu metadina (8.5)
I_{st} – istosmjerna za stabiliziranje permanentnih magneta (8.1)
$I_{\mathrm{st}\sim}$ – izmjenična za stabiliziranje permanentnih magneta (8.1)
$I_{\check{\mathrm{s}}\mathrm{k}}$ – kroz šant, *k*-ti harmonik (11.5, 11.7)
I_{t} – tereta (4.7, 6.2, 7.1)
I_{u} – uzbude (8.5)

I_{u1}, I_{u2}, ... I_{um} – uzbude prvim, drugim, ... m-tim namotom metadina (8.3)
I_{ui} – srednja vrijednost kroz namot uzbude (11.5)
I_{uk} – ukupna (3.2)
I_{uk} – kroz namot uzbude, k-ti harmonik (11.5, 11.7)
I_{uy} – koja teče y-tim uzbudnim namotom metadina (8.3)
I_v – vodiča (3.2, 3.6, 4.2, 4.4, 4.6, 5.3, 5.4)
I_v – vrtložna (11.3)
I_{vk} – vrtložna u magnetskom krugu uzbude, k-ti harmonik (11.5)
I_{vppk} – vrtložna u magnetskom krugu pomoćnih polova, k-ti harmonik (11.4)
I_x – x-tom četkicom metadina (8.3)
ΔI_z – pomaka zone tamne komutacije (4.5)
$I_{\delta pp}$ – dio kroz namot pomoćnog pola koji stvara magnetski tok (4.6)
I_μ – magnetiziranja (11.3)
$I_{\mu i}$ – magnetiziranja istosmjerne komponente valovite struje (11.1)
$I_{\mu k}$ – magnetiziranja u uzbudnom namotu, k-ti harmonik (11.5)
$I_{\mu k}$ – magnetiziranja, k-ti harmonik (11.1)
$I_{\mu ppk}$ – magnetiziranja u namotu pomoćnog pola, k-ti harmonik (11.4, 11.5)
$I_=$ – univerzalnog motora pri istosmjernom priključku (10.4, 10.9)
$I_\sim$ – univerzalnog motora pri izmjeničnom priključku (10.4, 10.9)
I_g — istak glave namota armature (6.5, 6.6)
I — oznaka stezaljki (6.3)
I — oznaka »I« linije (6.4, 6.6)
IEC — internacionalna elektrotehnička komisija (6.3)
i — struja
– vodiča svitka u komutaciji (4.4, 4.5, 4.6)
– uzbude (6.4)
– serijskog stroja u prelaznom stanju (7.5, 7.6)
– izmjenična, trenutna vrijednost (8.1)
– općenito, trenutna vrijednost (8.4)
Δi – uzbude, razlika postojeće i potrebne vrijednosti (6.4, 6.6)
i_o – uzbude u praznom hodu (6.4)
i_1 – u uzbudnom (ulaznom) namotu amplidina (8.4)
i_1, i_2, ... i_n – svitaka u komutaciji, trenutne vrijednosti (4.5, 4.7)
i_2 – u poprečnom krugu amplidina (8.4)
i_3 – u izlaznom krugu amplidina (8.4)
i_k – poprečna u strani svitka koji komutira (4.6)
i_k – u kompenzacijskom namotu amplidina (8.4)
i_n – nezavisnog uzbudnog namota (6.6)
i_p – pri pravocrtnoj komutaciji, trenutna vrijednost (4.6)
i_q – u poprečnom krugu amplidina (8.4)
i_r – rezultantna u komutaciji, trenutna vrijednost (4.6)
i_s – uzbudna serijskog namota (6.6)
i_u – uzbude (4.1, 4.3, 4.7, 6.1, 6.2, 6.3, 6.6, 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 7.6, 11.7)
Δi_u – uzbude, prirast (6.6)
i_{uo} – uzbude u praznom hodu (6.4)
i_{u1} – uzbude u prvom uzbudnom namotu (7.4)
i_{u1}, i_{u2} – uzbude u raznim uvjetima (4.7, 6.6)
i_{u2} – uzbude u drugom uzbudnom namotu (7.4)
i_{uk} – uzbude, k-ti harmonik (11.4, 11.7)
i_{unez} – uzbude nezavisnog uzbudnog namota (6.6)
Δi_{unez} – nezavisne uzbude, potreban prirast (6.6)

i_{upor} – uzbude porednog uzbudnog namota (6.6)
i_v – vrtložna u polu (7.5)
i'_v – vrtložna (7.5)
i''_v – vrtložna, ekvivalentna vrijednost (7.5)
i_{vk} – vrtložna u magnetskom krugu uzbude, k-ti harmonik (11.4)
i_{zas} – zbog pada magnetskog napona uslijed reakcije armature (4.7)
i_μ – magnetiziranja (7.5)
$i_{\mu k}$ – magnetiziranja u uzbudnom namotu, k-ti harmonik (11.4)

J — moment inercije (4.6, 4.7, 7.3)
J — oznaka jarma (1.2)
j — debljina izolacije između lamela kolektora (4.4, 4.5, 4.7)
K — broj, faktor pojačanja (7.4)
K_p – snage (7.4)
K_{pmax} – maksimalni (7.4)
K_u – napona (7.4)
K_{umax} – napona, maksimalna vrijednost (7.4)
K_{un} – napona, samo od nezavisne uzbude (7.4)
K_{up} – napona pojačala (7.4)
K — broj, koeficijent
– kompleksni povećanja magnetskog otpora lameliranog željeza (11.3, 11.6, 11.7)
K_g – povećanja magnetskog otpora zračnog raspora glavnog pola (11.3, 11.7)
K_k – povećanja magnetskog otpora podloge pod pomoćnim polom (11.6, 11.7)
K_e – kriterij komutacijskog naprezanja (4.6, 4.7)
K — oznaka kolektora (2.1)
K — oznaka stezaljki (6.3)
k — broj općenito, veličina bez dimenzija
– broj lamela kolektora (3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.8, 4.3, 4.4, 4.5, 4.7, 5.4, 5.6, 6.6, 7.6, 8.5, 8.6, 9.1, 9.4, 9.8, 10.9, 11.6)
– red harmonika veličina prema frekvenciji mreže (11.1, 11.4, 11.5, 11.6)
– omjer magnetskog napona zračnog raspora i ukupnog protjecanja pomoćnog pola (4.6)
k_B – faktor izobličenja glavnog magnetskog polja (6.5)
k_a – red harmonika, veličinâ prema frekvenciji mreže za armaturni strujni krug (11.2)
k_{ak} – relativno dodatno povećanje radnog otpora zbog potiskivanja struje (11.6)
k_c – Carterov koeficijent (2.3, 5.4, 6.5, 11.3)
k_{c3} – Carterov koeficijent pod pomoćnim polom (4.5, 4.7, 7.5, 11.6)
k_{cek} – Carterov koeficijent uz ekvivalentni zračni raspor (5.4)
k_{cm} – Carterov koeficijent na mjestu maksimalne indukcije (5.4)
k_{epr} – koeficijent nekompenziranosti prostorne raspodjele induciranih napona svitka u komutaciji (4.5, 4.7)
k_{gub} – faktor brojnosti vodiča (6.5, 6.6)
k_{iz} – koeficijent izobličenja magnetske indukcije pod glavnim polom (5.4, 5.6)
k_{izx} – koeficijent izobličenja magnetske indukcije pod glavnim polom na mjestu x (5.6)

k_{ogub} – faktor ovisan o materijalu pola (6.5)
k_p – faktor pojačanja snage (8.4, 8.7)
k_p – kompleksni koeficijent pri određivanju magnetskog napona polne papuče glavnog pola (11.6, 11.7)
k_{pA} – faktor pojačanja snage amplidina (8.4)
k_{pK} – faktor pojačanja snage kaskade (8.4)
k_{pp} – omjer srednje i najveće magnetske indukcije u zračnom rasporu pomoćnog pola (4.5, 4.7)
k_{pv} – koeficijent prigušenja protjecanja pulsacija (5.4, 5.6)
k_t – faktor povećanja otpora zbog zagrijavanja (6.5, 6.6)
k_{tr} – iskustveni faktor pri računu gubitaka trenja i ventilacije (6.5, 6.6)
k_u – red harmonika veličinâ prema frekvenciji mreže za uzbudni strujni krug (11.2)
$k_ž$ – faktor punjenja željeza (4.5, 4.7, 11.6)
k_β – broj lamela kolektora obuhvaćen kutom β (4.3, 4.7, 6.6)
k_Θ – omjer protjecanja (5.4, 5.6)

k — konstanta (s dimenzijom), omjer, proporcionalnost
– općenito (7.2, 10.5)
– vremenski zavisan omjer srednjeg i vanjskog opsega presjeka pola (7.5)
– iznosa magnetskog polja i struje (8.1)
– među veličinama amplidina (8.4)
– između momenta i umnoška glavnog magnetskog toka sa strujnim oblogom serijskog trofaznog kolektorskog stroja (10.7)
k' – momenta motora i kvadrata struje serijskog motora (6.2)
k'' – induciranog napona i umnoška brzine vrtnje i struje serijskog motora (6.2)
k_1 – momenta i kvadrata struje (4.7)
k_1 – momenta i kvadrata magnetskog toka (6.6)
k_1 – među veličinama amplidina (8.4)
k_1, k_2, k_3 – u raznim izrazima za serijski trofazni kolektorski stroj (10.7)
k_2 – napona prema struji i brzini vrtnje (4.7)
k_2 – među veličinama amplidina (8.4)
k_{21} – među veličinama amplidina (8.4)
$k_č$ – karakteristična za četkicu (4.4)
k_e – induciranog napona i umnoška glavnog magnetskog toka s kutnom brzinom (4.1, 4.2, 8.1)
k'_e – induciranog napona i umnoška glavnog magnetskog toka s brzinom vrtnje (4.1, 4.3, 4.7, 6.2, 7.3, 8.1, 8.4, 8.5, 11.4)
k'_{e1}, k'_{e1K} – induciranog napona i umnoška glavnog magnetskog toka s brzinom vrtnje u prvom stupnju kaskade (8.4)
k'_{eA} – induciranog napona i umnoška glavnog magnetskog toka s brzinom vrtnje amplidina (8.4)
k'_{e2}, k'_{e2K} – induciranog napona i umnoška glavnog magnetskog toka s brzinom vrtnje u drugom stupnju kaskade (8.4)
k_m – momenta istosmjernog stroja i umnoška glavnog magnetskog toka sa strujom armature (4.2, 4.7, 6.2, 7.1, 7.3, 11.2)
k_n – induktivnih padova napona armaturnog i uzbudnog kruga serijskog stroja (7.5)
k_p – među veličinama serijskog trofaznog kolektorskog stroja (10.7)
k_s – umnoška brzine vrtnje i korijena momenta s induciranim naponom serijskog motora (6.2)

k_s – vremenski zavisan omjer srednjeg i vanjskog opsega presjeka pola (7.5)

k — nagib pravca samouzbude (7.4)

