

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET - ZAGREB

Dr ing. RADENKO WOLF

ISPITIVANJE
ELEKTRIČNIH STROJEVA
III DIO



ZAGREB, 1964.

Wolf V.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET - ZAGREB

Dr ing. RADENKO WOLF

ISPITIVANJE
ELEKTRIČNIH STROJEVA
III DIO



ZAGREB, 1964.

Odobreno rješenjem Komisije za udžbenike i skripta Sveučilišta u Zagrebu
broj 08-1851/1 od 25. X. 1972.

Cijena za studente Sveučilišta u Zagrebu
N. din. 15,50.-

Tisak: Kućna tiskara Sveučilišta u Zagrebu - Trg Maršala Tita 14
Broj 31||SL

ISPITIVANJE ELEKTRIČKIH STROJEVA

III

4. Ispitivanje asinhronog stroja

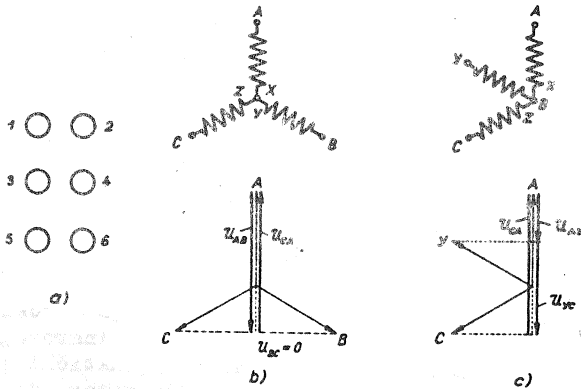
4.1 Ispitivanje u toku proizvodnje

Ma da bi za ispitivanje asinhronog stroja u toku proizvodnje mogli postaviti sličnu shemu kao kod sinhronog stroja (3.1), ipak će se tako detaljnoj kontroli praktički pristupiti jedino kod većih jedinica. Što manji je motor, to veća postaje cijena ispitivanja u toku proizvodnje u usporedbi s cijenom popravka gotovog stroja. Zbog toga se kod manjih strojeva ne provodi npr. ispitivanje paketa, već se samo kontroliraju uzorci sirovina, a na manje više gotovom stroju kontrolira se funkcionalna ispravnost. Popravak ili čak odbacivanje pojedinih primjeraka predstavlja još uvijek manji gubitak od troškova detaljnog ispitivanja u čitavoj seriji.

4.1.1 Kontrola namota vrši se jednostavno mjerenjem otpora pojedinih faza, te usporedbom mjerenih vrijednosti među sobom, i s vrijednosti otpora prema proračunu. Veća odstupanja ukazuju na pogreške bilo pri izvedbi - npr. pogrešni presjek žice, ili pogrešni broj zavoja - bilo pri spajanju. Osim toga vrši se još prije dovršenja stroja naponski pokus na namotu u trajanju od 1 min. Ispitni napon je $2 U_n + 1000 \text{ V}$, ali se kod strojeva ispod 500 V obično primjenjuje veći ispitni napon 2000 V. Svrha je ovog pokusa da otkrije event. grube greške izolacije. Naponske pokuse u punom opsegu (vidi 3.2.3) vršimo nakon dovršenja, i to samo kod većih jedinica.

Kontrola spoja namota vrši se tako, da se krajevi namota X-Y-Z povežu, a na jednu od 3 faze narine se izmjenični napon U . Između početaka A-B, B-C i C-A mora se pojaviti napon $1,5 U$, 0 , $1,5 U$, jer su osi namota B-Y odnosno C-Z pomaknute za 120° odnosno 240° prema osi uzbude A-X. Ako su oznake jedne faze zamijenjene, npr. B i Y, bit će naponi koje mjerimo $0,5 U$, U i $1,5 U$ (4.4-1). Općenito, ako imamo zamijenjenih 6 izvoda iz statora, odredit ćemo prvo mjerenjem otpora parove koji pripadaju istoj fazi, npr. 1-2, 3-4 i 5-6. Zatim ćemo uzбудiti jednu

fazu, i tražiti one vodiče druge i treće faze, koje treba povezati s krajem 2 prve faze, da bi između početaka dobili napone $1,5.U$, $\emptyset$, $1,5.U$. Oznake A,B,C početaka dodjeljujemo na kraju tako, da bi smjer vrtnje rotora ispio



Sl. 4-1

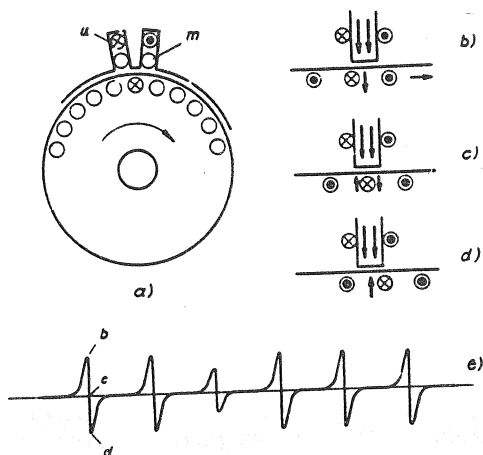
onaj koji se zahtijeva.

4.1.2 Kontrola mehaničkog rada. Svaki motor, čak i kod velike serijske produkcije, treba priključiti na nazivni napon, i pustiti da se vrti u praznom hodu određeno vrijeme. Kroz to vrijeme promatramo ispravnost mehaničkog rada - ne struže li rotor u statoru, jesu li ležajevi u redu, da li su vibracije i šumovi u granicama uobičajenim za tu tipu i slično. Ovaj pokus mehaničkog rada ujedno nadomješta naponski pokus, jer će se grube greške u izolaciji pokazati i pri nazivnom naponu. Pošto ovakovu kontrolu prolazi veliki broj motora, treba omogućiti istovremeni rad većeg broja strojeva, pa su potrebni i odgovarajući uređaji u ispitnoj stanici.

Detaljna ispitivanja, koja uključuju snimanje karakteristika i mjerenje zagrijavanja, vršimo samo na izabranim uzorcima iz svake serije. Kolik će biti broj tih uzoraka, to ovisi o iskustvu proizvođača, ili o dogovoru s naručiteljem. U britanskim standardima npr. taj je broj specificiran kako slijedi:

do 20 kW po	1	motor od svakih započetih	20
iznad 20 do 50 kW po	1	motor od svakih započetih	10
iznad 50 do 100 kW po	1	motor od svakih započetih	5
iznad 100 kW		prema dogovoru.	

4.1.3 Kontrola rotora. Kod kolutnih rotora kontrola se provodi na isti način kao i kod statora. Teže je kod kaveznih rotora, gdje se može dogoditi, da uslijed neispravnosti tlačnog lijevanja dodje do šupljina u vodičima, smanjenog presjeka, ili potpunog prekida pojedinih štapova. Mjerenje otpora nije provedivo bez rezanja kaveza, a isto tako otapanje paketa limova u kiselinu, da bi se pregledao kavez, znači uništenje rotora.



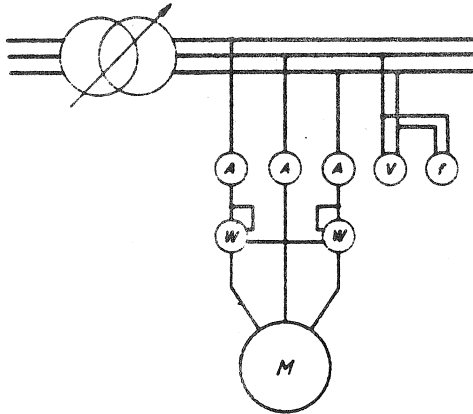
Sl. 4-2

Neispravan rotor često se pokazuje tek u povećanom klizanju i zagrijavanju, a to su mjerenja, koja ne provodimo na svakom motoru. U serijskoj proizvodnji može se provesti relativno jednostavno kontrola tako, da rotor zavrtno u kontrolnom statoru, koji nosi oko jednog zuba uzбудni svitak "u" i mjerni svitak "m" (sl.4-2). Izvode mjernog svitka priključimo na oscilograf, a uzбудni svitak uzбудimo istosmjernom strujom. Istosmjerni tok zuba bit će pri prolazu svakog štapa rotora prvo pojačan, pa onda opet oslabljen, uslijed inducirane struje u štapi i njenog protjecanja. Ovo djelovanje bit će to jače, što je otpor štapa manji. Prema odstupanju amplituda pojedinih zubaca na snimljenom oscilogramu lako je vidjeti, jesu li otpori štapova izjednačeni, odn. koliko ima defektnih štapova.

4.2 Ispitivanje u praznom hodu

Asinhroni motor u praznom hodu razvija samo onoliku mehaničku snagu, kolika je potrebna za pokrivanje gubitaka trenja i ventilacije. Iz mreže uzima međjutim veću snagu, jer treba pokriti gubitke u željezu i gubitke u statorskom namotu zbog struje praznog hoda. Radna komponenta struje iz mreže relativ-

no je malena u usporedbi sa strujom magnetiziranja, koja održava okretno polje u punom iznosu. Zadaća je ispitivanja u



Sl. 4-3

praznom hodu s jedne strane da dobijemo karakteristiku zasićenja, koja daje uvid u prilike magnetskog kruga stroja, a s druge strane da odredimo gubitke u praznom hodu. Zato mjerimo pri različitim naponima struju iz mreže i snagu iz mreže (sl. 4-3).

4.2.1 Prijenosni omjer zanima nas kod kolutnih motora. Ako pri mirnom i otvorenom rotoru narinemo na stator nazivni napon, pojavit će se na kliznim kolutima napon u , koji nazivamo rotorskim naponom. U otvorenom rotorskom krugu nema pada napona, pa je napon u jednak induciranom naponu u sekundarnom namotu E_2 , koji se prema primarnom induciranom naponu odnosi kao produkt broja zavoja w i namotnog faktora ξ sekundara prema onom primara :

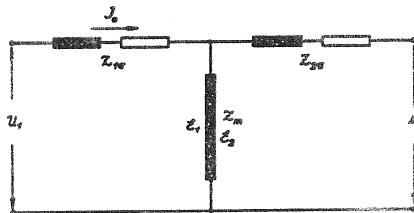
$$E_2 : E_1 = w_2 \xi_2 : w_1 \xi_1 \quad (1)$$

Kako se sa nadomjesne sheme vidi (sl.4-4), inducirani napon primara može se izračunati kao :

$$E_1 = U_1 - I_1 \cdot Z_{1\sigma} \quad (2)$$

Za razliku od transformatora, kod asinhronog motora je struja praznog hoda relativno velika zbog zračnog raspora, a i rasipna reaktancija je dosta velika, tako da je razlika između vrijednosti U_1 i E_1 znatno veća. Pogotovo će ta razlika biti velika kod višepolnih strojeva, kod kojih je zračni raspored velik, a polni korak relativno malen. Zato se kod asinhronog mo-

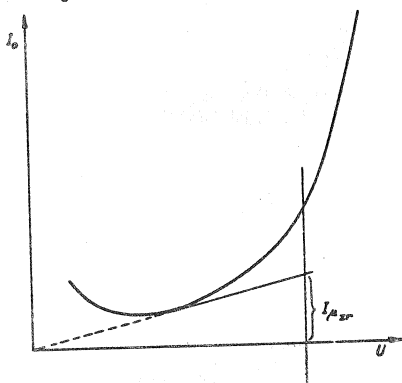
tora ne može uzeti računsku vrijednost prijenosnog omjera, već se uvijek navodi napon rotora u određen mjerenjem. Po defini-



Sl. 4-4

ciji to je uvijek napon između kliznih koluta, bez obzira na spoj rotora. Potrebno ga je poznavati, kako bi mogli izračunati rotorsku struju i , te eventualne otpornike za upuštanje i za regulaciju brzine.