L — induktivitet
- općenito (4.6, 4.7, 7.2, 7.5, 8.4, 10.9)
- namota u armaturnom krugu stroja (6.2, 11.4)

L_l – (vlastiti) komutacijskog svitka (4.6)
L_l – prvog uzbudnog namota (7.4)
L_l – uzbudnog namota amplidina (8.4)
$L_{1,2}$ – međusobni, prvog i drugog uzbudnog namota (7.4)
L_{1k} – međusobni, uzbudnog i kompenzacijskog namota amplidina (8.4)
L_2 – drugog uzbudnog namota (7.4)
L_2 – u poprečnom krugu amplidina (8.4)
L_{2t} – kruga na izlazu prvog stupnja kaskade (8.4)
L_a – armaturnog kruga (7.1, 7.2, 7.4, 11.1)
L_{ak} – ukupni rasipni, svitka u komutaciji (4.5)
L_g – rasipni, glave namota (4.5)
L_{gz} – rasipni, glave zuba (4.5)
L_k – kompenzacijskog namota amplidina (8.4)
L_k – armaturnog kruga za k-ti harmonik (11.4)
L_p – prigušnice (11.5, 11.7)
L_{pps} – međusobni, komutacijskog svitka i namota pomoćnog pola (4.6)
L_s – rasipni, svitka u komutaciji (4.4)
L_u – rasipni, utora (4.5)
L_u – uzbudnog kruga (7.2, 7.4)
L_u – koji odgovara iznosu glavnog magnetskog toka (10.3)
L_{xy} – međusobni, x-tog i y-tog svitka (4.6)

L — geometrijska dimenzija, dužina

$L_č$ – ukupna četkica (4.6, 4.7)
L_{js} – jarma statora mjerena po luku (7.5)

l — geometrijska dimenzija, dužina
- željeza armature (2.1, 2.2, 2.3, 3.4, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.7, 8.2, 8.7, 9.2)
- presjeka (površine) koji vodi vrtložne struje (7.5)
- magnetskog puta u magnetskom krugu (8.1)

l_a – paketa limova armature (11.6)
l_e – puta vrtložnih struja (11.3)
l_g – vodiča u glavi namota armature (4.5, 4.7)
l_{gp} – jezgre glavnog pola (6.5, 7.5, 11.3, 11.7)
l_i – paketa, idealna (4.7, 5.4, 9.8, 11.3, 11.6)
l_{js} – jarma statora (mjerena aksijalno) koja vodi magnetski tok (7.5)
l_k – klizne plohe kolektora (5.4, 5.6)
l_l – električkog luka (5.4)
l_m – (visina) permanentnog magneta (8.1, 8.7)
l_m – magnetskih silnica (11.3)
l_p – jezgre glavnog pola (9.5, 11.6)
l_{pp} – jezgre pomoćnog pola (4.5, 4.6, 4.7, 7.5, 11.3, 11.6, 11.7)
l_r – rotora (6.5, 6.6)
l_s – razmak od bočne strane jezgre glavnog pola do simetrale pomoćnog pola (11.3, 11.7)
l_v – vodiča namota (3.6, 4.7, 6.5, 6.6, 8.7, 11.6)

l_z – zavoja namota (6.6)
$l_ž$ – željeza paketa (4.5, 4.7, 6.5, 6.6)
l — oznaka četkice metadina (8.3)
M — zakretni moment
– para sila (2.1)
– stroja (4.2, 4.6, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 6.6, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.7, 10.8, 10.9, 11.2, 11.4, 11.6)
ΔM – valovitost (2.3)
M_1, M_2, ... – stroja u raznim okolnostima (4.7, 6.6)
M_1, M_2, M_3, M_4 – parcijalni dijelovi pri valovitom napajanju motora (11.2)
M_{4sr} – srednja vrijednost četvrtog parcijalnog momenta valovito napajanog motora (11.2)
M_g – uslijed gubitaka (4.7, 6.6)
M_k – stroja u kratkom spoju (6.2)
M_m – motora (6.5, 7.1, 7.3, 10.3, 10.5, 10.7, 10.8)
M_{m1}, M_{m2}, ... – motora u raznim okolnostima (4.7, 6.6)
M_{max} – maksimalni stroja (10.3)
M_n – nazivni motora (6.6, 10.4, 10.9, 11.6)
M_{n1}, M_{n2}, ...– nazivni motora u raznim okolnostima (6.6)
M_{os} – na osovini stroja (4.7, 6.6)
M_p – pokretanja motora (4.7, 7.6, 10.5, 10.7)
M_p – prekretni stroja (10.8, 10.9)
M_{pok} – pokretanja serijskog trofaznog kolektorskog stroja (10.7)
M_{pp} – prekretni Schrageovog motora (10.8)
M_s – srednja vrijednost jednofaznog kolektorskog stroja (10.2)
$M_{s\sim}$ – srednja vrijednost jednofaznog kolektorskog stroja (10.2)
M_t – opterećenja (7.1, 10.3)
M_v – vodiča (4.2)
M_{v1}, M_{v2}, ... – ventilatora pri brzinama vrtnje n_1, n_2, ... (4.7, 6.6)
$M_=$ – istosmjernog kolektorskog stroja u usporedbi s izmjeničnim (10.2, 10.4, 10.9)
$M_\sim$ – kolektorskog stroja priključenog na izmjenični napon (10.4, 10.9)
M — magnetiziranje
– općenito (8.1)
M_r – remanentno (8.1)
M_{zas} – pri potpunom zasićenju (8.1)
M_1, M_2 — oznaka prvog i drugog motora (6.6)
M_j— mjerilo
– fizikalne veličine (4.5, 4.7)
M_{jB} – magnetske indukcije (4.7)
$M_{j\tau}$ – polnog koraka (4.7)
m — masa
m_{Cu} – bakra (8.7)
m_j – jarma armature (6.5, 6.6)
m_z – zubi armature (6.5, 6.6)
m — opća brzina (4.6)
m — prirodni broj
– općenito (4.5, 4.7)
– dipolskih momenata u jedinici volumena magneta (8.1)
– uzbudnih namota metadina (8.3)
– faza (10.8)

– pulsacija u jednoj periodi (11.1, 11.4, 11.5, 11.7)
m_2 – faza sekundara (10.6)
m_v – vodiča (ne dionih!) po visini utora (6.5, 6.6, 11.6)

N — broj
– utora armature (2.2, 2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.8, 4.4, 4.5, 4.7, 6.5, 6.6, 7.6, 9.4, 9.5, 9.8)
N_{sp} – spojki izjednačenja potencijala (3.2, 3.3)
N_{spmax} – spojki izjednačenja potencijala, najveći mogući (3.2, 3.3)
N — oznaka magnetskog pola (2.1, 3.1, 3.4, 3.8, 4.1, 4.3, 4.7, 5.4, 6.3, 8.6)
N — oznaka sabirnice (6.3, 6.6, 7.3, 7.6, 8.5)
N′ — oznaka sabirnice pomoćnog izvora (6.3, 6.7)
NZ — oznaka neutralne zone (2.1, 2.2, 4.3, 8.5)

n — brzina vrtnje
– općenito (4.1, 4.3, 4.4, 4.5, 4,7, 6.1, 6.2, 6.4, 6.5, 6.6, 7.1, 7.5, 7.6, 8.1, 8.2, 8.4, 8.5, 8.7, 9.2, 9.8, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 10.8, 10.9, 11.4, 11.5, 11.6, 11.7)
Δn – razlika u dva različita stanja (6.4)
n' – u promijenjenim uvjetima (9.8, 10.9)
n', n'' – generatora u raznim okolnostima (6.6, 8.7)
n_o – u praznom hodu (6.2, 6.4, 6.6)
n_{01}, n_{02}, ... – praznog hoda u različitim okolnostima (6.6)
n_1, n_2, ... – općenito u različitim okolnostima (4.7, 6.1, 6.6)
n_{1K}, n_{2K}, ... – prvog, drugog stepena kaskade (8.4)
n_A – amplidina (8.4)
n_{Amax} – maksimalna vrijednost pri kojoj se uz nazivnu magnetsku indukciju ostvaruje dopušteni napon među lamelama kolektora (7.5, 7.6)
n_{max} – gornja granica (10.9)
n_{min} – donja granica (10.9)
n_n – nazivna (6.4, 6.6, 7.6, 10.4, 11.1, 11.6)
n'_n – nazivna pod drugim uvjetima (6.6)
n_{n1}, n_{n2}, ... – nazivna u različitim okolnostima (6.6)
n_p – uz uključeni pokretač (6.6)
n_s – sinhrona (10.3, 10.7, 10.8, 10.9)
$n_=$ – univerzalnog motora pri priključku na istosmjerni napon (10.4, 10.9)
$n_\sim$ – univerzalnog motora pri priključku na izmjenični napon (10.4, 10.9)
n — oznaka magnetskog pomoćnog pola (5.4, 6.3)

n — broj
– općenito (2.2, 3.4, 3.8, 4.5, 4.7, 9.4)
– četkica metadina (8.3)
– segmenata supravodljivog stroja tanjuraste izvedbe (9.7)
$n_č$ – četkica na kolektoru (3.6)
$n_č$ – četkica u jednom redu (5.6)
n_r – rashladnih kanala armature (6.5, 6.6)
O — oznaka položaja (5.4)
O — oznaka četkice (8.5)
O_p — vanjski opseg jezgre glavnog pola (7.5)
O'_p — srednji opseg presjeka jezgre glavnog pola (7.5)
o — omjer regulacijskog i induciranog napona u sekundaru Schrageova motora (10.8, 10.9)
o_2 — otvor utora armature (2.3, 4.5, 4.7, 6.5)

P — snaga

- P – općenito (2.3, 4.7, 7.3, 9.2, 9.8)
- P_1 – ulazna (6.5, 6.6, 10.4)
- P_{1n} – primljena nazivna (6.6)
- P_2 – izlazna (4.7, 6.4, 6.5, 6.6, 10.4, 10.8)
- P_{21}, P_{22} – stroja prije i nakon prematanja ili dvaju različitih strojeva u zajedničkom radu (6.6)
- P_{2g} – generatora, izlazna (4.7)
- P_{2m} – motora, izlazna (4.7)
- P_{2n} – predana nazivna (6.6)
- P_{el} – električka (10.6)
- P_{gr} – granična (9.2, 9.6)
- P'_{gr} – granična u promijenjenim uvjetima (9.8)
- P_{grud} – granična, udarna (9.8)
- P_k – komutacije (4.6, 4.7)
- ΔP_k – nedovršene komutacije (5.4)
- P_m – mehanička (4.6, 10.3, 10.6)
- P_{max} – maksimalna (9.2)
- P_{op} – prenijeta (okretnim poljem) kroz zračni raspor (10.6)

P — gubici snage

- P_{Cu} – u bakru armaturnog kruga (6.6)
- P_{Cua} – u namotu armature, nazivni (istosmjerni) (6.5, 6.6)
- P_{Cua} – u namotu armature univerzalnog motora (10.4)
- P_{Cud} – u namotu armature, ukupni dodatni (6.6)
- P_{Cudk} – u namotu armature, dodatni od k-tog harmonika struje (11.6)
- P_{Cudn} – u namotu armature, ukupni dodatni pri nazivnoj struji (6.6)
- P_{Cudp} – u namotu armature, dodatni od poprečnog magnetskog polja (6.5, 6.6)
- P_{Cudpk} – u namotu uzbude i pomoćnog pola, dodatni od k-tog harmonika struje (11.6)
- P_{Cudu} – u namotu armature, dodatni od uzdužnog magnetskog polja (6.5, 6.6)
- P_{Cuk} – u kompenzacijskom namotu (6.5)
- P_{Cuk} – u bakru svitka u komutaciji univerzalnog motora (10.4)
- P_{Cun} – u bakru armaturnog kruga pri nazivnoj struji (6.6)
- P_{Cun} – u nezavisnom uzbudnom namotu (6.6)
- P_{Cuok} – u namotu, osnovni od k-tog harmonika struje (11.6)
- P_{Cupp} – u namotu pomoćnih polova (6.5)
- P_{Cus} – u serijskom namotu (6.5)
- P_{Cuu} – u uzbudnom namotu (10.4)
- P_{Fe} – u željezu (6.6, 11.3)
- P_{Fel} – ukupni koji djeluju kao gubici u željezu statora univerzalnog motora (10.4)
- P_{Fe11} – u željezu statora univerzalnog motora (10.4)
- P_{Fe21} – dio u željezu rotora univerzalnog motora koji djeluje kao da su na statoru (10.4)
- P_{Fe22} – dio u željezu rotora univerzalnog motora koji djeluju na rotoru (10.4)
- P_{Fej} – u željezu jarma (6.5, 6.6)
- P_{Fek} – u željezu od k-tog harmonika magnetskog toka (11.6)
- P_{Fep} – u željezu glavnog pola, površinski (6.5)
- P_{Fez} – u željezu zubiju armature (4.3, 6.5, 6.6)
- P_{Fezo} – u željezu zubiju armature u praznom hodu stroja (4.3)

$P_č$ – na četkicama (10.4)
$P_{elč}$ – prelaza struje na kolektoru (5.2, 5.4, 5.6, 6.5, 6.6)
$P_{elčk}$ – prelaza struje na kolektoru od k-tog harmonika struje (11.6)
$P_{elčn}$ – prelaza struje na kolektoru pri nazivnoj struji (6.6)
P_g – ukupni, razlika snage na ulazu i izlazu (6.5, 6.6)
P'_g – sveukupni, razlika snage na svim ulazima i izlazima (6.5, 6.6)
P_{go} – u praznom hodu (6.6)
P_{km} – mehanički na kolektoru (5.4, 5.6, 6.5, 6.6)
P_m – mehanički stroja (6.5, 6.6, 10.4)
P_{pok} – u podlozi pod pomoćnim polom od k-tog harmonika vrtložnih struja (11.6)
P_{tr} – trenja u ležajima i rotora o zrak (6.5)
$P_{trč}$ – trenja četkica na kolektoru (5.2)
P_u – u uzbudnim namotima (6.5, 6.6)
P_v – zbog vrtložnih struja (4.6)
P_v – ventilacije (6.5)

P — radna točka »I linije« (6.4, 6.6)
P — oznaka sabirnice (6.3, 6.6, 7.3, 7.6, 8.5)
P′ — oznaka sabirnice pomoćnog izvora (6.3, 7.6)
P_0 — točka ishodišta uzbude »I linije« (6.4, 6.6)
p — broj pari polova (2.2, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.6, 3.8, 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.7, 5.4, 5.6, 6.2, 6.5, 6.6, 7.5, 7.6, 8.5, 8.7, 9.2, 9.4, 9.5, 9.8, 10.2, 10.3, 10.4, 10.6, 10.8, 11.1, 11.2, 11.4, 11.6, 11.7)
$p_č$ — pritisak četkica (5.2, 5.6, 6.5, 6.6)
p_g — pogreška u postocima (9.8)
pp — oznaka za pomoćni pol (2.1, 8.5)
Q — opća sila (4.6)
Q — prostorni pomak djelovanja induktiviteta različitih svitaka pri komutaciji (4.5, 4.7)
q — presjek

– vodiča općenito (3.6, 4.7, 8.7)
q_{Cu} – bakra (8.7)
q_a – vodiča armaturnog namota (6.6)
$q_{a1}, q_{a2}, \ldots$ – vodiča armaturnog namota u raznim izvedbama (6.6)
q_{pp} – vodiča namota pomoćnih polova (6.6)
q_{pp1}, q_{pp2} – vodiča namota pomoćnih polova u raznim izvedbama (6.6)
q_s – vodiča serijskog namota (6.6)
$q_{s1}, q_{s2}, \ldots$ – vodiča serijskog namota u raznim izvedbama (6.6)
q_u – vodiča porednog (nezavisnog) uzbudnog namota (6.6)
$q_{u1}, q_{u2}, \ldots$ – vodiča porednog (nezavisnog) uzbudnog namota u raznim izvedbama (6.6)
q'_{u2} – vodiča uzbudnog namota u promijenjenim okolnostima, približna vrijednost (6.6)

q — opća koordinata (4.6)
q — varijabla u algebarskoj jednadžbi karakterističnoj za diferencijalnu (8.4)
q_1, q_2 — korijeni karakteristične algebarske jednadžbe (8.4)

R — električki djelatni otpor

– općenito (4.1, 4.7, 7.2, 7.5, 8.4, 8.7, 10.3, 10.4, 10.9)
– okvira učvršćenja namota na polu (11.3)
R' – fiktivni, nadomješta inducirani napon rotacije (10.3, 10.4)
R_1 – prelazni dolaznog dijela četkice (4.4)

R_1 – u uzbudnom krugu pojačala snage (8.4, 8.7)
R_1 – primarnog namota (10.8)
R_{1A} – u uzbudnom krugu amplidina (8.4)
R_{1K} – u uzbudnom krugu kaskade (8.4)
R_2 – prelazni odlaznog dijela četkice (4.4)
R_2 – u poprečnom krugu pojačala snage (8.4)
R_2 – sekundarnog namota (10.8)
R_{2A} – u poprečnom krugu amplidina (8.4)
R_{2K} – u poprečnom krugu kaskade (8.4)
R_{2t} – u uzbudi drugog stepena kaskade (8.4)
R_3 – izlaznog kruga pojačala snage (8.4)
R_{3A} – izlaznog kruga amplidina (8.4)
R_{3K} – izlaznog kruga kaskade (8.4)
R_a – namota armature (3.6, 4.1, 4.3, 4.7, 6.5, 6.6, 7.1, 7.2, 7.3, 7.4, 8.1, 8.4, 8.5, 10.3, 10.4, 11.4, 11.5, 11.6, 11.7)
R_{al} – armaturnog namota pomoćnog uzbudnika (7.4)
R_{ag} – armaturnog namota uzbudnog generatora (7.4)
R_{ai} – namota armature istosmjernoj struji (11.6)
R_{ak} – namota armature k-tom harmoniku struje (11.6)
R_{au} – armaturnog kruga ukupni, nezavisnog motora (11.4)
$R_č$ – četkica (4.4, 8.4)
R_d – predotpor (4.7, 6.6, 7.6, 8.5)
R_e – električkog kruga (11.3)
R_i – istosmjernoj struji općenito (11.6)
R_i – uzbudnog namota (10.3)
R_k – kompenzacijskog namota (4.3, 6.5, 8.4, 10.3, 11.7)
R_m – uzbudnog namota (6.2, 6.6, 7.6)
R_{mo}, R'_m, R''_m,... – ukupni u uzbudnom krugu s raznim veličinama predotpora (6.2, 6.6)
R_{m1} – uzbudnog namota jednog pola (4.7)
R_{m1}, R_{m2},... – pravca samouzbude za postizanje induciranih napona E_1, E_2, ... (6.6)
R_{md} – dodatni u uzbudnom krugu (6.6)
R_{mk} – pravca samouzbude, kritični (6.6, 7.6)
R_p – pokretača (6.6, 8.7)
R_p – paralelan namotu pomoćnih polova (10.3)
R_p – prigušnice (11.1, 11.4, 11.5, 11.7)
R_{pp} – namota pomoćnih polova (4.3, 6.5, 10.3, 11.4, 11.5, 11.7)
R_{pred} – predotpora (7.1)
R_{rmax} – regulatora, maksimalna vrijednost (6.6)
R_{rmin} – regulatora, minimalna vrijednost (6.6)
R_s – serijskog namota (4.3, 6.5)
R_s – svitka u komutaciji (4.4)
R_s – ukupni u krugu serijskog stroja (6.2)
$R_š$ – šanta (11.5, 11.7)
R_t – vanjskog tereta na stroju (generatoru) (6.2, 6.4, 7.1, 7.4, 8.3, 8.4, 8.5)
R_t – faze sekundara transformatora (11.1)
R_{tg} – tereta uzbudnog generatora (7.4)
R_u – unutarnji istosmjernog stroja (4.1, 4.3, 4.7, 6.1, 6.2, 6.4, 6.6, 7.6, 8.7)
R_u – uzbudnog namota (7.1, 7.2, 7.4, 10.4, 11.4, 11.5, 11.7)
R_{u1}, R_{u2},... – unutarnji prvog, drugog, ... istosmjernog stroja (6.6)
R_{u1}, R_{u2} – prvog i drugog uzbudnog namota (7.4)

R_{un} – nezavisnog uzbudnog namota (6.6)
R_v – vodiča (3.6)
R_v – voda između svitka i kolektora (4.4)
R_v – kruga vrtložnih struja (7.5)