4.2.2 Karakteristika zasićenja predstavlja struju magnetiziranja u ovisnosti o induciranom naponu, što u određenom mjerilu predstavlja uzbuđno protjecanje Θ u ovisnosti o magnetskom toku ϕ . Praktički se nikada ne provodi korekcija, već se u dijagram unosi struja praznog hoda I_0 u ovisnosti o naponu na stezaljkama U (sl.4-5). Kao struja I_0 uzima se srednja vrijednost očitavanja za sve 3 faze. Razlika induciranog napona i napona na stezaljkama ne uzima se u račun, jer čak niti vrijednost induciranog napona ne karakterizira zasićenje na svim mjestima magnetskog kruga. Raspodjela magnetske indukcije po širini polnog koraka u rasporu ovisi među ostalim i o zasićenju u zubima i u jarmovima, pa je i raspodjela indukcije po



Sl. 4-5

presjecima magnetskog kruga, i raspodjela uzbuđnih amperzavoja po njegovim pojedinim odsječcima različita pri različitim naponima. Inducirani napon teško bi doveli u vezi s indukcijom na bilo kojem mjestu magnetskog kruga na osnovu samog mjerenja, a bez rekonstrukcije proračuna, pa je jednako upotrebljivo, a mnogo lakše provedivo, da karakteristiku zasićenja unosimo u dijagram iznad napona stezaljki U na apscisnoj osi, umjesto iznad induciranog napona.

Kod prematanja stroja redovito računamo s jednakim iskorištenjem presjeka utora, i jednakom srednjom dužinom zavoja.

Za jedan te isti tok ϕ bit će i raspodjela indukcije ista, i uzbudno protjecanje Θ isto. Uzmemo li novi broj zavoja $w' = k \cdot w$, bit će i inducirani napon:

$$E'_i = k \cdot E_i \quad (1)$$

a uzbudna struja :

$$I'_i = \frac{\Theta}{w'} = \frac{\Theta}{k \cdot w} = \frac{I_i}{k} \quad (2)$$

Rasipni otpor ovisi o broju zavoja na kvadrat :

$$X'_i = k^2 \cdot X_i \quad (3)$$

a isto tako omski otpor, jer je ukupna dužina žice po fazi k -puta veća, a presjek žice - uz k -puta više vodiča po utoru - k -puta manji, pa mora biti

$$R'_i = k^2 \cdot R_i \quad (4)$$

Vidi se da je :

$$Z'_i = R'_i + jX'_i = k^2(R_i + jX_i) = k^2 \cdot Z_i \quad (5)$$

Pad napona po fazi bit će :

$$J'_i Z'_i = \frac{J_i}{k} \cdot k^2 \cdot Z_i = k \cdot J_i \cdot Z_i \quad (6)$$

Napon na stezaljkama nakon prematanja treba da bude :

$$U'_i = E'_i + J'_i Z'_i = k \cdot E_i + k J_i \cdot Z_i = k \cdot U_i \quad (7)$$

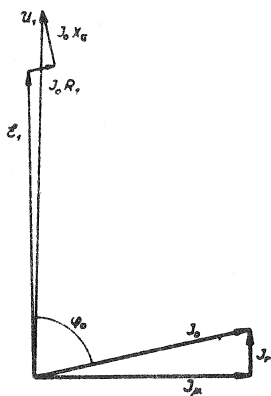
tj. povećava se takodjer u omjeru povećanja broja zavoja, kao i inducirani napon. Za prematanja uz ispunjene gornje uslove daje nam dakle karakteristika 3 naponom U na apscisnoj osi posve dovoljnu informaciju.

Struju praznog hoda I_0 vrlo je lako preračunati u struju magnetiziranja I_μ (sl.4-6), jer istovremeno sa strujom I_0 mjerimo i snagu koju motor uzima iz mreže P_0 . Odatle slijedi :

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_0} \quad (8)$$

$$I_\mu = I_0 \cdot \sin \varphi_0 \quad (9)$$

Razlika izmedju I_0 i I_μ normalno nije velika, pa se obično ta korekcija i ne vrši.



Sl. 4-6

4.2.3 Prazni hod pri sniženom naponu. Kod znatnog sniženja napona u praznom hodu porasti će onaj dio radne komponente struje, koji otpada na gubitke trenja i ventilacije. Ovi su gubici ovisni samo o brzini vrtnje. U praznom hodu brzina tek neznatno odstupa od sinhrona, pa su gubici trenja i ventilacije praktički nepromijenjeni pri različitim naponima U . Radna komponenta struje iz mreže $I_{tr,v}$ koja otpada na pokrivanje tih gubitaka određena je sa :

$$\sqrt{3} \cdot U \cdot I_{tr,v} = P_{tr,v} = \text{const.} \quad (1)$$

Vidi se, da će ta komponenta rasti kad snižavamo napon U . Pošto se gubici trenja i ventilacije pokrivaju iz razvijene mehaničke snage na osovini, mora i u rotoru teći struja proporcionalna statorskoj radnoj komponenti $I_{tr,v}$, tj. obrnuto proporcionalna narinutom naponu U . To znači, da rotorski gubici rastu proporcionalno sa $1/U^2$. Označimo li sa m_2 broj faza rotora, sa R_2 otpor po fazi rotora kod 50 Hz, sa U_{20} napon po fazi mirnog rotora, sa s klizanje, i sa P_{12} snagom koja prelazi u zračnom rasporu od statora na rotor, dobivamo izraz za gubitke u rotoru :

$$P_{cu2} = s \cdot P_{12} = m_2 \cdot R_2 \cdot I_2^2 = m_2 R_2 \left(\frac{s U_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_2)^2}} \right)^2 \quad (2)$$

Razvijena mehanička snaga je jednaka :

$$P_{mech} = P_{tr,v} = (1-s) P_{12} \quad (3)$$

pa slijedi :

$$\frac{s}{1-s} P_{tr,v} = m_2 R_2 \frac{s^2 U_{20}^2}{R_2^2 + s^2 X_2^2} \quad (4)$$

Član $s^2 X_2^2$ može se zanemariti u usporedbi sa R_2^2 , jer je s mala veličina, a isto tako može se uzeti $1-s \approx 1$, pa dobivamo za klizanje s izraz :

$$s \approx P_{tr,v} \frac{R_2}{m_2} \frac{1}{U_{20}^2} \quad (5)$$

Pri snižavanju narinutog napona U_{20} - što znači i snižavanje rotorskog napona U_{20} - rasti će dakle klizanje u istom omjeru kao i rotorski gubici, tj. obrnuto proporcionalno sa U_{20}^2 . Uslijed sve manje struje magnetiziranja, a sve veće radne komponente, faktor snage $\cos \varphi_0$, koji je u praznom hodu vrlo nizak, kod sasvim niskih napona (negdje 25-30 % nazivnog napona) počinje rasti sa snižavanjem napona (sl.4-7a). Zanimljivo je, da faktor snage u praznom hodu $\cos \varphi_0$ pri povećanju napona iznad neke granice također raste, ovaj puta ne zbog povećanja radne struje u rotoru, već zbog zasićenja u magnetskom krugu. Ako se poslužimo nadomjesnom shemom (sl.4-7b), inducirani napon u stroju E , predodjen je padom napona struje I_0 na reak-

tanciji X_m :

$$X_m = \frac{E_1}{I_0} \quad (6)$$

pri čemu su zanemareni gubici u željezu predstavljeni otporom R_{Fe} . Stvarni odnos napona E_1 i struje $I_\mu \approx I_0$ predstavljen je karakteristikom na sl. 4-7c. Vidi se, da kut α , čiji tangens u određenom mjerilu predstavlja reaktanciju X_m , naglo pada, kada raste u zasićenom području. Pošto je u praznom hodu otpor koji nadomješta opterećenje:

$$R_2 \cdot \frac{1-s}{s} \approx \infty \quad (7)$$

vrijedit će za faznu struju iz mreže :

$$I_0 = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_m)^2}} \quad (8)$$

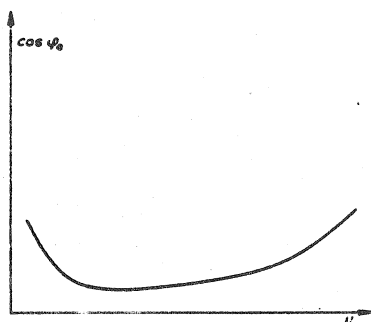
$$\lg \varphi_0 = \frac{X_{1\sigma} + X_m}{R_1} \quad (9)$$

Kut φ_0 se dakle smanjuje sa smanjivanjem X_m , a to znači da $\cos \varphi_0$ raste.

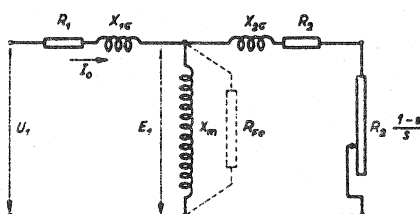
Struja praznog hoda I_0 raste naglo u zasićenom području. Kod snižavanja napona dolazi do jakog opadanja struje magnetiziranja, i do porasta radne komponente, tako da ukupna struja :

$$I_0 = \sqrt{I_\mu^2 + I_r^2} \quad (10)$$

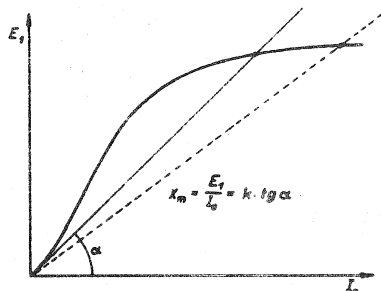
počinje čak rasti (sl.4-5). Zbog toga i ne snimamo karakteristiku zasićenja ispod kojih 30 % nazivnog napona, jer mjerena struja više niti približno ne predstavlja struju magnetiziranja, a pogonsko



a)



b)



c)

Sl. 4-7

stanje, zbog povećanog klizanja i rotorskih gubitaka, više ne predstavlja prazni hod.

Ako želimo snimiti karakteristiku zasićenja prema dolje sve do napona $U = 0$ (crtkani dio na sl.4-5), izvodimo tzv. "idealni

pokus praznog hoda", Motor vrtimo izvana sinhronom brzinom uz pomoć sinhronog motora na istoj osovini, koji pri tome pokriva gubitke trenja i ventilacije. U rotoru ne mogu nastati gubici pri klizanju $s = 0$. Ako sada mjerimo struju i snagu, što ih uzima stator ispitivanog motora, možemo odrediti I_0 odn. I_{μ} sve do napona $U = 0$.