R — magnetski otpor
$R_{b\delta}$ – drugog zračnog raspora pomoćnog pola, za dio bočnog rasipanja (11.6, 11.7)
R_{gl} – glavnom magnetskom toku (8.1)
R_k – rasipnom magnetskom toku namota statora (11.6)
R_m – bilo kog magnetskog kruga (8.1)
R_m – magnetskog kruga (11.3)
R_{pjk} – rasipnom magnetskom toku pomoćnog pola prema jarmu (11.6, 11.7)
R_s – rasipnom magnetskom toku (8.1)
R_{spk} – rasipnom magnetskom toku pomoćnog pola prema glavnom polu (11.6, 11.7)
R_δ – zračnog raspora glavnog pola (11.3, 11.4, 11.7)
$R_{\delta m}$ – ekvivalentnog zračnog raspora u magnetskom krugu pomoćnih polova (7.5)
$R_{\delta pjk}$ – drugog zračnog raspora pomoćnog pola (izveden od izolacijskog materijala) (11.6, 11.7)
$R_{\delta ppk}$ – prvog zračnog raspora pomoćnog pola (11.6, 11.7)

R_1 — polumjer zaobljenja polne papuče glavnog pola (5.4)
R_a — polumjer armature (5.4, 5.6)
r — visina četkice (5.3)
$r_č$ — srednja vrijednost otpora četkice poprečnoj struji (4.6)

S — površina
– općenito (4.7)
– presjeka magnetskog kruga (8.1)
S_1 – dolaznog dijela četkice (4.4)
S_2 – odlaznog dijela četkice (4.4)
S_{Fe} – presjeka željeza okomito na smjer magnetskog toka (11.3)
$S_č$ – prilijeganja svih četkica na kolektor (5.6, 6.5)
$S_č$ – četkice (4.4, 4.7, 5.1)
S_m – presjeka permanentnog magneta (8.1)
S_{pgp} – polnih papuča glavnih polova (6.5)
$S_{s1}, S_{s2}, \ldots S_{sx}$ – pri određivanju prostorne raspodjele ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja (4.7)
$S_{žpp}$ – presjeka željeza jezgre pomoćnog pola okomito na smjer magnetskog toka (4.5)
S_δ – presjeka zračnog raspora (8.1)

S — pravac samouzbude (6.4)
S — oznaka magnetskog pola (2.1, 3.1, 3.5, 3.8, 4.1, 4.3, 4.7, 5.4, 6.3, 8.6)
$S1, S2, \ldots S_u$ — dohvat djelovanja svitka 1,2,... u pri prostornoj raspodjeli ukupne jedinične vodljive vrijednosti rasipanja (4.7)

s — klizanje
– općenito (10.6, 10.7, 10.8, 10.9)
s_o – u praznom hodu Schrageovog motora (10.8)
s_n – nazivno (10.9)
s_p – prekretno (10.7, 10.8, 10.9)
s_{pn} – prekretno, asinhronog motora u primjeru bez ikakvog dodatnog otpora u rotoru (10.8)

s_{pp} – prekretno Schrageovog motora (10.8)
s_t – pod određenim opterećenjem (10.9)
s — širina lamele kolektora (4.5, 4.7, 6.6)
s — oznaka magnetskog pomoćnog pola (5.4, 6.3)
$š$ — šantiranje, postotno (6.6)
T — električka vremenska konstanta
– općenito (7.2, 7.4, 7.5)
– uzbudnog kruga (4.7)
T' – suma primarnih uzbudnih namota i kompenzacijskog namota odnosno izlaznog kruga (8.4)
T_1 – primarnog kruga amplidina (8.4)
T_1, T_2,... – prvog, drugog, ... uzbudnog namota (7.4)
T_{1K} – uzbudnog primarnog kruga kaskade (8.4)
T_2 – poprečnog kruga amplidina (8.4)
T_{2A} – poprečnog kruga amplidina (8.4)
T_{2K} – međukruga kaskade (8.4)
T_3 – izlaznog kruga amplidina (8.4)
T'_A – suma, primarnih uzbudnih namota i kompenzacijskog namota odnosno izlaznog kruga amplidina (8.4)
T_a – armaturnog kruga (7.1, 7.2)
T_k – kompenzacijskog namota amplidina (8.4)
T_p – uzbude pojačala (7.4)
T_u – uzbudnog namota (7.2, 7.6)
T_{un} – uzbudnog namota u nezasićenom stanju (7.2)
T — temperatura u stupnjevima Kelvina (9.7)
T_{kr} — kritična temperatura o kojoj ovisi kritično magnetsko polje (9.7)
T_k — trajanje komutacije (4.4, 4.5, 4.6, 6.5, 10.2, 10.6)
t — vrijeme (2.1, 2.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 5.3, 6.2, 6.5, 7.2, 7.4, 7.5, 8.1, 8.4, 8.7, 9.7, 10.2, 10.6, 11.1, 11.2, 11.6)
t — zajednička mjera (3.1)
t — lučna mjera četkice (5.3)
t_r — korak kanala za hlađenje armature (6.5)
U — električni napon
– općenito (2.2, 2.3, 4.1, 4.3, 4.7, 5.4, 5.6, 6.1, 6.2, 6.4, 6.5, 6.6, 7.1, 7.3, 7.4, 7.5, 7.6, 8.1, 8.4, 8.5, 9.1, 9.5, 9.8, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 10.8, 10.9, 11.1, 11.3)
– na izlazu amplidina (8.7)
U – pad, prirast (6.2, 6.4, 6.6)
U', U'_1, U'_2 – u raznim krugovima amplidina pri promjenljivim okolnostima (8.7)
U_0 – u praznom hodu (6.2, 6.4, 6.6, 8.5)
U_{01}, U_{02}, U_{03},... – u praznom hodu pri raznim okolnostima (8.5)
U_1 – prvog stepena pojačala (7.4)
U_1 – primarnog kruga amplidina (8.3, 8.4, 8.7)
U_1 – primara stroja (10.5, 10.7)
U_1, U_2,... – stroja u raznim uvjetima (4.7, 6.6)
U_2 – sekundara stroja (10.7)
U_2 – faze sekundara transformatora ili mreže (11.1, 11.7)
U_3 – na izlazu amplidina (8.4)
U_{AB} – između četkica A i B (8.5)
U_{AB}, U_{AC} – porednog generatora na donjoj i gornjoj granici vanjske karakteristike (6.6)

U_{Am} – na stezaljkama namota armature, maksimalna vrijednost (11.6, 11.7)
U_a – na armaturnom namotu univerzalnog motora (10.4)
U_{ac} – između četkica *a* i *c* amplidina (8.3)
U_{ak} – na armaturnom namotu, *k*-ti harmonik (11.4, 11.5, 11.6, 11.7)
U_{bd} – između četkica *b* i *d* amplidina (8.3)
$\Delta U_č$ – pad na četkicama (4.1, 4.3, 4.7, 5.2, 5.6, 6.2, 6.5, 6.6, 7.3, 8.1, 8.5, 8.7, 10.4, 11.6)
$\Delta U_{čl}$ – pad na jednoj četkici (5.2)
$\Delta U_{čef}$ – pad na četkicama pri valovitoj struji (11.6)
U_d – na izlazu amplidina (8.4)
U_g – glavnog uzbudnika (7.4)
U_i – srednja vrijednost na istosmjernoj strani ispravljačkog uređaja (11.1, 11.4, 11.7)
ΔU_i – pad na ispravljačkom ventilu (11.1, 11.4)
U_{imax} – maksimalna vrijednost na istosmjernoj strani ispravljačkog uređaja (11.1, 11.6, 11.7)
U_k – amplitudna vrijednost, *k*-ti harmonik (11.1)
U_k – na motoru, *k*-ti harmonik (11.4, 11.7)
ΔU_k – pad u armaturnom krugu, *k*-ti harmonik (11.7)
U_{kk} – pad na namotu kompenzacije, *k*-ti harmonik (11.7)
U_l – električnog luka (5.4)
U_m – srednja vrijednost ispravljenog napona na motoru (11.1, 11.6)
U_{m-n} – između *m*-te i *n*-te četkice (4.7)
U_{mk} – pad na motoru, *k*-ti harmonik (11.7)
U_n – nazivni (4.7, 5.4, 6.4, 6.6, 7.6, 10.9, 11.1)
U_{pk} – na prigušnici, *k*-ti harmonik (11.7)
U_{ppk} – na namotu pomoćnih polova, *k*-ti harmonik (11.5, 11.7)
U_q – u poprečnoj grani amplidina (8.4)
U_r – dodatni, regulacijski Schrageovog motora (10.8, 10.9)
ΔU_s – pad na serijskom namotu (6.6)
U_u – uzbude (4.7, 6.5, 11.7)
U_u – na uzbudnom namotu univerzalnog motora (10.4)
ΔU_u – pad na porednom uzbudnom namotu (6.6)
U_{ud} – udarni (8.5)
U_{uk} – na uzbudnom namotu, *k*-ti harmonik (11.4, 11.5, 11.7)
U_ν – amplituda vrijednost ν-ti harmonik (11.1)
$U_=$ – istosmjerni (10.3, 10.4)
$U_\sim$ – izmjenični (10.3, 10.4, 10.6, 11.4, 11.5)

u — električni napon
– općenito (8.4, 8.5)
u_3 – na izlazu amplidina, trenutna vrijednost (8.4)
u_{30} – na izlazu amplidina u praznom hodu, trenutna vrijednost (8.4)
u_i – ispravljeni napon, trenutna vrijednost (11.1)
u_n – na nezavisnom uzbudnom namotu (6.6)

u — oznaka uzbudnog namota (2.1)
u — broj strana svitaka u sloju utora (formalni broj svitaka u utoru) (3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.8, 4.4, 4.5, 4.7, 6.5, 6.6, 8.6, 9.4, 9.5, 9.8)
u_k — broj strana svitaka kraćeg koraka (4.5, 4.7)
u_l — broj strana svitaka dužeg koraka (4.5, 4.7)
V — magnetski napon

V_M – magnetskog kruga izuzevši onaj permanentnih magneta (8.1)
$V_č$ – izazvan pomakom četkica iz neutralne zone (4.3, 4.7, 6.6)
V_{dod} – dodatni, da se u magnetskom krugu uspostavi magnetski tok kao u praznom hodu (4.3)
V_{dodn} – dodatni, da se u magnetskom krugu pri nazivnom naponu uspostavi magnetski tok kao u praznom hodu (4.3)
V_{jr} – jarma rotora (8.1)
V_{js} – jarma statora (8.1)
V_{jpp} – jarma statora po polu za magnetski krug pomoćnih polova (7.5)
V_{komut} – magnetskog kruga pomoćnih polova (4.4)
V_p – glavnog pola (8.1)
V_{pp} – jezgre pomoćnog pola
V_z – zuba armature (5.4, 8.1)
V_{zas} – fiktivni, uslijed protjecanja armature (4.3, 4.7, 8.1)
V_{zasn} – fiktivni, uslijed protjecanja armature nazivnom strujom (4.3, 4.7)
V_δ – zračnog raspora (5.4, 8.1)
V_δ – zračnog raspora pod glavnim polom (6.5)
V'_δ – formalno povećanog zračnog raspora (8.1)
$V_{\delta o}$ – formalno povećanog zračnog raspora u praznom hodu (8.7)
$V_{\delta j}$ – zračnog raspora pomoćnog pola između pola i jarma statora (4.5, 4.7)
$V_{\delta pp}$ – zračnog raspora pomoćnog pola (4.5, 4.7)
$V_{\delta ppk}$ – zračnog raspora pomoćnog pola, k-ti harmonik

V — volumen (8.1)
$V_č$ — potrošnja četkica (5.2)
v — brzina
– obodna armature (2.1, 2.3, 3.4, 3.8, 4.1, 4.3, 6.3, 8.2, 8.5, 11.6)
– pomaka kolektora ispod četkica (5.2)
v_1, v_2,... – gibanja u raznim okolnostima (4.7)
v_a – obodna armature (4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 5.4, 9.1, 9.2, 9.6, 9.8, 11.6, 11.8)
v_{amax} – obodna armature, maksimalna dopuštena vrijednost (9.2)
v_k – obodna kolektora (4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 5.2, 5.4, 5.5, 5.6, 6.5, 6.6)

v — valovitost
v_i – struje nesinusnog oblika (11.1)
v_{ik} – k-tog harmonika struje (11.1, 11.5, 11.6)
v_{ika} – k-tog harmonika armature struje (11.2)
v_{iuk} – k-tog harmonika struje uzbudnog namota (11.5, 11.7)
v_{uk} – k-tog harmonika napona (11.1)
$v_{\mu k}$ – k-tog harmonika struje magnetiziranja (11.1)
$v_{\Phi k}$ – k-tog harmonika magnetskog toka (11.1)
$v_{\Phi ku}$ – k-tog harmonika glavnog magnetskog toka (11.2)
v_{15} – specifični gubici u željezu pri magnetskoj indukciji 1,5 (T) (6.5, 6.6)

W — energija
– općenito (4.6)
– magnetska u permanentnom magnetu
W_{Cu} – izgubljena u bakru namota (8.7)
W_m – magnetska (4.6)
W_δ – magnetska u zračnom rasporu (8.1)

w — broj zavoja
– općenito (8.1, 8.4, 11.3)
– armaturnog namota, ukupni (3.6)
– faze (4.1)

w_1 – prvog uzbudnog namota (7.4)
w_1 – primara stroja (10.5, 10.7, 10.8)
w_1, w_{1A} – uzbude amplidina (8.4)
w_1, w_{1K} – uzbude kaskade (8.4)
w_2 – drugog uzbudnog namota (7.4)
w_2 – sekundara stroja (10.7, 10.8)
w_2, w_{2A} – u poprečnom krugu amplidina (8.4)
w_2, w_{2K} – uzbude drugog stupnja kaskade (8.4)
w_3 – izlaznog kruga amplidina (8.4)
w_a – armaturnog namota, efektivni (3.6, 4.1, 8.4, 8.5, 9.2, 10.2, 10.3)
w_a – armaturnog namota, ukupni (4.5, 4.7, 5.6, 6.6, 10.9, 11.7)
w'_a – efektivni armaturnog namota po polu reduciran faktorom namota (8.5)
w_{a1}, w_{a2}, ... – armaturnog namota u različitim okolnostima (6.6)
w_k – kompenzacijskog namota (4.5, 4.7, 8.4)
w_{mag} – namota za magnetiziranje (8.1)
w_{pp} – namota pomoćnog pola (4.5, 4.7, 6.6, 11.4, 11.5, 11.7)
w_{pp1}, w_{pp2}, ... – namota pomoćnog pola u različitim okolnostima (6.6)
w_s – svitka (3.1, 3.6, 4.3, 4.4, 4.5, 4.7, 5.4, 5.6, 6.6, 7.5, 7.6, 8.5, 9.2, 9.8, 10.2, 10.9, 11.4, 11.5, 11.6, 11.7)
w_{ser} – serijskog uzbudnog namota (4.7, 6.6, 7.5, 11.5, 11.7)
w_{ser1}, w_{ser2}, ... – serijskog uzbudnog namota u različitim okolnostima (6.6)
w_u – uzbudnog namota (4.1, 4.7, 6.1, 6.6, 7.2, 7.6, 8.5, 8.7, 10.3, 10.4, 10.9, 11.4, 11.7)
w_{u1}, w_{u2}, ... – uzbudnog namota u različitim okolnostima (6.6)
$w_{u=}$ – uzbude univerzalnog motora pri istosmjernom priključku (10.4)
$w_{u\sim}$ – uzbude univerzalnog motora pri izmjeničnom priključku (10.4)

X — induktivni otpor
– serijskog stroja (10.3, 10.4, 10.7, 10.9)
X_1 – rasipni, primara (10.8)
X_2 – rasipni, sekundara (10.8)
X_a – armaturnog namota (10.4)
X_{ak} – armaturnog kruga za k-ti harmonik (11.1)
X_{ak} – rasipni, namota armature za k-ti harmonik (11.4, 11.5, 11.6, 11.7)
X_e – električkog kruga (11.3)
X_k – ukupni rasipni, asinhronog stroja (10.8)
X_{kk} – rasipni, namota kompenzacije za k-ti harmonik (11.7)
X_{pk} – prigušnice za k-ti harmonik (11.4, 11.5)
X_{pp} – namota pomoćnih polova (10.3)
X_{ppk} – rasipni, namota pomoćnih polova za k-ti harmonik (11.4, 11.5)
X_{ruk} – rasipni, namota uzbude za k-ti harmonik (11.5)
X_t – ukupni, faze transformatora reduciran na sekundar (11.1)
X_{tk} – ukupni, faze transformatora reduciran na sekundar za k-ti harmonik (11.4, 11.5)
$X_{u\sigma}$ – koji odgovara rasipnom magnetskom toku (10.4)
X_μ – koji odgovara glavnom magnetskom toku (10.3, 10.4, 10.7)
X_σ – rasipni (10.3, 10.7)

X_m — induktivni otpor magnetskog kruga (11.3)
x — argument, mjesto (2.1, 2.2, 4.1, 4.3, 4.5, 4.6, 4.7, 5.4, 5.6, 11.3)
x — omjer struje tereta i nazivne struje (6.6)
x_m — oznaka mjesta s maksimalnom magnetskom indukcijom (5.4, 5.6)
x_m — magnetska susceptibilnost (8.1)

y — korak
- namota armature (3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.8, 8.6, 9.4)

y_1 – svitka armaturnog namota (3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.8, 4.4, 4.5, 4.7, 8.6, 9.4)

y'_1 – svitka armaturnog namota, približni (3.2, 3.8)

y_{1N} – svitka armaturnog namota brojen utorom, cijeli dio (4.5, 4.7)

y_2 – spojni korak armaturnog namota (3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.8, 8.6, 9.4)

y_{sp} – spojki za izjednačenje potencijala (3.2, 3.3, 3.8)

Z — prividni kompleksni električki otpor
- općenito (5.4)

Z_2 – sekundara (10.8)

Z_e – električkog kruga (11.3)

Z — valni otpor (11.3)

Z — kompleksni magnetski otpor

Z_{1k} – jezgre i drugog zračnog raspora pomoćnog pola za k-ti harmonik (11.6, 11.7)

Z_{gk} – jezgre glavnog pola za k-ti harmonik (11.4, 11.7)

Z_{jak} – jarma armature za k-ti harmonik (11.4, 11.7)

Z_{jpk} – jezgre pomoćnog pola za k-ti harmonik (11.6, 11.7)

Z_{jsk} – jarma statora za k-ti harmonik (11.3, 11.4, 11.6, 11.7)

Z_m – magnetskog kruga (11.3)

Z_{mk} – dijela željeza magnetskog kruga za k-ti harmonik (11.6)

Z_{ok} – okvira učvršćenja namota pola za k-ti harmonik (11.3)

Z_{pk} – polne papuče glavnog pola za k-ti harmonik (11.6, 11.7)

Z_{pok} – podloge drugog zračnog raspora pomoćnog pola za k-ti harmonik (11.6, 11.7)

Z_{ppjk} – jezgre pomoćnog pola za k-ti harmonik (11.3)

Z_{spk} – rasipnom magnetskom toku pomoćnog pola na papuču glavnog pola za k-ti harmonik (11.6, 11.7)

Z_{umk} – ukupni, magnetskog kruga glavnih polova za k-ti harmonik (11.4, 11.5, 11.7)

Z_{zak} – zubi armature za k-ti harmonik (11.4, 11.7)

$Z_{\delta pjk}$ – drugog zračnog raspora pomoćnog pola za k-ti harmonik (11.6, 11.7)

Z_{uek} — prividni kompleksni električki otpor s učešćem magnetskog otpora za k-ti harmonik (11.4, 11.5, 11.7)

z — broj vodiča namota armature (3.1, 3.6, 4.1, 4.2, 4.3, 4.7, 6.2, 6.5, 6.6, 7.5, 7.6, 8.5, 9.8, 10.2, 10.4, 11.2, 11.4, 11.5, 11.7)

z' — broj vodiča u utoru (4.7, 6.6, 7.6)

α — kut
- općenito (2.1, 2.2, 2.3, 3.2, 3.3, 4.6, 9.5, 10.9)
- bočnih strana lamele kolektora (5.1)
- nagiba držača četkica (5.3)
- pravca samouzbude prema osi apscise (6.4)
- nagiba karakteristike praznog hoda (nezasićeno stanje) (7.2, 7.4)
- električki, osi glavnog i pomoćnog pola kod generatora s rasipnim magnetskim polovima (8.5)
- električki, pomaka četkica iz neutralne zone (10.2, 10.4, 10.5)
- električki, pomaka četkica trofaznog kolektorskog stroja (10.7, 10.8, 10.9)
- palenja ispravljača (prema osnovnom harmoniku mreže) (11.1, 11.4, 11.7)

– fazni pomak struje uzbude i struje armature k-tog harmonika (11.5, 11.6, 11.7)

α' – komplementni kutu pomaka četkica (10.8)

α' – električki, pomak neutralne zone kod generatora s rasipnim polovima (8.5)

α_o – pravca samouzbude prema osi apcise (6.6)

α_1 – karakterističan za gustoću struje na dolaznom dijelu četkice (4.4)

α_2 – karakterističan za gustoću struje na odlaznom dijelu četkice (4.4)

α_2' – karakterističan za gustoću struje na odlaznom dijelu četkice u trenutku svršetka komutacije (4.4)

α_{el} – električki (3.1, 3.2, 3.3, 3.8, 6.6, 9.4)

α_g – geometrijski, pomaka četkica iz neutralne zone (6.6)

α_k – između induciranog napona od magnetskog toka pomoćnih polova svitka u komutaciji i struje armature za k-ti harmonik (11.6, 11.7)