4.2.4 Kontrola zračnog raspora. Određivanje čitave karakteristike zasićenja može biti od interesa za određivanje stvarne veličine zračnog raspora σ . Tangenta na tu karakteristiku u ishodištu odsijeca dio struje magnetiziranja, koji otpada na zračni raspor. Kod malih zasićenja može se, naime, potpuno zanemariti amperzavoje za magnetiziranje željeza prema onima za zračni raspor. Pošto amperzavoji za zračni raspor rastu linearno s indukcijom, vrijedit će tangenta kao karakteristika magnetiziranja raspora, dok preostatak do krivulje $I_{\mu} = f(U)$ otpada na željezo. Direktna računaska kontrola zračnog raspora moguće je samo ako raspoložemo proračunom stroja, ili ga rekonstruiramo. Vrijedi naime :

$$I_{\mu zr} = \frac{p \cdot \theta_{zr}}{0,9 \cdot w \cdot \xi \cdot m} \quad (A) \quad (1)$$

$$\theta_{zr} = 1,6 \cdot k_c \cdot \sigma \cdot B_{zr} \cdot 10^8 \quad (A) \quad (2)$$

$$B_{zr} = \frac{\phi}{\alpha_i \cdot \tilde{w}_p \cdot l_i} \quad \left(\frac{Vs}{m^2} \right) \quad (3)$$

$$\phi = \frac{E_i}{1,44 \cdot f \cdot w \cdot \xi} \quad (Vs) \quad (4)$$

gdje je

$I_{\mu zr}$ = dio struje magnetiziranja koji otpada na zračni raspor

p = broj pari polova

θ_{zr} = protjecanje koje otpada na zračni raspor po paru polova

w = broj zavoja spojenih u seriju po fazi

m = broj faza

ξ = namotni faktor

k_c = Carterov faktor

B_{zr} = maksimalna vrijednost indukcije u zračnom rasporu

ϕ = tok po polu

$\tilde{w}_p = \frac{p\pi}{2p}$ = polni korak mjeren u rasporu

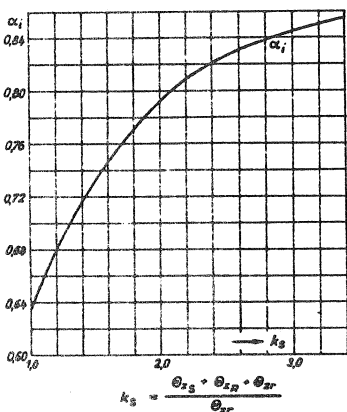
α_i = omjer srednje i maksimalne vrijednosti indukcije u rasporu prikazan dijagramom u ovisnosti o faktoru zasićenja k_s (sl. 4-8)

l_1 = idealna dužina paketa u rasporu
 E_1 = inducirani napon po fazi
 f = frekvencija.

Iz gornjih izraza može se izračunati stvarna širina zračnog raspora

$$\sigma = 25 \cdot \frac{m \cdot f \cdot \alpha_1 \cdot T_p \cdot l_1}{k_c \cdot p} \cdot \frac{w^2 \cdot \xi^2}{10^8} \cdot \frac{I_{\mu sr}}{E_1} \quad (5)$$

Pri tome očitamo $I_{\mu sr}$ s karakteristike zasićenja (sl. 4-5) za nominalni napon U_1 , broj faza m , broj pari polova p , i dimenzije T_p i l_1 možemo lako odrediti no preostale veličine možemo izvesti jedino iz projekta : inducirani napon E_1 , Carterov faktor k_c , broj zavoja w , namotni faktor ξ , a napose faktor α_1 , koji možemo očitati s dijagrama tek ako je poznat faktor zasićenja k_s , tj. omjer protjecanja za zube statora i zračni raspor, naprama protjecanju za sam zračni raspor. Ovakova kontrola stvarnog zračnog raspora dolazi u obzir tamo, gdje nije provedivo direktno mjerenje, bilo što raspor nije pristupačan kod zatvorenog stroja, bilo što je vrlo nejednolik, pa treba odrediti srednju vrijednost. Mnogo češća je primjena ove metode u serijskoj proizvodnji, kad treba ustanoviti odstupanja veličine raspora pojedinih motora među sobom. Tu jednostavno vrijedi:



Sl. 4-8

$$I_{\mu sr1} : I_{\mu sr2} : I_{\mu sr3} : \dots = \sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3 : \dots \quad (6)$$

4.2.5 Utjecaj frekvencije. Pri snimanju karakteristike zasićenja pretpostavlja se, da se frekvencija kroz čitavo vrijeme mjerenja održava na nazivnoj vrijednosti. Ako se ispitni napon uzima direktno iz mreže, npr. preko zakretnog transformatora, ili iz agregata tjeranog sinhronim motorom, onda će frekvencija ispitnog napona biti tačno jednaka frekvenciji mreže, i ne možemo je nikako korigirati, ako se slučajno dogodi, da frekvencija mreže varira. U tom slučaju potrebno je bilježiti uz svako mjerenje i očitavanu frekvenciju, i na osnovu toga korigirati rezultate mjerenja. O struji magnetiziranja ovisi u stvari magnetski tok u stroju, a tok i napon vezani su relacijom :

$$E_1 = 4,44 \cdot \phi \cdot f \cdot w \cdot \xi \quad (7)$$

tj. uz istu struju magnetiziranja bit će tok jednak, a napon će biti direktno proporcionalan frekvenciji. Inducirani naponi se dakle odnose :

$$E_1' : E_1 = f' : f \quad (2)$$

odnosno nazivnoj frekvenciji f odgovara inducirani napon :

$$E_1 = E_1' \frac{f}{f'} \quad (3)$$

pri istoj uzbudnoj struji, koja je dala napon E_1' uz frekvenciju f' . Napon na stezaljkama U_1 razlikuje se od induciranog napona E_1 za iznos $\Delta U_1 = I_{10} \cdot X_{10}$. Uz jednu te istu struju taj će se iznos promijeniti proporcionalno sa frekvencijom, jer je $X_{10} = 2 \pi f \cdot L_{10}$, pa vrijedi :

$$U_1 = E_1 + \Delta U_1 \quad (4)$$

$$U_1' = E_1' + \Delta U_1' \quad (5)$$

Ako označimo omjer:

$$\frac{E_1}{E_1'} = \frac{f}{f'} = K \quad (6)$$

onda je također:

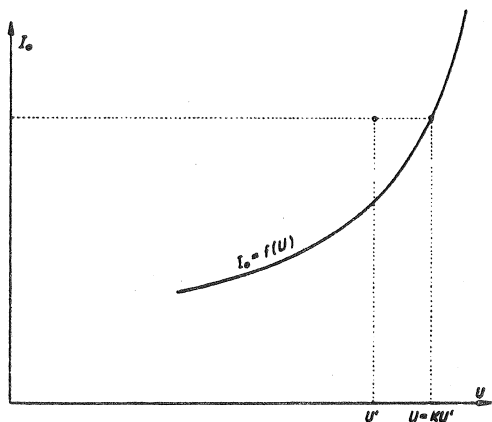
$$\frac{\Delta U_1}{\Delta U_1'} = K \quad (7)$$

i iz gornjih jednažbi:

$$\frac{U_1}{U_1'} = \frac{K \cdot E_1' + K \cdot \Delta U_1'}{E_1' + \Delta U_1'} \quad (8)$$

Odatle slijedi napokon :

$$\frac{U_1}{U_1'} = \frac{E_1}{E_1'} = \frac{f}{f'} = K \quad (9)$$



tj. naponi na stezaljkama pri različitim frekvencijama odnosit će se jednako kao inducirani naponi. Korekciju zbog odstupanja frekvencije provodimo dakle prema sl. 4-9 jednostavno tako, da

Sl. 4-9

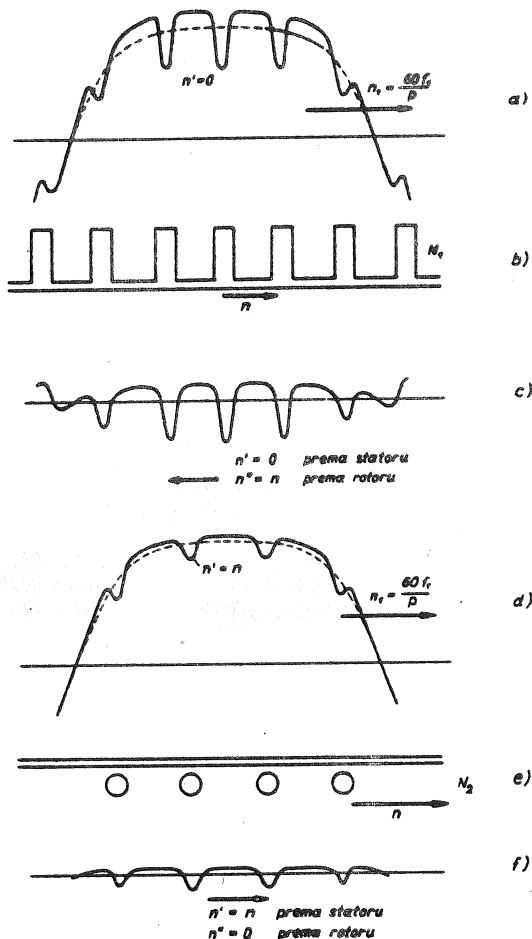
izmjerenu struju I_0 u dijagram unesemo - umjesto iznad mjerene napona U_0 - iznad korigiranog napona $U = K \cdot U'$.

4.2.6 Gubici u praznom hodu. Neopterećen stroj, koji se vrti u praznom hodu, priključen je na napon, te mora održavati magnetski tok, koji rotira sinhronom brzinom. Na svakom pojedinom mjestu u statorskom paketu magnetska indukcija se mijenja frekvencijom mreže. Uslijed toga nastaju gubici u željezu uzrokovani histerezom i vrtložnim strujama, koje mora pokriti mreža. Rotor se vrti praktički brzinom okretnog polja, pa magnetski tok relativno prema limovima rotora praktički miruje. Gubici u željezu rotora mogu se zbog toga u praznom hodu zanemariti. Ostaju, međjutim, u punom iznosu gubici trenja u ležajima, event. trenja na četkicama, trenja zraka na rotirajućim dijelovima, kao i utrošak snage za ventilaciju stroja. Sve ove gubitke jednim imenom nazivamo gubicima trenja i ventilacije. Ovi gubici pokrivaju se mehaničkim putem s osovine stroja, pa stroj mora razviti odgovarajuću mehaničku snagu, unatoč tome, što u praznom hodu nije opterećen nikakvim vanjskim momentom na osovini.

No nije to jedina mehanička snaga, koju stroj mora razvijati u praznom hodu. K tome pridolaze i površinski i pulzacioni gubici, koji su uzrokovani utorima u statoru i rotoru, te strujama u praznom hodu.

Ako prema sl. 4-10a,b,c razmotrimo raspodjelu indukcije u rasporu, koja putuje po obodu brzinom vrtnje $n_1 = \frac{60 f_1}{p}$, vidimo da će se u krivulji prostornog rasporeda indukcije pojaviti sedla na mjestima statorskih utora, koja sedla možemo zamisliti kao superponiranu indukciju sa toliko pari polova, koliko ima statorskih utora. Sedla ostaju uvijek na istom mjestu, tj. na mjestu statorskih utora, ali im se amplituda mijenja s veličinom indukcije u rasporu, dakle frekvencijom mreže f_1 . Na površini rotora i u zubima rotora dolazi do pulzacije magnetske indukcije frekvencijom $f'' = n \cdot N_1$, gdje je N_1 broj zubi statora, i do gubitaka uslijed histereze i vrtložnih struja u vezi s time. Ovi gubici se ne mogu pokriti iz mreže, jer frekvencija pulzacija nije identična s frekvencijom mreže, pa statorska struja ne može proizvesti potrebno protjecanje. Uslijed toga oni se pokrivaju iz razvijene mehaničke snage. Isto tako i utori rotora (sl.d,e,f) uzrokuju sedla u krivulji raspodjele indukcije u rasporu, koja putuju zajedno s rotorom brzinom vrtnje n , te u statorskim zubima izazivaju pulzacije frekvencije $f' = n \cdot N_2$. Gubici pulzacije i površinski gubici nastali na ovaj način isto tako se ne mogu pokriti električki iz mreže, već se pokrivaju mehanički iz razvijene snage. Jedni i drugi spomenuti gubici uzrokovani su nejednolikom reluktancijom u zračnom rasporu, te ih nazivamo i reluktantnim gubicima u željezu P'_d . Oni ovise o veličini osnovnog vala, dakle o visini narinutog napona.

Po sve sličan je efekt struja u staterskim i rotorskim utorima. Isto tako nastaju i ovdje sedla u krivulji raspodjele indukcije u rasporu, samo što ovdje nisu uzrokovana promjenama reluktancije, već promjenama uzbuđnog protjecanja. Statorske struje uzrokuju dodatne gubitke na površini i u



Sl. 4-10

zubima rotora, i obrnuto, rotorske struje uzrokuju dodatne gubitke u statoru. Jedne i druge gubitke zajedno nazovimo gubicima u željezu uslijed protjecanja P''_d . Ovi gubici ovise o veličini struje statora i rotora, a pokrivaju se isto tako iz mehaničke snage. Pošto u praznom među struje u rotoru

praktički nema, a u statoru struja praznog hoda može predstavljati znatan dio nazivne struje, gubici u željezu uslijed protjecanja u praznom hodu P''_0 bit će manji za neki iznos $\Delta P''_d$ od vrijednosti kod punog opterećenja P''_d :

$$P''_d = P''_0 + \Delta P''_d \quad (1)$$

Prema tome, mehaničko opterećenje motora u praznom hodu neće biti nula, već:

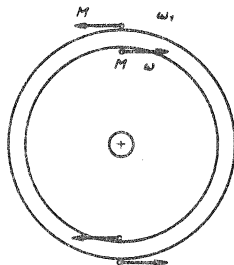
$$P_{mech} = P_{irv} + P''_d + P''_0 \quad (2)$$

unatoč tome, što je predana snaga na osovini $P_2 = 0$.

Za razvijanje ove mehaničke snage moraju teći i u rotoru odgovarajuće struje. Snaga koja prolazi kroz zračni raspor dijeli se na mehaničku i električku u omjeru $s : (1-s)$. To odmah slijedi iz fizikalne slike, jer zakretni moment između statora i rotora pomnožen kutnom brzinom okretnog polja ω_1 daje snagu koju je predao stator (sl.4-11):

$$P_{12} = M \cdot \omega_1 \quad (3)$$

dok mehanička snaga koju razvija rotor slijedi iz momenta - koji je isti - i kutne brzine rotora $\omega = (1-s)\omega_1$:



Sl. 4-11

$$P_{2m} = M \cdot \omega = (1-s)P_{12} \quad (4)$$

Ostali dio snage P_{12} , koja prelazi sa statora na rotor, klizanjem rotora prema okretnom polju pretvara se što u električku snagu u rotorskom krugu, a što u gubitke histereze i vrtložnih struja u željezu rotora, koji odgovaraju klizanju s :

$$P_{2el} = s \cdot P_{12} = P_{cu2} + (P_{e2})_s \quad (5)$$

Odatle slijedi veza između električke i mehaničke snage u rotoru:

$$P_{2el} = \frac{s}{1-s} \cdot P_{2m} \quad (6)$$

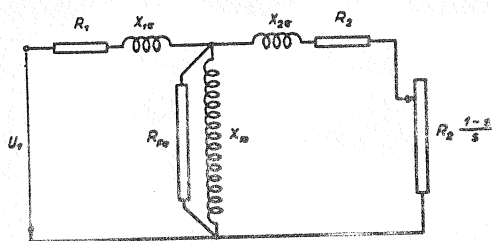
U drugu ruku, snaga koja prelazi od statora na rotor P_{12} može se kod malih klizanja smatrati proporcionalnom klizanju s . Prema sl. 4-12 bit će naime na nadomjesnoj shemi asinhronog motora očito sekundarni nadomjesni otpor:

$$R_2 + R_2 \cdot \frac{1-s}{s} = \frac{R_2}{s} \quad (7)$$

daleko veći od rasipnog otpora X_{20} , pa je snaga koja prelazi sa statora na rotor očito:

$$P_{12} = \frac{U_1^2 R_2}{s} \quad (8)$$

gdje je m = broj faza, U_f = fazni napon, R_2 = rotorski otpor po fazi.



Sl. 4-12

Prema tome će biti kod malih klizanja mehanička snaga:

$$P_{2m} \approx \frac{m U_f^2}{R_2} s (1-s) \approx s \frac{m U_f^2}{R_2} \quad (9)$$

a električka snaga:

$$P_{2el} \approx s^2 \frac{m U_f^2}{R_2} \quad (10)$$

Mehanička snaga u praznom hodu P_{meh} bit će tek vrlo mali dio mehaničke snage nazivnog opterećenja, kod kojega klizanje iznosi svega nekoliko postotaka, a to znači da će klizanje u praznom hodu biti zanemarlivo maleno. Električka snaga rotora, tj. gubici u namotu i željezu rotora, koji padaju s klizanjem na kvadrat, bit će zanemarlivo maleni, pa s njima ne moramo računati.

Kroz zračni raspor prolazi dakle u praznom hodu samo snaga :

$$(P_{2\sigma})_0 = P_{meh} \quad (11)$$

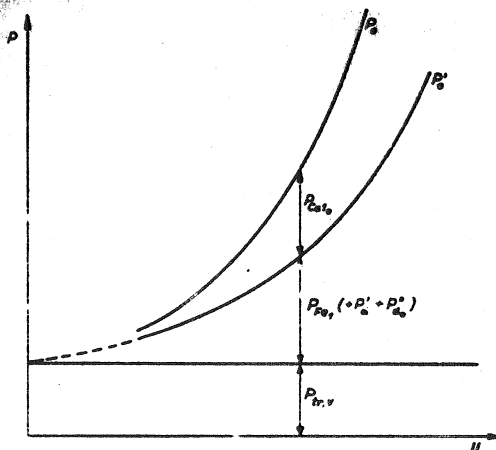
a snaga koju motor uzima iz mreže u praznom hodu veća je još za iznos gubitaka u željezu statora uslijed histerese i vrtložnih struja, koje uzrokuje magnetski tok, i za iznos gubitaka u statorskom namotu kroz koji teče struja praznog hoda I_0 :

$$P_0 = P_{Cu10} + P_{Fe1} + P_{12} = 1,5 \cdot R_{st} \cdot I_0^2 + P_{Fe1} + P_{meh} \quad (12)$$

Pri mjerenju u praznom hodu (sl.4-3) snimamo snagu uzetu iz mreže, i struju u sve tri faze u ovisnosti o naponu mreže. Struju praznog hoda I_0 dobivamo kao srednju vrijednost mjerenja u sve tri faze. Otpor između sticaljki treba izmjeriti nekoliko puta u toku snimanja, kako bi se uzela u račun vrijednost otpora pri onoj temperaturi, pri kojoj smo izvršili pojedina mjerenja. Odbijanjem ovako određjenih gubitaka u statorskom namotu od izmjerene snage P_0 dobivamo "uže gubitke praznog hoda" :

$$P_2 = P_0 - P_{Cu10} = P_0 - 1,5 \cdot R_{st} \cdot I_0^2 \quad (13)$$

U dijagram (sl. 4-13) unosimo mjerene gubitke praznog hoda P_0 , zatim uže gubitke praznog hoda P'_0 , te gubitke trenja i ventilacije $P_{tr,v}$.



Sl.4-13

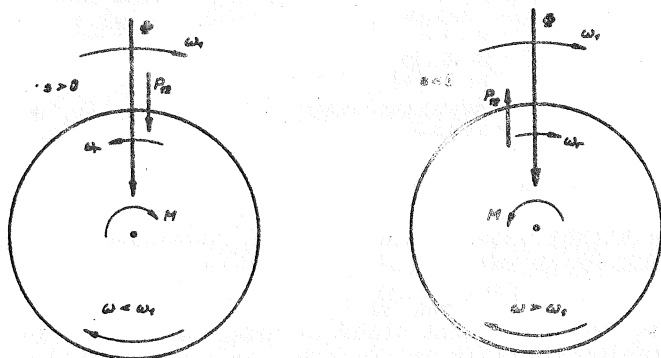
Ovi posljednji ne ovise o veličini napona, pa ostaju isti i kod napona $U = 0$, kada gubici u željezu iščezavaju. Dakako da mjerenje ne vršimo do napona 0 iz razloga navedenih u 4.2.3, već do cca 25 - 30 % nazivnog napona, a ispod toga ekstrapoliramo snimljenu krivulju do $U = 0$. Dobiveni odsječak na ordinatnoj osi predstavlja upravo gubitke trenja i ventilacije $P_{tr,v}$. Površinski i pulzacioni gubici $P'_d + P''_d$ sadržani su u razlici $P'_0 - P_{tr,v}$, koja predstavlja gubitke u željezu, jer je sa snižavanjem napona i struje padala i vrijednost P'_d i vrijednost P''_d prema nuli.

Gubitke trenja i ventilacije možemo dalje razdvojiti na gubitke trenja i gubitke ventilacije, kako je opisano u 3.9.4. U tu svrhu treba, međjutim, odrediti $P_{tr,v}$ bar kod 2 različite brzine vrtnje.

4.2.7 Idealni prazni hod. Kako je napomenuto u 4.2.3, struja praznog hoda može se snimiti sve do $J = 0$, ako provedemo pokus idealnog praznog hoda, tj. ako vrtimo rotor pomoćnim strojem sinhronom brzinom, i na taj način mehaničkim putem pokrивamo mehaničku snagu P_{mech} ; ne dopuštajući da u tome učestvuju rotorske struje. Mjerenje snage u blizini sinhronne brzine također je vrlo interesantno.

Prema sl. 4-14 vidimo, da je kod podsinhronne brzine ($s > 0$) relativna brzina rotora biti negativna, uzevši anjler vrtnje

okretnog polja kao pozitivan. Razvija se moment, uvijek nasuprot relativnoj brzini, bit će pozitivan, a moment u smjeru



Sl. 4-14

vrtnje znači motorski rad, odn. tok energije od statora na rotor. Obrnuto, ako rotor samo malo prekorači sinhronu brzinu ($s < 0$), relativna brzina rotora postaje pozitivna, a moment negativan. U generatorskom radu tok energije je obrnut, snaga P_{12} prelazi sada od rotora na stator.