α_{nk} – između nekompenziranog napona svitka u komutaciji i struje armature za k-ti harmonik (11.6, 11.7)

α_{pp} – između magnetskog toka jezgre pomoćnog pola i struje armature za k-ti harmonik (11.6)

α_{sr} – električki, među stranama svitaka (3.3)

α_t – između induciranog napona transformacije svitka u komutaciji i struje armature za k-ti harmonik (11.6, 11.7)

α — prekrivanje glavnog pola (4.1, 4.3, 4.4, 4.7, 5.4, 5.6, 6.5, 8.5, 8.7, 9.1, 9.2, 9.8, 11.3)

α — koeficijent povećanja specifičnog električkog otpora vodiča ovisan o temperaturi (8.7)

α_{Cu}— temperaturni koeficijent za bakar namota (6.6)

α_g — geometrijsko prekrivanje glavnog pola (5.6)

α_k — koeficijent efikasnosti hlađenja kolektora (5.4, 5.6)

α_p — prekrivanje glavnog pola (9.5, 11.6)

β — kut

– općenito (9.5, 10.9)

– između geometrijske i električke neutralne zone (4.3)

– tangente u točki karakteristike praznog hoda, zasićeno stanje (7.2)

– pravca samouzbude prema osi apcise (7.4)

– između napona rotacije i struje armature za k-ti harmonik (11.6)

β_{el} – električki, pomaka četkica iz neutralne zone (4.7)

β – prekrivanje četkica, električko (4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 5.4)

β_g – prekrivanje četkica, geometrijsko (4.4)

β_{gub} – faktor konfiguracije magnetskog polja pri određivanju gubitaka zbog pulsacije (6.5)

β_i – omjer struje uzbudnim namotom i armaturom – istosmjerna komponenta (11.5, 11.7)

β_k – omjer struje uzbudnim namotom i armaturom k-tog harmonika (11.5, 11.7)

Γ – gustoća struje

– općenito (10.4)

Γ_1 – na dolaznom dijelu četkice (4.4)

Γ_2 – na odlaznom dijelu četkice (4.4)

Γ_a – u armaturnom namotu (6.5, 6.6)

$\Gamma_{a1, a2, \ldots}$ – u armaturnom namotu u različitim okolnostima (6.6)

$\Gamma_č$ – četkica (4.7, 5.2, 5.6)

$\Gamma_{s1, s2, \ldots}$ – u serijskom namotu u različitim okolnostima (6.6)

Γ_u – u uzbudnom namotu (6.6)
$\Gamma_{u1, u2, \ldots}$ – u uzbudnom namotu u različitim okolnostima (6.6)
γ — složeni koeficijent proporcionalnosti među veličinama
– općenito (7.5)
γ_{gp} – glavnog pola (7.5)
γ_{pp} – pomoćnog pola (7.5)
γ_{Cu} — specifična masa bakra (8.7)
δ — zračni raspor
– glavnog pola (na simetrali) (2.3, 4.5, 5.4, 5.6, 6.5, 6.6, 8.1)
– u magnetskom krugu (8.1, 8.2)
δ' – istmusa (6.2)
δ' – glavnog pola u promjenjenim uvjetima (6.6)
δ' – fiktivno prošireni (8.1)
δ_{ek} – ekvivalentni, glavnog pola (5.4, 5.6, 11.3)
δ_j – između jezgre pomoćnog pola i jarma statora (4.5, 4.7, 7.5, 11.6, 11.7)
δ_k – glavnog pola na kraju polne papuče (5.4, 5.6)
δ_m – glavnog pola na mjestu maksimalne magnetske indukcije (5.4, 5.6)
δ_{pp} – pomoćnog pola (na simetrali kod armature) (4.4, 4.5, 4.7, 7.5, 11.6, 11.7)
δ'_{pp} – ekvivalentni, pomoćnog pola (4.5, 4.7)
δ_{ppx} – pomoćnog pola na mjestu x (4.5)
δ_x – glavnog pola na mjestu x (5.4, 5.6)
δ_g — razmak svitka u glavi namota armature (4.5, 4.7)
ε — skraćenje koraka
– svitka namota armature (4.5, 4.7)
ε_k – kraćeg svitka namota armature (4.5, 4.7)
ε_l – dužeg svitka namota armature (4.5, 4.7)
ε — promjena napona po obodu kolektora
ε_{max} – maksimalna vrijednost (5.4, 5.6, 11.6)
ε_x – na mjestu x (5.6)
η — korisnost, stupanj korisnosti
– općenito (4.7, 6.5, 6.6, 8.1, 10.4)
η' – u užem smislu (6.6)
η_{max} – maksimalna vrijednost (6.6)
Θ — protjecanje
– općenito (4.1, 4.3, 6.1, 8.1, 8.4)
– ukupno, uzbuda (6.4, 7.2, 7.4, 7.6, 8.5, 11.3)
$\Delta\Theta$ – razlika postojećeg i potrebnog ukupnog protjecanja (6.4, 6.6)
$\Delta\Theta$ – prirast (7.2, 7.6)
Θ_o – ukupno, u praznom hodu stroja (4.3, 4.7, 6.4, 6.6)
$\Theta_{01, 02, \ldots}$ – porednog uzbudnog namota u različitim okolnostima (6.6)
Θ_{om} – uzbude pri minimalnom magnetskom polju (5.4, 5.6)
Θ_{oz} – izazvano pulsacijama (smještaj vodiča u utore) 5.4, 5.6)
Θ_1 – prvog uzbudnog namota (7.4)
Θ_1 – uzbudnog namota ulaznog stupnja amplidina (8.4)
Θ_1 – primara trofaznog kolektorskog stroja (10.7)
Θ_{1kon} – prvog uzbudnog namota na kraju prelaznog stanja (7.4)
Θ_2 – drugog uzbudnog namota (7.4)
Θ_2 – sekundara trofaznog kolektorskog stroja (10.7)
Θ_3 – reakcije armature izlaznog kruga amplidina (8.4)
Θ_a – armaturnog namota (4.3, 4.4, 4.5, 4.7, 5.4, 5.6, 6.6, 7.5, 11.6)
Θ_{ak} – armaturnog namota, k-ti harmonik (11.6, 11.7)

Θ_k – kompenzacijskog namota (4.3, 8.4)
Θ_{ko} – kompenzacijskog namota (4.4, 4.5, 4.7, 5.4, 5.6, 7.5)
Θ_{kok} – kompenzacijskog namota, k-ti harmonik (11.6, 11.7)
Θ_{mz} – permanentnih magneta u zasićenju prilikom stabilizacije (8.7)
Θ_{nez} – u nezasićenoj (gornjoj) točki (7.2)
Θ_{pp} – namota pomoćnih polova (4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 7.5)
Θ_{ppk} – namota pomoćnih polova, k-ti harmonik (11.6, 11.7)
Θ_r – rezultantno (4.3, 4.7)
Θ_r – u radnoj točki (7.2)
Θ_{rez} – rezultantno (8.4)
Θ_s – serijskog namota (4.7)
$\Theta_{s1, s2, ...}$ – serijskog namota u različitim okolnostima (6.6)
Θ_{st} – od struje za stabiliziranje permanentnog magneta (8.1)
Θ_u – uzbudnog namota (7.5)
$\Theta_{u1, u2, ...}$ – uzbudnog namota u različitim okolnostima (4.7)
Θ_{uk} – uzbudnog namota, k-ti harmonik (11.4, 11.5, 11.7)
Θ_v – vrtložnih struja magnetskog kruga, općenito (11.3)
Θ_v – vrtložnih struja magnetskog kruga glavnih polova (7.5)
Θ_{vpp} – vrtložnih struja magnetskog kruga pomoćnih polova (7.5)
Θ_{vppk} – vrtložnih struja magnetskog kruga pomoćnih polova, k-ti harmonik (11.6)
$\Theta_{\delta k}$ – ostatno (magnetski napon) za zračni raspor glavnih polova, k-ti harmonik (11.3)
$\Theta_{\delta pp}$ – dio koji stvara magnetski tok u zračnom rasporu pomoćnih polova (4.6)
Θ_μ – rezultantno magnetskog kruga, općenito (11.3)
Θ_μ – rezultantno magnetskog kruga glavnih polova (7.5)
$\Theta_{\mu ak}$ – armaturnog namota, magnetiziranje k-ti harmonik (11.6)
$\Theta_{\mu ppk}$ – namota pomoćnih polova, magnetiziranje k-ti harmonik (11.6)
$\Theta_{\mu uk}$ – uzbudnog namota, magnetiziranje k-ti harmonik (11.6)

Θ_k — zagrijanje kolektora (5.2, 5.4, 5.6)

ϑ — temperatura
– općenito (4.5, 4.7, 6.6, 8.7, 11.6)
ϑ_k – kolektora (5.2)

ϑ' — relativni pretičak protjecanja namota pomoćnih polova i kompenzacije nad protjecanjem namota armature (4.7, 6.6)

ϑ'' — relativni višak protjecanja namota pomoćnih polova i kompenzacije nad korigiranim protjecanjem namota armature (4.5, 4.7)

$\varkappa$ — specifična električka vodljivost
– materijala vodiča (3.6, 4.7, 6.6, 8.7)
– magnetskog materijala (11.3, 11.6)
$\varkappa_{20}$ – materijala vodiča pri 20 °C (6.6)
$\varkappa_{hl}$ – materijala vodiča u hladnom stanju (4.5, 4.7, 6.5, 6.6, 11.6)
$\varkappa_t$ – materijala vodiča u toplom stanju (6.6)

$\varkappa$ — parcijalni koeficijent ulančenja rasipnih magnetskih tokova
$\varkappa_o$ – pri proračunu komutacije (4.5, 4.7)
$\varkappa_g$ – pri proračunu komutacije (4.5, 4.7)
$\varkappa_m$ – pri proračunu komutacije (4.5, 4.7)
$\varkappa'_m$ – pri proračunu komutacije (4.5, 4.7)
$\varkappa_w$ – pri proračunu komutacije (4.5, 4.7)

A — magnetska vodljiva vrijednost
A_d – u uzdužnoj osi stroja (8.5)

Λ_{gl} – magnetskog kruga za glavni magnetski tok (8.1)
Λ_{pp} – magnetskog kruga za rasipni magnetski tok pomoćnih polova (4.5, 4.7)
Λ_s – magnetskog kruga za rasipni magnetski tok glavnih polova (8.1)
Λ_q – u poprečnoj osi stroja (8.5)