Bazmotrimo sada поближе električku snagu, koja prelazi sa statora na rotor :

$$P_{2d} = s \cdot P_{12} = P_{c2} + (P_{r2})_s \quad (1)$$

Gubici u rotorskom namotu P_{Cu2} ovise o rotorskoj struji na kvadrat, dakle i o klizanju na kvadrat :

$$P_{c2} = P'_{Cu2} \cdot s^2 \quad (2)$$

gdje smo sa P'_{Cu2} označili fiktivne rotorske gubitke, koji bi nastali kod $s = 1$ kad ne bi bilo rasipnog otpora, tj. kad bi se struja rotora u ovisnosti o klizanju u čitavom području dala predočiti ekstrapolacijom pravca koji vrijedi za mala klizanja. Također označimo sa P_{H2} i P_{W2} gubitke histereze i gubitke vrtložnih struja u željezu rotora kod frekvencije mreže, tj. u slučaju da rotor miruje, a stator smo priključili na mrežu. Tada će kod klizanja s gubici histereze biti manji u omjeru u kojem se smanjila rotorska frekvencija, tj. s -puta, a gubici vrtložnih struja s^2 -puta, pa vrijedi :

$$s \cdot P_{12} = s^2 P'_{Cu2} + s \cdot P_{H2} + s^2 P_{W2} \quad (3)$$

Uz vrlo malo klizanje bit će :

$$P_{12} \approx P_{H2} \quad (4)$$

Snaga, koja prolazi kroz raspor, teži k vrijednosti gubitaka histereze u rotoru pri mrežnoj frekvenciji, kad klijzanje teži k nuli. Neposredno prije sinhronizma prelaziće snaga P_{H2} od statora na rotor, neposredno nakon sinhronizma isto tolika snaga P_{H2} od rotora na stator :

$$P_{12} \approx -P_{H2} \quad (5)$$

Kod prolaza kroz sinhronizam nastaje skok u iznosu $2P_{H2}$. Za taj se iznos smanji snaga koju motor uzima iz mreže :

$$P_o = P_{cu10} + P_{Fe1} + P_{12} \quad (6)$$

a za isto toliki iznos povećava se snaga, koju moramo dovoditi na osovini, da bi svladali mehaničke gubitke :

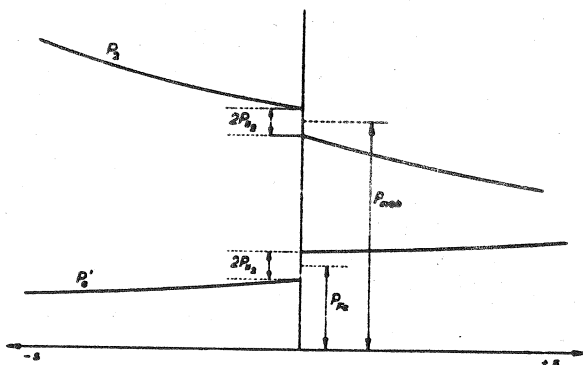
$$P_2 = P_{meh} - P_{12} \quad (7)$$

Ako u neposrednoj blizini sinhronne brzine s jedne i druge strane snimimo nekoliko tačaka tako, da mjerimo dovedenu snagu na osovini (npr. s pomoću baždarenog istosmjernog stroja), i snagu koju ispitivani stroj uzima iz mreže, od koje odbijemo gubitke u statorskom namotu, dobivamo :

$$P_2 = P_{meh} \mp P_{H2} = f(s) \quad (8)$$

$$P_o' = P_{Fe1} \pm P_{H2} = f(s) \quad (9)$$

Iz ovih krivulja (sl. 4-15) dobivamo gubitke P_{Fe1} i P_{meh} . Još jedno mjerenje pri statoru odvojenom od mreže



Sl. 4-15

daje nam:

$$P_2 = P_{Fe1} \quad (10)$$

pa se mogu odrediti i površinski i pulzacioni gubici u praznom hodu:

$$P_a' + P_a'' = P_{meh} - P_{cu} \quad (11)$$

4.2.8 Razdvajanje gubitaka praznog hoda . Kod motora s kliznim kolutima, namijenjenih pogonu s regulacijom brzine vrtnje, klizanja u pogonu mogu biti vrlo velika. U tom slučaju i gubici u željezu rotora nisu više zanemarlivo maleni, pa ih treba poznavati. Pri tome je nužno zasebno odrediti gubitke histereze P_{H2} , a zasebno gubitke vrtložnih struja P_{W2} , oboje kod frekvencije mreže, da bi za svako klizanje mogli odrediti gubitke u željezu rotora :

$$P_{Fe2} = S \cdot P_{H2} + S^2 \cdot P_{W2} \quad (1)$$

Jednostavnim mjerenjem snage vatmetrima za različita pogonska stanja možemo odrediti ne samo P_{H2} i P_{W2} , već i gubitke u željezu statora P_{H1} i P_{W1} , te mehanički pokrivane gubitke P_{mech} , svaki za sebe. Od izmjerene snage, koju motor uzima iz mreže, treba uvijek odbiti gubitke strujne topline u namotu statora. Potrebna su slijedeća mjerenja:

a) Stator priključen na mrežu, rotor stoji s otvorenim namotom :

$$P_A = P_{A1} - 1,5 \cdot R_{st1} \cdot I_A^2 = P_{H1} + P_{W1} + P_{H2} + P_{W2} \quad (2)$$

b) Stator priključen na mrežu, rotor se vrti s kratkospojevim namotom u praznom hodu:

$$P_B = P_{B1} - 1,5 \cdot R_{st1} \cdot I_B^2 = P_{H1} + P_{W1} + P_{mech} \quad (3)$$

c) Kao pod b), ali očitavanje vatmetara izvršeno neposredno nakon otvaranja rotorskog kruga, dok se brzina nije još smanjila. Snaga, koja pri tome prelazi sa statora na rotor bit će određena izrazom :

$$S \cdot P_{12} = P_{Cu2} + S \cdot P_{H2} + S^2 \cdot P_{W2} \quad (4)$$

Budući da je nakon otvaranja rotorskog kruga $P_{Cu2} = 0$, moramo biti :

$$P_{12} \approx P_{H2}$$

tako da vrijedi:

$$P_C = P_{C1} - 1,5 \cdot R_{st1} \cdot I_C^2 \approx P_{H1} + P_{W1} + P_{H2} \quad (5)$$

d) Rotor priključen na mrežu frekvencije f_1 , a napona u, koji je jednak izmjerenoj naponu na otvorenom, mirnom rotoru. Stator je kratko spojen, te se rotor vrti u praznom hodu. Ova pokus potpuno odgovara onom pod b), samo su uloge statora i rotora zamijenjene.

$$P_D = P_{D1} - 1,5 \cdot R_{r2} \cdot I_{D2}^2 = P_{H2} + P_{W2} + P_{mech} \quad (6)$$

e) Kao pod d), ali očitavanje izvršiti neposredno nakon otvaranja statorskih stezaljki. Pokus odgovara onom pod c), samo su uloge statora i rotora zamijenjene.

$$P_E = P_{m1E} - 1,5 \cdot R_{s2} \cdot I_{E2}^2 \approx P_{H2} + P_{W2} + P_{H1} \quad (7)$$

Na osnovu ovih 5 mjerenja možemo izračunati svih 5 nepoznatih veličina kako slijedi:

$$P_{H1} = P_E + \frac{1}{2}(P_B - P_D - P_A) \quad (8)$$

$$P_{H2} = P_C + \frac{1}{2}(P_D - P_A - P_B) \quad (9)$$

$$P_{W1} = P_A - P_E \quad (10)$$

$$P_{W2} = P_A - P_C \quad (11)$$

$$P_{mech} = \frac{1}{2}(P_B + P_D - P_A) \quad (12)$$

U većini slučajeva neće biti potrebno razdvajanje gubitaka P_{H1} i P_{W1} za stator. Gubitke u željezu rotora možemo tada odrediti na osnovu izmjerene krivulje gubitaka praznog hoda, i mjerenja P_A i P_C , tj. otpadaju mjerenja s rotorskim napajanjem. Iz krivulje gubitaka praznog hoda odredimo gubitke u željezu:

$$P_{Fe1} = P_{H1} + P_{W1} \approx P'_0 - P_{FeV} \quad (13)$$

pri čemu smo zanemarili površinske i pulzacione gubitke $P'_d + P_{do}$. Iz mjerenja P_A i P_C imamo :

$$P_A = P_{Fe1} + P_{H2} + P_{W2} \quad (14)$$

$$P_C = P_{Fe1} + P_{H2} \quad (15)$$

pa odmah slijedi:

$$P_{W2} = P_A - P_C \quad (16)$$

$$P_{H2} = P_C - P_{Fe1} \quad (17)$$

4.2.9 Utjecaj frekvencije na gubitke. Gubici u željezu mijenjaju se ne samo u ovisnosti o frekvenciji, već i o visini indukcije, koja je opet određena narinutim naponom i frekvencijom. Ukoliko želimo korigirati gubitke izmjerene pri frekvenciji f' , da bi dobili gubitke pri nazivnoj frekvenciji f , potrebno je prije svega biti na čistu, da tako korigirani gubici pripadaju naponu :

$$U_1 = U'_1 \frac{f}{f'} \quad (1)$$

koji bi kod frekvencije f odgovarao istim zasićenjima u željezu kao što smo ih imali kod mjerenja s frekvencijom f'

(vidi 4.2.5) .

Uz poznate gubitke P'_{Hl} i P'_{Wl} možemo izračunati gubitke pri frekvenciji f :

$$P_{Fe1} = \frac{f}{f'} \cdot P'_H + \left(\frac{f}{f'} \right)^2 \cdot P'_{Wl} \quad (2)$$

ili, ako su izmjereni samo ukupni gubici P'_{Fel} , možemo se poslužiti dosta grubom aproksimacijom, da upotrebimo relativne gubitke histereze P_H i vrtložnih struja P_W , dobivene za upotrebljeni lim pri određenoj indukciji (vidi 2.7.3) . Ti faktori će, tačno uzeto, ovisiti o zasićenju, i biti različiti na različitim mjestima magnetskog kruga, ali za korekcije unutar malih odstupanja frekvencija može se uzeti ovakva aproksimacija, tako da se može računati :

$$P_{Fe1} = \left[\frac{f}{f'} \cdot P_H + \left(\frac{f}{f'} \right)^2 \cdot P_W \right] \cdot P'_{Fe1} \quad (3)$$

Površinske i pulzacione gubitke $P'_d + P'_n$ nije potrebno korigirati, jer su i onako relativno male. Gubici trenja i ventilacije ovise o brzini vrtnje na potenciju $3/2$, odnosno 3, pa vrijedi :

$$P_{tr,v} = \left(\frac{f}{f'} \right)^{1.5} \cdot P'_{tr} + \left(\frac{f}{f'} \right)^3 \cdot P'_v \quad (4)$$

Korekcija je, dakle, moguća jedino ako smo proveli razdvajanje gubitaka trenja i ventilacije prema 3.9.4.

Normalno će se snimanje gubitaka vršiti kod nazivne frekvencije f . Korekcija dolazi u obzir samo za pojedine tačke, za koje je frekvencija pri mjerenju odstupala. Ako je za takovu tačku određeno :

$$P'_0 = P'_{Fe1} + P'_{meh} \quad (5)$$

potrebno je prvo izračunati vrijednost :

$$P'_{meh} \approx P'_d + P'_{d0} + \left(\frac{f'}{f} \right)^{1.5} \cdot P'_{tr} + \left(\frac{f'}{f} \right)^3 \cdot P'_v \quad (6)$$

da bi dobili :

$$P'_{Fe1} = P'_0 - P'_{meh} \quad (7)$$

koju ćemo korigirati, i nanijeti korigiranu vrijednost P_{Fel} iznad korigiranog napona U .

Nestalna frekvencija mreže predstavlja opasnost kod mjerenja na strojevima s velikim zamašnim momentom, koji ne mogu dovoljno brzo slijediti brzinom vrtnje promjene frekvencije mreže. Ako se frekvencija mreže povisi od f na f' , stroj koji je zadržao svoju brzinu praznog hoda :

$$n = \frac{60 f}{p}$$

ide sada u motorskom radu s klizanjem :

Pri tom klizanju on uzima znatnu snagu iz mreže, koja ne predstavlja gubitke praznog hoda, već služi za ubrzanje mase na novu brzinu $n' = \frac{60 \cdot f}{p}$. Ako u tom času očitamo instrumente, izmjereni gubici praznog hoda ispasti će preveliki. Obrnuto, ako se frekvencija mreže snizi, snizi se i klizanje, ili postane čak negativno. Stroj se usporava na novu brzinu, i pri tome svojom kinetičkom energijom pokriva vlastite gubitke, ili čak šalje energiju u mrežu. Očitavanje instrumenata dati će premalene gubitke, ukoliko čak ne bude smjer energije promijenjen. Da bi izbjegli greške uslijed varijacija frekvencije mreže, treba pripaziti da očitavanja vršimo samo onda, kad su se otkloni instrumenata smirili dovoljno dugo vremena na određenoj vrijednosti.

4.3 Ispitivanja u kratkom spoju

=====

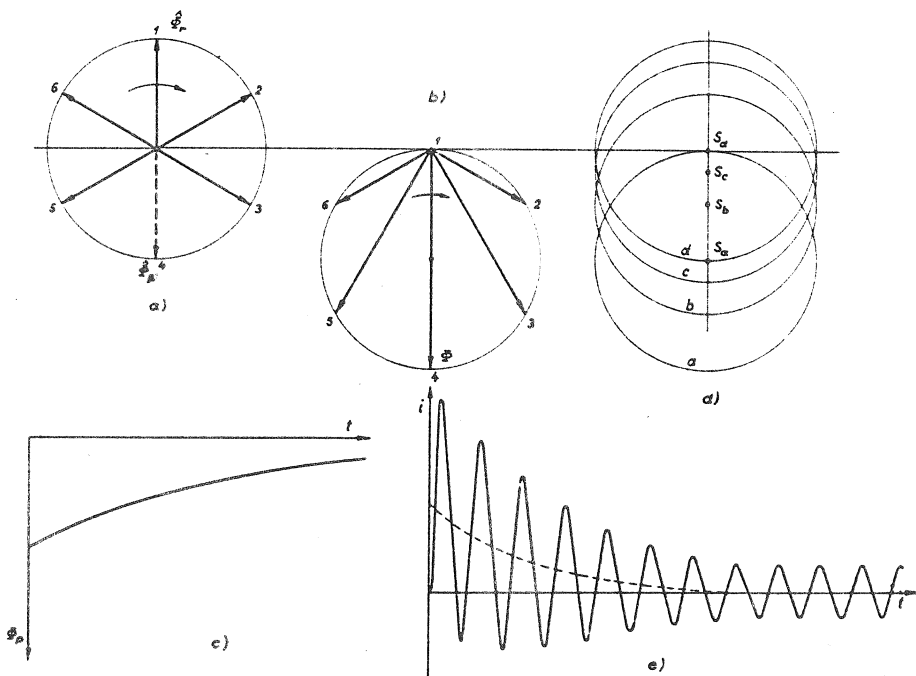
Pokus kratkog spoja treba da nam daje podatke o struji kod uključivanja, te o zakretnom momentu u času kretanja, tzv. poteznom momentu. Ove su vrijednosti vrlo važne za ocjenu ponašanja stroja u pogonu, jer o visini potezne struje ovisi event. smetnja, koju uključivanje motora predstavlja za mrežu, a s druge strane zaštita motora ne smije izbacivati kod kratkotrajne potezne struje. Veličina poteznog momenta određuje visinu momenta opterećenja, s kojim motor može krenuti, pri čemu treba voditi računa o povećanom trenju mirovanja, padovima napona u dovodima i varijacijama napona mreže. Samo mjerenje provodimo na sličan način kao kod praznog hoda (sl.4-3), s tom razlikom, što je rotor sada zakločen s pomoću poluge ili kočnice, kojom možemo mjeriti moment na osovinu. Instrumentarij će biti različit od onoga za prazni hod, jer su sada struje znatno veće. Snimamo struje, snagu, te potezni moment u ovisnosti o naponu mreže.

4.3.1 Statičke i dinamičke pojave u kratkom spoju. Kod priključka asinhronog motora na mrežu treba računati s prelaznom pojavom, koja nastaje zbog toga, što se magnetska polja u električkim krugovima ne mogu mijenjati odjednom, nego samo ograničenom brzinom. Razmotrimo tri karakteristična slučaja : a) priključak motora na mrežu uz otvoreni rotor - npr. kolutni motor s prekidom na uputniku, ili vrlo velikim otporom, b) priključak na mrežu sa zatvorenim strujnim krugom rotora koji miruje, c) isto kao b), ali rotor se vrti.

Svaku veličinu za vrijeme prijelaza iz jednog u drugo pogonsko stanje možemo rastaviti na dvije komponente : jedna predstavlja konačno stanje nakon izvršene promjene, a druga predstavlja prelaznu pojavu, i uvjetovana je konstantama električkog kruga i karakterom nastale promjene. U slučaju

mora se od prvog časa suprotstaviti inducirani protunapon, a to znači, da se mora snajesta stvoriti okretno polje odgovarajuće veličine unutar statorskog namota. To okretno polje, koje inducira protunapon svojom rotacijom, induciralo bi svojim nastajanjem velik napon u statorskom namotu. Uz zanemarive otpore poteći će u statorskom namotu struje, koje će stvoriti isto toliki tok, ali suprotnog smjera. I dok će osnovni tok ϕ_r nastaviti da rotira, tzv. slobodni tok prelazne pojave ϕ_p ostati će u početnom položaju (sl.4-16a).

Pribrajanje tih tokova (na sl.4-16b izvršeno za svaku šestinu periode) pokazuje, da bi ukupni tok ϕ bez prigušenja dosegao dvostruku vrijednost osnovnog toka, što bi zbog zasiće-



Sl. 4-16

nja rezultiralo u vrlo visokim šiljcima struje. U stvari, tok ϕ_p opadati će po eksponencijalnom zakonu, pri čemu je vremenska konstanta određena ukupnim induktivitetom i otporom statorskog kruga, u koji treba osim statorskog namota uračunati i dovode (sl.4-16c). Uslijed toga će se vrh vektora, koji prikazuje veličinu i os ukupnog toka, kretati po kružnici, čije se središte apendecijski približava središtu osnovne kružnice S_d (sl. 4-16d), a struja će postepeno prijeći u struju

magnetiziranja (sl.4-16e). Momentane vrijednosti u početku prelazne pojave mogu i 12 do 15 puta premašiti amplitudu nazivne struje motora.

Slično se odvija pojava kod uključivanja na mrežu motora sa zatvorenim rotorom. Ako za početak pojednostavimo sliku uzevši otpore jednakima nuli, tok neće prodirati u rotor, već će se zatvarati rasipnim putovima. Prema sl. 4-17(a), u početnom momentu uz osnovni tok ϕ_r stvorit će se i suprotni tok prelazne pojave ϕ_p tako da je ukupni tok predstavljen superpozicijom lijeve i desne strane slike. Dok prvi rotira, i stvara protunapon, drugi ostaje u istom položaju. Nakon polovine periode (sl.4-17b) tokovi ϕ_r i ϕ_p bi se zbrajali, a protjecanje statora i rotora poraslo bi zbog zasićenja rasipnih putova više nego dvostruko. U stvari namoti imaju određene otpore, pa se protjecanja u statoru, koja održavaju tok prelazne pojave ϕ_p , održavaju razgrađnjom tog istog toka ϕ_p . Ako tačnije razmotrimo pojave prema shemi na sl.4-18, pri čemu su otpori i struje svedeni na jednak broj zavoja, moramo zamisliti u početnom momentu struje i tokove prelazne pojave i_{10} , i_{20} i ϕ_{p0} suprotnog smjera i jednake stacionarnim vrijednostima koje bi odgovarale času kratkog spajanja. Nakon toga ove su veličine prepuštene same sebi, pa možemo pisati:

$$\begin{aligned} i_1 R_1 + p \cdot i_1 \cdot L_1 - p \cdot i_2 \cdot L_{12} &= i_{10} \cdot L_1 - i_{20} \cdot L_{12} = K_1 \\ -p \cdot i_1 \cdot L_{12} + i_2 \cdot R_2 + p \cdot i_2 \cdot L_2 &= i_{20} \cdot L_2 - i_{10} \cdot L_{12} = K_2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$i_1 = \frac{K(R_2 + pL_2) + K_2 \cdot p \cdot L_{12}}{(R_1 + pL_1)(R_2 + pL_2) - p^2 L_{12}^2} \quad (2)$$

$$i_2 = \frac{K_1(R_1 + pL_1) + K_1 \cdot p \cdot L_{12}}{(R_1 + pL_1)(R_2 + pL_2) - p^2 L_{12}^2} \quad (3)$$

Izjednačimo nazivnik ovih izraza s nulom, i riješimo korjene kvadratne jednadžbe :

$$p^2(L_1 L_2 - L_{12}^2) + p(R_1 L_2 + R_2 L_1) + R_1 R_2 = 0 \quad (4)$$

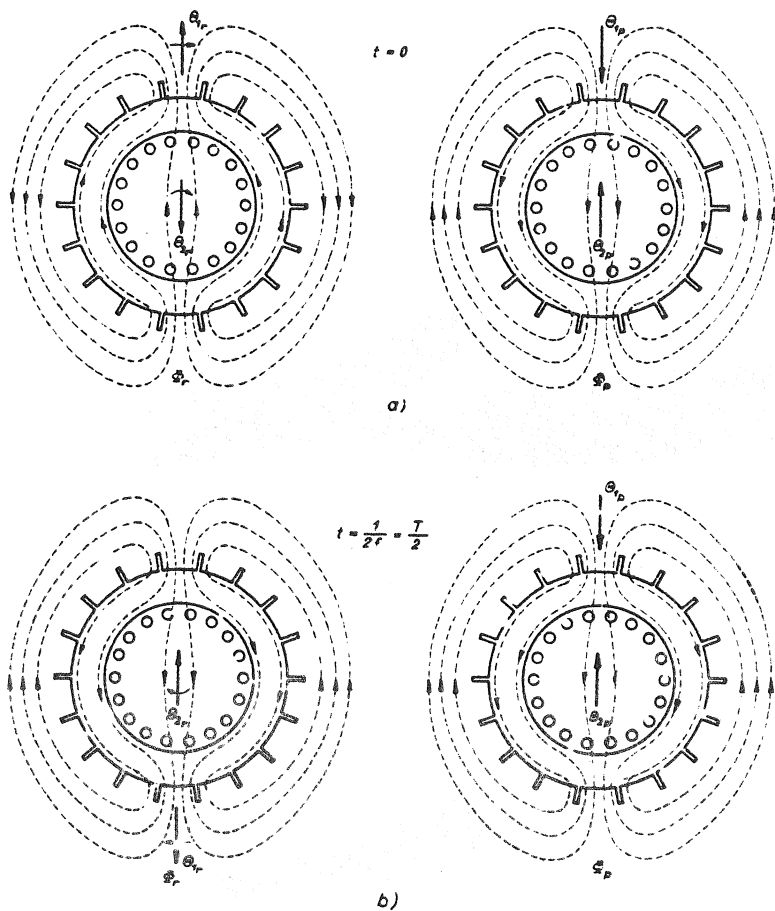
Uz faktor rasipanja $\sigma = 1 - \frac{L_{12}^2}{L_1 L_2}$ i vremenske konstante primarnog i sekundarnog kruga :

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{L_1}{R_1} \\ T_2 &= \frac{L_2}{R_2} \end{aligned} \quad (5)$$

dobivamo :

$$p_1 = -\frac{1}{G} \cdot \left(\frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right) = -\frac{1}{l'} \quad (6)$$

$$p_2 = -\frac{1}{l_1 + l_2} = -\frac{1}{l''}$$



Sl. 4-17

Struje prelazne pojave bit će oblika :

$$\begin{aligned} i_1 &= A \cdot \varepsilon^{-\frac{t}{T_1}} + B \cdot \varepsilon^{-\frac{t}{T_2}} \\ i_2 &= C \cdot \varepsilon^{-\frac{t}{T_1}} + D \cdot \varepsilon^{-\frac{t}{T_2}} \end{aligned} \quad (7)$$

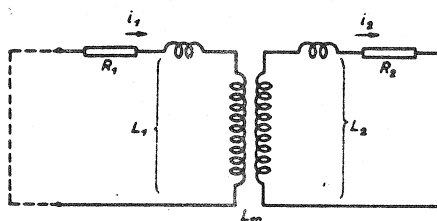
a isto tako i magnetski tek :

$$\Phi_p = K(i_1 - i_2) = E \cdot \varepsilon^{-\frac{1}{T}} + F \cdot \varepsilon^{-\frac{1}{T}} \quad (8)$$