λ — jedinična magnetska vodljiva vrijednost rasipanja
– bočna jezgra pomoćnog pola (11.6)
λ_d – donjeg sloja utora armature (4.5, 4.7)
λ_g – gornjeg sloja utora armature (4.5, 4.7)
λ_{gnk} – glave namota armature (4.5, 4.7)
λ_{gz} – glave zuba armature (4.5, 4.7)
λ_k – vrha utora armature (4.5, 4.7)
λ_m – međuinduktivnog djelovanja slojeva utora armature (4.5, 4.7)
λ_u – utora armature, srednja vrijednost (4.5, 4.7)

μ — magnetska permeabilnost
– apsolutna (8.1, 11.3)
μ_o – vakuma (zraka) (4.4, 4.5, 4.7, 5.4, 7.5, 8.1, 11.3, 11.6, 11.7)
μ_p – pulsacijska, apsolutna (11.3, 11.6)
μ_r – relativna (8.1)

μ — koeficijent trenja (5.2, 5.6, 6.5, 6.6)
ν — red harmonika općenito (11.1)
ν — stupanj kompenzacije amplidina (8.4)
ξ — koeficijent proporcionalnosti samoinduktiviteta svitka u komutaciji (4.4, 4.5, 4.7, 9.2, 9.8)
ξ' — brojna visina vodiča (4.5, 4.7, 6.5, 6.6, 11.6)

ρ — specifični električki otpor
– općenito (7.5, 9.7)
ρ_1 – materijala jezgre pola (7.5)
ρ_2 – materijala jarma statora (7.5)

ρ — koeficijent ulančenja rasipnog magnetskog toka u komutaciji (4.5, 4.7)

σ — broj, koeficijent ili omjer
– rasipnog i ulančenog induktivnog otpora (10.7, 10.9)
– magnetskog toka u permanentnom magnetu i glavnog magnetskog toka (8.1)
σ_g – magnetskog rasipanja glavnog pola (7.5, 7.6)
σ_{pp} – magnetskog rasipanja pomoćnog pola (4.5, 4.7, 7.5)
σ_s – fitkivni koeficijent povećanja magnetskog otpora glavnog pola (11.4, 11.7)

σ_g — omjer širine komutacijske zone jednog utora i polnog koraka stroja (6.5, 6.6)

τ — korak
τ_k – lamele kolektora (4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 5.4, 5.6, 6.5, 6.6)
τ'_k – lamele kolektora reduciran na promjer armature (4.5, 4.7)
τ_{ko} – utora kompenzacije (5.4, 5.6)
τ_p – polni (2.2, 4.1, 4.2, 4.3, 4.5, 4.7, 5.4, 5.6, 6.5, 6.6, 9.2, 9.8, 11.3, 11.6, 11.7)
τ_u – utora (2.2, 6.5)
τ_{u2} – utora armature (2.3, 4.7, 9.5)

Φ — magnetski tok
– općenito (2.1, 7.5, 8.1, 8.4, 10.2, 11.3)
– ukupni (7.2, 10.8)

$\Delta\Phi$ – prirast ili gubitak (7.2)
Φ' – zbog reakcije armature poprečne struje amplidina (metadina) (8.3, 8.4)
Φ_0 – pola u statičkom stanju (7.5)
Φ_1 – primarni amplidina (metadina) (8.3, 8.4, 8.7)
Φ_2 – poprečni amplidina (metadina) (8.3, 8.4, 8.7)
Φ_{ak} – poprečni od protjecanja namota armature, k-ti harmonik (11.6)
Φ_d – rezultantni uzdužni metadina (8.5)
Φ'_d – uzdužni metadina stvoren uzbudom (8.5)
Φ''_d – uzdužni (suprotni) metadina izazvan protjecanjem namota armature poprečnom strujom (8.5)
Φ_{gl} – glavni stroja (2.1, 2.2, 4.1, 4.2, 4.3, 4.7, 6.1, 6.2, 6.6, 7.1, 7.2, 7.3, 7.5, 7.6, 8.1, 8.2, 8.7, 9.2, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 10.8, 10.9, 11.2)
Φ_{glo} – glavni u praznom hodu (6.6, 8.1)
Φ_{gl1}, Φ_{gl2}, ... – glavni u različitim okolnostima (4.7, 6.6)
Φ_{gli} – glavni, srednja vrijednost pri valovitom napajanju (11.4)
Φ_{glk} – glavni, k-ti harmonik (11.4, 11.5, 11.6, 11.7)
Φ_{gls} – glavni u statičkom stanju stroja (7.5)
$\Phi_{gl=}$ – glavni pri istosmjernom priključku stroja (10.4, 10.9, 11.2)
$\Phi_{gl\sim}$ – glavni pri izmjeničnom priključku stroja (10.4, 10.9)
Φ_i – glavni, srednja ispravljena vrijednost (11.1)
Φ_{jsk} – u jarmu statora, k-ti harmonik (11.6)
Φ_k – općenito, k-ti harmonik (11.1, 11.6)
Φ_k – kompenzacijskog namota amplidina (metadina) (8.3, 8.4)
Φ_m – u permanentnim magnetima (8.1)
Φ_p – u jezgri glavnog pola (4.7, 7.6)
$\Delta\Phi_p$ – prirast u jezgri glavnog pola (7.6)
Φ_{pjk} – dio rasipnog glavnog pola, k-ti harmonik (11.6)
Φ_{ppk} – u jezgri pomoćnog pola, k-ti harmonik (11.4, 11.5, 11.6, 11.7)
Φ_q – poprečni metadina (8.5)
Φ_{rk} – općenito rasipni namota, k-ti harmonik
Φ_s – rasipni (2.1, 4.1, 4.4, 4.7, 7.2, 7.6, 8.1)
Φ_{sk} – rasipni glavnih polova, k-ti harmonik (11.4, 11.6)
Φ_{spk} – dio rasipnog glavnog pola, k-ti harmonik (11.6)
Φ_{spp} – rasipni pomoćnih polova (4.5)
$\Phi_{\delta pp}$ – u zračnom rasporu pomoćnog pola (4.5, 7.5)
$\Phi_{\delta pp}$ – u zračnom rasporu pomoćnog pola pri valovitom napajanju (11.6)
$\Phi_{\delta ppi}$ – u zračnom rasporu pomoćnog pola u statičkom stanju ovisan o promjenjivoj struji (7.5)
$\Phi_{\delta ppk}$ – u zračnom rasporu pomoćnog pola, k-ti harmonik (11.6, 11.7)
$\Phi_=$ – istosmjerni (vremenski nepromjenjiv) (10.6)
$\Phi_\sim$ – izmjenični (vremenski promjenjiv) (10.6)

φ — koeficijent, broj
– prigušenja ovisan o brojnoj visini vodiča ξ' (4.5, 4.7)
φ' – prigušenja ovisan o brojnoj visini vodiča ξ' (11.6)
φ_p – povećanja protjecanja uzbudnog namota (4.7)

φ — kut faznog pomaka, argument
– napona i struje (10.3, 10.4, 10.8, 10.9)
– struje armature i glavnog magnetskog toka za k-ti harmonik (11.2)
– kompleksnog električkog otpora (11.3)

– koeficijenta magnetskog napona polne papuče glavnog pola k-tog harmonika (11.6)

φ_1 – napona i struje primara (10.8)

φ_2 – napona i struje sekundara (10.8)

φ_a – napona i armaturne struje za k-ti harmonik (11.4, 11.5, 11.7)

φ_g – napona i uzbudne struje za k-ti harmonik (11.4, 11.7)

φ_ν – ν-tog harmonika

ψ — kut faznog pomaka, argument

– struje armature i glavnog magnetskog toka (10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.7, 10.9)

– kompleksnog magnetskog otpora (11.3, 11.7)

– koeficijenta povećanja magnetskog otpora glavnog pola (11.4)

ψ_a – protjecanja namota armature (magnetiziranje) i struje armature za k-ti harmonik (11.6)

ψ_g – glavnog magnetskog toka i struje uzbudnog namota za k-ti harmonik (11.4, 11.5, 11.6, 11.7)

ψ_k – koeficijenta povećanja magnetskog otpora (11.3, 11.6, 11.7)

ψ_{mk} – magnetskog otpora željeza (11.6)

ψ_{pp} – magnetskog toka u jezgri pomoćnog pola i struje namota pomoćnog pola za k-ti harmonik (11.4, 11.5, 11.6, 11.7)

ψ_μ – magnetskog pulsacijskog permeabiliteta (11.3)

ψ — koeficijent, broj

– prigušenja ovisan o brojnoj visini vodiča ξ' (4.5, 4.7)

ψ' – prigušenja ovisan o brojnoj visini vodiča ξ' (11.6)

ω — kutna brzina

– općenito (4.1, 4.6, 6.5, 7.3, 10.2, 10.3, 10.4, 10.5, 10.8)

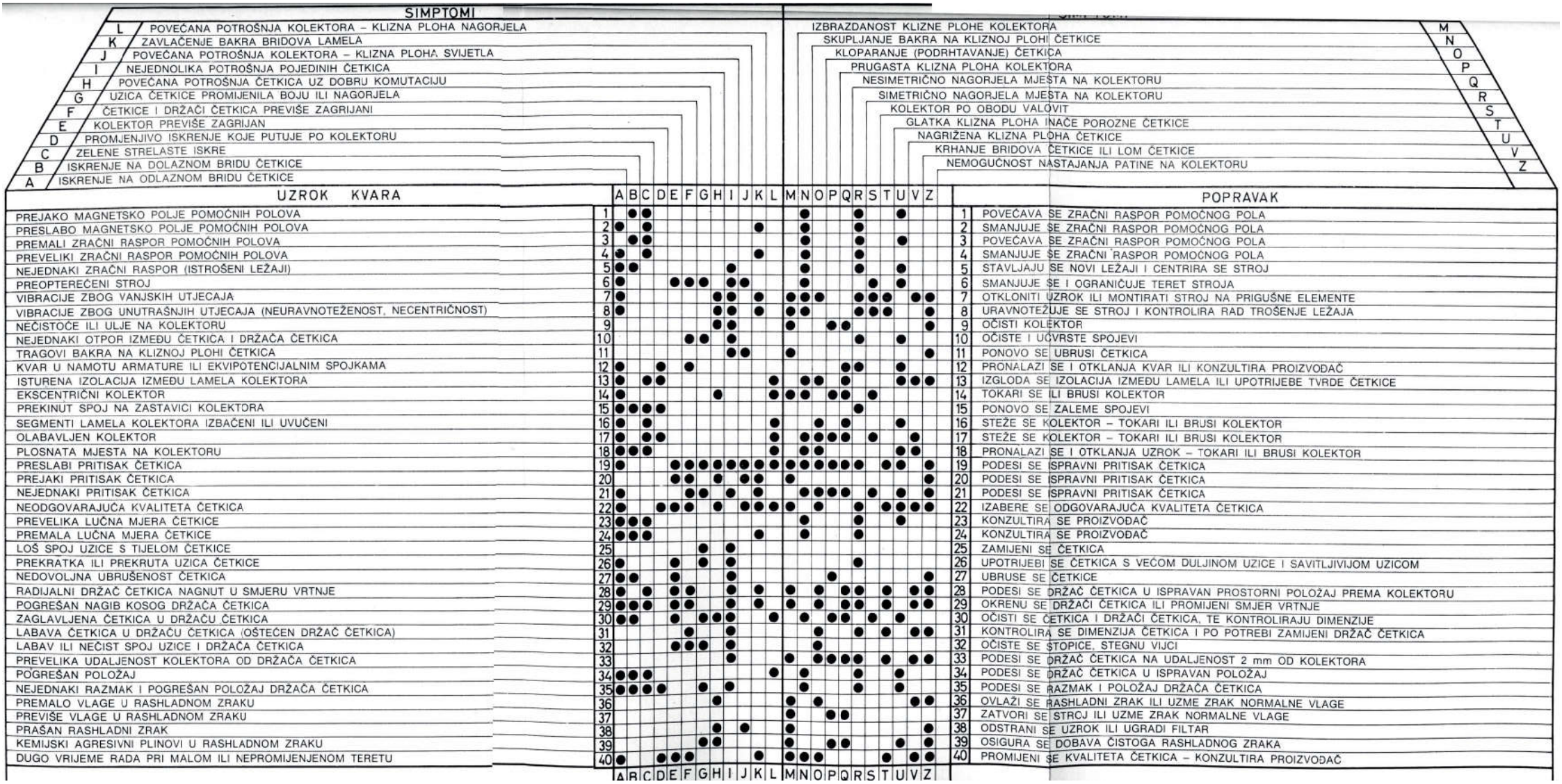
ω_s – sinhrona (10.8)