Jedan dio toka iščezava dakle s vremenskom konstantom

$$T'' = T_1 + T_2 \quad (9)$$

dakle dvostruko većom nego kod otvorenog rotora, a drugi dio sa



Sl. 4-18

vremenskom konstantom

$$T' = \frac{\sigma T_1 T_2}{T_1 + T_2} \approx \frac{\sigma}{2} \cdot T_1 = T_0 \quad (10)$$

koja odgovara rasipnom toku, i vrlo je malena. Uz približno jednaku primarnu i sekundarnu impedanciju, što je kod asinhronih motora obično slučaj, pad napona u kratkom spoju dijeli se približno po polovici na primar i na sekundar, tako da je :

$$I_k \cdot Z_1 \approx I_k \cdot Z_2 = I_k \cdot X_m = \frac{U}{2} \quad (11)$$

To znači, da će približno pol toka Φ_p brzo nestati, ali će zato druga polovica nakon svake periode povećati ukupni tok, i izazvati vrlo visoke struje. Drugačija je slika, ako se rotor vrti. Magnetski tok prelazne pojave, koji siječe vodiče rotora, odmah je prigušen rotorskim strujama, te se rastavlja na dva toka, od kojih jedan miruje i vezan je uz stator, a drugi rotira, i vezan je uz rotor. Oba toka zatvaraju se rasipnim putevima, i prigušuju se s dvostrukom konstantom rasipanja $2T_0 = \frac{\sigma L}{R}$, što znači, da će prelazna pojava vrlo brzo proći. Tok vezan uz stator izaziva svojom promjenom istosmjernu komponentu struje u statoru, i izmjenične struje frekvencije brzine rotora u rotoru, dok tok vezan uz rotor izaziva istosmjernu komponentu struje u rotoru, i izmjenične struje u statoru. Uslijed toga dolazi u prvim poluperiodama do pulzacije momenta oko vrijednosti, koje odgovaraju normalnom, stacionarnom stanju kod iste brzine.

Pogledajmo kao primjer 6-polni motor od 500 kW, koji ima otpore statora i rotora $R_1 = 0,173$ oma, $R_2 = 0,19$ oma, rasipne otpore $X_{\sigma 1} = 1,40$ oma, $X_{\sigma 2} = 1,63$ oma, i otpor glavnog tčka $X_m = 58,5$ oma, te zamašni moment $mD^2 = 380 \text{ kgm}^2$. Iz tih podataka izlazi :

$$\begin{aligned}\sigma &= 1 - \frac{58,5^2}{59,9 \cdot 60,13} = 0,045 \\ T_1 &= \frac{59,9}{314 \cdot 0,173} = 1,1 \text{ sek} \\ T_2 &= \frac{60,13}{314 \cdot 0,19} = 1,01 \text{ sek} \\ T' &= \frac{0,045}{0,91 + 0,99} = 0,024 \text{ sek} \\ T'' &= 1,1 + 1,01 = 2,11 \text{ sek}\end{aligned}$$

Kad bi motor kretao bez opterećenja uz konstantan razvijeni moment jednak nazivnome (u stvari će prilike biti još povoljnije, tj. momenti veći), zalet do pune brzine bi trajao:

$$T_z = \frac{mD^2}{4M_n} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot n_n = \frac{mD^2 \cdot n_n^2}{365 \cdot P_n} = \frac{380 \cdot 1000^2}{365 \cdot 500000} = 2,08 \text{ sek}$$

Pri uključivanju s otvorenim rotorom nestajala bi prelazna pojava s vremenskom konstantom $T_1 = 1,1$ sek. Uz zatvoreni rotor oko polovice toka brzo bi se izgubilo uz $T' = 0,024$ sek, ali bi zato druga polovica polako nestajala uz $T'' = 2,11$ sek. Na prvi pogled izgleda, kao da bi prelazna pojava trajala duže od zaleta motora, koji je kraći od 2 sek, no čim se rotor zavrti, prelazna pojava nestaje s vremenskom konstantom 0,048 sek, dakle u nekoliko perioda.

Ovo razmatranje postaje općenito, ako razmotrimo, kako se mijenjaju električke i mehaničke konstante s promjenom linearnih dimenzija stroja. Uz x-puta povećane dimenzije u sličnoj konstrukciji, i uz ista specifična opterećenja, snaga će se povećati x^4 -puta. Zamašni moment mD^2 povećati će se x^3 . $x^2 = x^5$ puta. Vrijeme zaleta T_z bit će prema tome $x^5/x^4 = x$ puta veće. Sve reaktancije rastu direktno proporcionalno s presjekom toka, a obrnuto proporcionalno s dužinom silnica, dakle $x^2/x = x$ puta, a omski otpori rastu direktno proporcionalno s dužinom vodiča, i obrnuto proporcionalno s presjekom vodiča, dakle $x/x^2 = 1/x$ puta. Električke vremenske konstante bit će, kao omjeri induktiviteta i omskih otpora, sve $x: \frac{1}{x} = x^2$ puta veće. Omjer trajanja električkih prelaznih pojava prema trajanju zaleta bit će dakle $x^2/x = x$ puta veći, tj. kod malih motora električke prelazne pojave u uspo-

redbi s trajanjem zaleta bit će kraće, kod velikih motora duže.

Očito je, da će struje kod priključka motora na mrežu kratkotrajno znatno premašiti vrijednosti koje dobivamo mjerenjem stacionarnih struja u trajnom kratkom spoju, što je od velikog značaja za dimenzioniranje kontakata sklopke. No čim motor krene, struje prelazne pojave brzo nestaju, tako da njihov termički efekat praktički nije značajan. Utjecaj prelazne pojave na zakretni moment motora dolazi do izražaja u toliko, što povećane struje daju i povećane padove napona u dovodima, te što u početku zaleta dolazi do oscilacija momenta, koje se očituju kao vibracije. Mehaničke sile uslijed visokih struja mogu biti neugodne kod većih motora. Pogotovo opasan je pogonski slučaj, gdje motor nakon izbacivanja sklopke ponovno uklapamo nakon kratkog vremena.

Rotorske struje održavaju glavni tok, te ovaj polako opada s vremenskom konstantom $T_2 = L_2/R_2$, koja može biti znatna. Tok rotira brzinom rotora, i može se dogoditi, da kod ponovnog uklapanja bude upravo suprotan toku koji diktira narinuti napon. Tok prelazne pojave predstavlja onda zbroj obaju tokova, i dovodi do visokih vrijednosti struje. Još nepogodniji slučaj nastupa prilikom reverziranja motora.

Mjerenje struja za vrijeme prelazne pojave može se provesti oscilografskim snimanjem. Ne smije se upotrebiti strujne transformatore, koji ne prenose ispravno istosmjernu komponentu, već shuntove. Teško je, međjutim, pogoditi trenutak uklapanja, koji daje najnepogodnije prilike, pa se može jedino snimanjem svih triju faza i brojnim pokušajima dobiti taj slučaj. Normalno se izvode samo mjerenja stacionarnih pojava u kratkom spoju.

4.3.2 Struja kratkog spoja. Prema nadomjesnoj shemi na sl. 4-18 uz narinuti napon U na primarnoj strani mogu se stacionarne struje izračunati iz jednadžbi :

$$\begin{aligned} U &= I_1 \cdot R_1 + I_1 j\omega L_1 - I_2 j\omega L_{12} \\ 0 &= -I_1 j\omega L_{12} + I_2 R_2 + I_2 j\omega L_2 \end{aligned} \quad (1)$$

Za primarnu struju slijedi:

$$I_1 = \frac{U(R_2 + j\omega L_2)}{(R_1 + j\omega L_1)(R_2 + j\omega L_2) + \omega^2 L_{12}^2} = \frac{U}{Z_k} \quad (2)$$

gdje izraz Z_k predstavlja impedanciju kratkog spoja, koja je predstavljena izrazom:

$$Z_k = R_1 + \left(\frac{L_{12}}{L_2} \right)^2 \cdot R_2 + jX_1 - jX_2 \left(\frac{L_{12}}{L_2} \right)^2 \quad (3)$$

Ako reaktancije primarnog kruga $X_1 = \omega L_1$ i sekundarnog kruga $X_2 = \omega L_2$ rastavimo na dijelove koji predstavljaju dio glavnog toka $X_m = \omega L_{12}$, i one koji predstavljaju udjele rasipnih tokova $X_{G1} = \omega L_{1G}$ i $X_{G2} = \omega L_{2G}$; dobivamo:

$$\begin{aligned} X_1 - X_2 \left(\frac{L_{12}}{L_2} \right)^2 &= X_m + X_{G1} - (X_m + X_{G2}) \frac{X_m^2}{(X_m + X_{G2})^2} = \\ &= X_m + X_{G1} - X_m \cdot \frac{X_m + X_{G2} - X_{G2}}{X_m + X_{G2}} = \\ &= X_{G1} + \frac{L_{12}}{L_2} \cdot X_{G2} \end{aligned} \quad (4)$$

tako da je impedancija kratkog spoja, uzevši u obzir da su rasipni induktiviteti relativno mali prema induktivitetu glavnog polja, tj. da je $\frac{L_{12}}{L_2} \approx 1$, konačno jednaka

$$\begin{aligned} Z_k &= R_1 + \left(\frac{L_{12}}{L_2} \right)^2 \cdot R_2 + j \left(X_{G1} + \frac{L_{12}}{L_2} \cdot X_{G2} \right) \approx \\ &\approx R_1 + R_2 + j(X_{G1} + X_{G2}) = R_k + jX_k \end{aligned} \quad (5)$$

Karakteristika, koja prikazuje struju kratkog spoja u ovisnosti o naponu, morala bi prema tome biti pravac iz ishodišta, a faktor snage $\cos \phi_k$ morao bi kod svih napona biti isti. U stvari to neće biti tako, jer niti djelatni otpori, niti reaktancije nisu konstante. Djelatni otpori se znatno mijenjaju sa zagrijanjem. Kako bi što više eliminirali utjecaj zagrijanja na izgled karakteristike, vršimo mjerenje što brže, a počinjemo ga s najvišim naponima, koje za daljnje tačke snizujemo, tako da se temperatura hladnih namota u početku podigne, a poslije stagnira ili čak pada od mjerenja do mjerenja. Ako je zagrijanje naročito naglo, potrebno je mjeriti temperaturu namota prije i iza snimanja svake tačke, i provesti korekciju, a između pojedinih tačaka treba motor hladiti u praznom hodu. Želimo li odrediti struju I_k za pogonski toplo stanje kod temperature 75° , a mjerenje je izvršeno kod temperature statora ϑ_1 i rotora ϑ_2 , treba računati:

$$\cos \phi_{k \text{ mjer}} = \frac{R_{k \text{ mjer}}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_{k \text{ mjer}}} \quad (6)$$

$$Z_{k \text{ mjer}} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_{k \text{ mjer}}} \quad (7)$$

$$R_{k \text{ mjer}} = Z_{k \text{ mjer}} \cdot \cos \phi_{k \text{ mjer}} \approx R_{1\vartheta_1} + R_{2\vartheta_2} \quad (8)$$

$$R_{2\varphi_2} = R_{k_{mjer}} - R_{1\varphi_1} \quad (9)$$

$$R_{175^\circ} = R_{1\varphi_1} \cdot \frac{235 + \varphi_1}{235 + \varphi_2} \quad (10)$$

$$R_{275^\circ} = R_{2\varphi_2} \cdot \frac{235 + \varphi_2}{235 + \varphi_1} \quad (11)$$

$$R_{k75^\circ} = R_{175^\circ} + R_{275^\circ} \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{k75^\circ} = \frac{X_k}{R_{k75^\circ}} = \frac{X_k}{R_{k_{mjer}}} \cdot \frac{R_{k_{mjer}}}{R_{k75^\circ}} = \operatorname{tg} \varphi_{k_{mjer}} \cdot \frac{R_{k_{mjer}}}{R_{k75^\circ}} \quad (13)$$