ω — kružna frekvencija električka ($2\pi f$) (10.2, 10.3, 11.2, 11.3)

ω_k – k-tog harmonika (11.3, 11.4, 11.5, 11.6, 11.7)

ω_m – napona mreže (11.1)

ω_ν – ν-tog harmonika (11.1)



UZROK KVARA		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	Z		POPRAVAK
PREJAKO MAGNETSKO POLJE POMOĆNIH POLOVA	1		●	●											●			●				●			1	POVEĆAVA SE ZRAČNI RASPOR POMOĆNOG POLA
PRESLABO MAGNETSKO POLJE POMOĆNIH POLOVA	2	●		●								●			●			●							2	SMANJUJE SE ZRAČNI RASPOR POMOĆNOG POLA
PREMALI ZRAČNI RASPOR POMOĆNIH POLOVA	3		●	●											●			●				●			3	POVEĆAVA SE ZRAČNI RASPOR POMOĆNOG POLA
PREVELIKI ZRAČNI RASPOR POMOĆNIH POLOVA	4	●		●								●			●			●							4	SMANJUJE SE ZRAČNI RASPOR POMOĆNOG POLA
NEJEDNAKI ZRAČNI RASPOR (ISTROŠENI LEŽAJI)	5	●	●							●					●			●				●			5	STAVLJAJU SE NOVI LEŽAJI I CENTRIRA SE STROJ
PREOPTEREĆENI STROJ	6	●				●	●	●		●	●				●					●		●			6	SMANJUJE SE I OGRANIČUJE TERET STROJA
VIBRACIJE ZBOG VANJSKIH UTJECAJA	7	●							●	●		●		●	●	●			●	●	●		●	●	7	OTKLONITI UZROK ILI MONTIRATI STROJ NA PRIGUŠNE ELEMENTE
VIBRACIJE ZBOG UNUTRAŠNJIH UTJECAJA (NEURAVNOTEŽENOST, NECENTRIČNOST)	8	●							●	●		●		●	●				●	●	●			●	8	URAVNOTEŽUJE SE STROJ I KONTROLIRA RAD TROŠENJE LEŽAJA
NEČISTOĆE ILI ULJE NA KOLEKTORU	9								●	●				●			●	●						●	9	OČISTI KOLEKTOR
NEJEDNAKI OTPOR IZMEĐU ČETKICA I DRŽAČA ČETKICA	10						●	●		●									●			●			10	OČISTE I UČVRSTE SPOJEVI
TRAGOVI BAKRA NA KLIZNOJ PLOHI ČETKICA	11									●	●			●										●	11	PONOVO SE UBRUSI ČETKICA
KVAR U NAMOTU ARMATURE ILI EKVIPOTENCIJALNIM SPOJKAMA	12	●			●		●											●	●			●			12	PRONALAZI SE I OTKLANJA KVAR ILI KONZULTIRA PROIZVOĐAČ
ISTURENA IZOLACIJA IZMEĐU LAMELA KOLEKTORA	13	●		●	●								●		●	●		●				●	●	●	13	IZGLODA SE IZOLACIJA IZMEĐU LAMELA ILI UPOTRIJEBE TVRDE ČETKICE
EKSCENTRIČNI KOLEKTOR	14	●							●				●	●	●		●	●		●					14	TOKARI SE ILI BRUSI KOLEKTOR
PREKINUT SPOJ NA ZASTAVICI KOLEKTORA	15	●	●	●	●														●						15	PONOVO SE ZALEME SPOJEVI
SEGMENTI LAMELA KOLEKTORA IZBAČENI ILI UVUČENI	16	●		●									●			●		●				●			16	STEŽE SE KOLEKTOR – TOKARI ILI BRUSI KOLEKTOR
OLABAVLJEN KOLEKTOR	17	●		●	●								●		●	●	●	●		●			●		17	STEŽE SE KOLEKTOR – TOKARI ILI BRUSI KOLEKTOR
PLOSNATA MJESTA NA KOLEKTORU	18	●	●	●									●		●	●						●	●		18	PRONALAZI SE I OTKLANJA UZROK – TOKARI ILI BRUSI KOLEKTOR
PRESLABI PRITISAK ČETKICA	19	●				●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●			●	●	●	19	PODESI SE ISPRAVNI PRITISAK ČETKICA
PREJAKI PRITISAK ČETKICA	20					●	●		●		●	●		●										●	20	PODESI SE ISPRAVNI PRITISAK ČETKICA
NEJEDNAKI PRITISAK ČETKICA	21	●					●	●		●		●			●	●	●	●		●		●		●	21	PODESI SE ISPRAVNI PRITISAK ČETKICA
NEODGOVARAJUĆA KVALITETA ČETKICA	22	●				●	●		●		●	●	●	●		●			●		●	●	●	●	22	IZABERE SE ODGOVARAJUĆA KVALITETA ČETKICA
PREVELIKA LUČNA MJERA ČETKICE	23	●	●	●											●				●			●			23	KONZULTIRA SE PROIZVOĐAČ
PREMALA LUČNA MJERA ČETKICE	24	●	●	●								●			●				●						24	KONZULTIRA SE PROIZVOĐAČ
LOŠ SPOJ UZICE S TIJELOM ČETKICE	25							●		●															25	ZAMIJENI SE ČETKICA
PREKRATKA ILI PREKRUTA UZICA ČETKICE	26	●				●			●										●						26	UPOTRIJEBI SE ČETKICA S VEĆOM DULJINOM UZICE I SAVITLJIVIJOM UZICOM
NEDOVOLJNA UBRUŠENOST ČETKICA	27	●	●			●			●								●							●	27	UBRUSE SE ČETKICE
RADIJALNI DRŽAČ ČETKICA NAGNUT U SMJERU VRTNJE	28	●		●		●	●			●		●		●		●		●	●		●		●	●	28	PODESI SE DRŽAČ ČETKICA U ISPRAVAN PROSTORNI POLOŽAJ PREMA KOLEKTORU
POGREŠAN NAGIB KOSOG DRŽAČA ČETKICA	29	●	●	●		●	●			●		●		●		●		●	●		●		●	●	29	OKRENU SE DRŽAČI ČETKICA ILI PROMIJENI SMJER VRTNJE
ZAGLAVLJENA ČETKICA U DRŽAČU ČETKICA	30	●	●			●		●	●	●			●		●		●	●		●		●			30	OČISTI SE ČETKICA I DRŽAČI ČETKICA, TE KONTROLIRAJU DIMENZIJE
LABAVA ČETKICA U DRŽAČU ČETKICA (OŠTEĆEN DRŽAČ ČETKICA)	31						●			●						●			●		●		●	●	31	KONTROLIRA SE DIMENZIJA ČETKICA I PO POTREBI ZAMIJENI DRŽAČ ČETKICA
LABAV ILI NEČIST SPOJ UZICE I DRŽAČA ČETKICA	32					●	●	●		●						●									32	OČISTE SE STOPICE, STEGNU VIJCI
PREVELIKA UDALJENOST KOLEKTORA OD DRŽAČA ČETKICA	33									●				●		●	●	●		●		●	●	●	33	PODESI SE DRŽAČ ČETKICA NA UDALJENOST 2 mm OD KOLEKTORA
POGREŠAN POLOŽAJ	34	●	●	●									●		●				●			●			34	PODESI SE DRŽAČ ČETKICA U ISPRAVAN POLOŽAJ
NEJEDNAKI RAZMAK I POGREŠAN POLOŽAJ DRŽAČA ČETKICA	35	●	●	●	●			●		●					●				●			●			35	PODESI SE RAZMAK I POLOŽAJ DRŽAČA ČETKICA
PREMALO VLAGE U RASHLADNOM ZRAKU	36								●					●		●							●	●	36	OVLAŽI SE RASHLADNI ZRAK ILI UZME ZRAK NORMALNE VLAGE
PREVIŠE VLAGE U RASHLADNOM ZRAKU	37													●			●	●							37	ZATVORI SE STROJ ILI UZME ZRAK NORMALNE VLAGE
PRAŠAN RASHLADNI ZRAK	38								●		●			●										●	38	ODSTRANI SE UZROK ILI UGRADI FILTAR
KEMIJSKI AGRESIVNI PLINOVI U RASHLADNOM ZRAKU	39							●	●					●			●	●				●		●	39	OSIGURA SE DOBAVA ČISTOGA RASHLADNOG ZRAKA
DUGO VRIJEME RADA PRI MALOM ILI NEPROMIJENJENOM TERETU	40	●			●	●	●					●		●	●	●					●		●	●	40	PROMIJENI SE KVALITETA ČETKICA – KONZULTIRA PROIZVOĐAČ
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	Z		

Izdavačka radna organizacija »Školska knjiga«
Zagreb, Masarykova 28

Za izdavača
dr JOSIP MALIĆ

Grafički urednik
MARIJAN GORŠIĆ

Korektor
ANTE TERZIĆ

Tiskanje dovršeno u prosincu 1985. u nakladi od 2000 primjeraka.