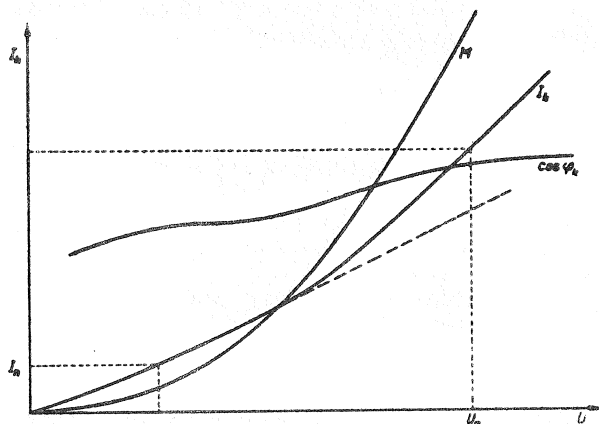
$$Z_{k75^\circ} = \frac{X_k}{\sin \varphi_{k75^\circ}} = Z_{k_{mjer}} \cdot \frac{\sin \varphi_{k_{mjer}}}{\sin \varphi_{k75^\circ}} \quad (14)$$

$$I_{k75^\circ} = I_{k_{mjer}} \cdot \frac{Z_{k_{mjer}}}{Z_{k75^\circ}} \quad (15)$$

Na taj način izvršena je korekcija utjecaja temperature i za struju I_k , i za faktor snage $\cos \varphi_k$, koji slijedi iz $\operatorname{tg} \varphi_k$.

Glavni faktor, koji kvari linearnost karakteristike $I_k = f(U)$, to je ovisnost rasipnih reaktancija o veličini struje. Svaka reaktancija u stvari predstavlja omjer magnetskog toka i struje koja ga uzbuđuje, uz konstantne ostale faktore, kao što su geometrijski raspored i broj zavoja. Rasipni tokovi zatvaraju se velikim dijelom kroz zrak, ali jedan dio puta silnica vodi i kroz željezo, npr. kroz zube, mostiće koji zatvaraju utore, jaram itd. Kod većih struja kratkog spoja veći su i rasipni tokovi, i indukcije na pojedinim mjestima. Tako mogu redom nastupiti zasićenja u mostićima, zubima rotora, zubima statora itd. Svaki puta se povećava struja za daljnji porast toka više nego proporcionalno, tj. reaktancija se sa zasićenjem smanjuje. Karakteristika struje u ovisnosti o naponu postati će strmija, pa umjesto pravca dobivamo više pravaca, obično 2 ili 3, koji su povezani koljenom na svakom mjestu gdje nastupa zasićenje u rasipnim putovima (sl. 4-19). Ako snimimo karakteristiku samo kod nižih napona, pa izvršimo ekstrapolaciju na nominalni napon po pravcu, dobiti ćemo vrijednost struje za 20 - 50 % prenika. Zbog toga je važno, da se mjerenje protegne do nominalnog napona, ili bar što bliže tome. Kod manjih motora to se uvijek radi, dok je kod većih problem u velikim strujama, koje

uređjaji ispitne stanice ne mogu uvijek dati.



Sl. 4-19

Osim rasipnih reaktancija mijenja se i reaktancija glavnog polja X_m sa zasićenjem, odn. raste struja magnetiziranja. Taj utjecaj u kratkom spoju nije velik, jer je kod nazivnog napona na stezaljkama inducirani napon još uvijek tek oko 50 % punog napona, pa još nema zasićenja.

4.3.3 Potezni moment. Moment u času dok rotor još stoji možemo izračunati iz snage koja prelazi sa statora na rotor P_{12} , i kutne brzine okretnog polja ω_1 :

$$M = \frac{P_{12}}{\omega_1} \quad (1)$$

Pošto rotor stoji, nema trenja zraka i ventilacije, pa od razvijenog momenta u rasporu treba odbiti samo trenje mirovanja u ležajima, da bi dobili slobodni moment na osovini. Prema shemi na sl.4-18 biti će snaga koja prelazi na rotor pri klizanju $s = 1$ identična s rotorskim gubicima:

$$P_{12} = m \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (2)$$

Rotorsku struju možemo odrediti iz jednadžbi (1) i (2) u 4.3.2 kao:

$$I_2 = -U \frac{j\omega L_{12}}{(R_1 + j\omega L_1)(R_2 + j\omega L_2) + \omega^2 L_{12}^2} = -I_1 \frac{j\omega L_{12}}{R_2 + j\omega L_2} \approx -I_1 \frac{L_{12}}{L_2} \quad (3)$$

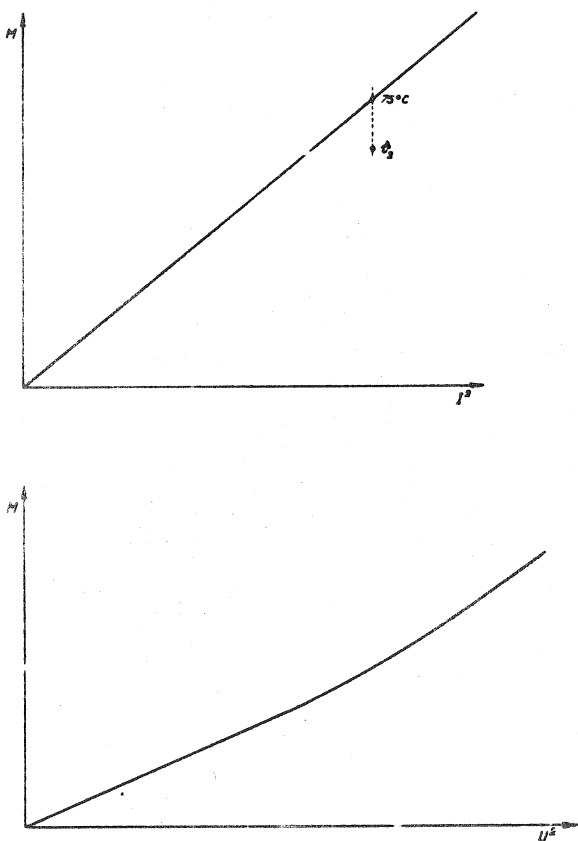
tako da je potezni moment napokon:

$$M = \frac{m}{\omega_1} \left(\frac{L_{12}}{L_2} \right)^2 \cdot R_2 \cdot I_1^2 = K \cdot R_2 \cdot I_1^2 \quad (4)$$

Vidi se, da potezni moment raste sa strujom kratkog spoja na kvadrat, no istovremeno ovisi moment i o otporu rotor-skog namota. Korekciju momenta izmjeranog kod temperature ϕ_2 na temperaturu 75° lako je provesti:

$$M_{75^\circ} = M_{\phi_2} \cdot \frac{235 + 75}{235 + \phi_2} \quad (5)$$

Za aluminijski kavez na rotoru potrebno je u gornjem izra-
zu uvrstiti 245 umjesto 235. Ovako korigirani momenti u
ovisnosti od I_1^2 leže gotovo na pravcu, unatoč zasićenja
rasipnih putova i nelinearnosti karakteristike $I = f(U)$.
Ako ih, međjutim, crtamo u ovisnosti o U^2 (sl.4-20), po-
kazat će se utjecaj zasićenja na rasipne reaktancije. Obič-
no unosimo krivulju poteznog momenta u isti dijagram sa

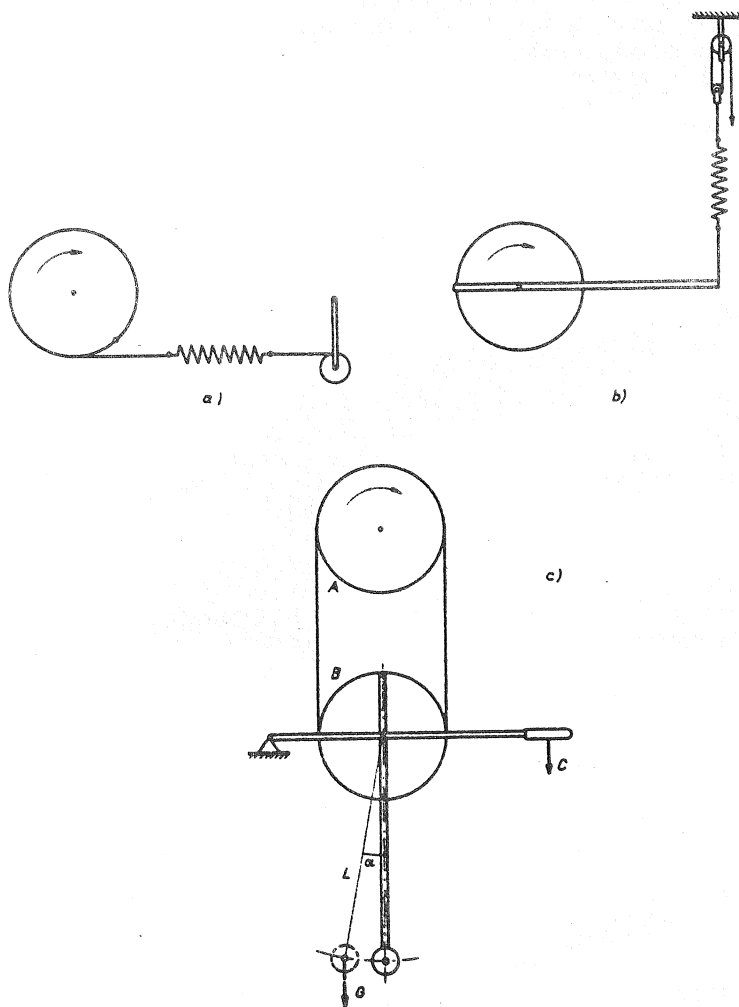


Sl. 4-20

strujom I_k i faktorom snage $\cos \phi_k$ u ovisnosti o naponu U (sl. 4-19), ali je mnogo zgodnije upotrebiti pri snimanju T^2

kao apscisu, pa kasnije prenijeti korigirane vrijednosti u dijagram $M = f(U)$.

Drugu poteškoću pri snimanju poteznog momenta predstavlja utjecaj međusobnog položaja statorskih i rotorskih u-tora na veličinu momenta. Variranja mogu biti znatna, pa je



Sl. 4-21

potrebno snimiti potezni moment, a i poteznu struju za položaj rotora prema statoru koji daje minimalne vrijednosti, kao i za položaj koji daje maksimalne vrijednosti. U tu

svrhu mora postojati mogućnost, da se rotor za vrijeme mjerenja zakrene za kut koji odgovara bar jednom utor-skom koraku rotora. To je osobito lako izvedivo kod mjerenja momenta pernom vagom, ako uže omotamo oko remenice s jedne strane, a oko osovine s ručkom s druge strane (sl. 4-21a). Isto se može postići zavješanjem perne vage kojom mjerimo preko koloturnika (b). Manje je tačan sistem prikazan na sl. 4-21c, gdje remenicu motora A povežemo remenom s mjernom remenicom B. Pritezanjem ručke C možemo rotor zaustaviti, ili pustiti da malo klizne, a po otklonu utega težine G mjerimo moment :

$$M = G \cdot L \cdot \sin \alpha \approx K \cdot \alpha \quad (6)$$

gdje je K konstanta upotrebljenog sistema utega.

Pravilo je, da se kao potezna struja uzima maksimalna vrijednost struje, a kao potezni moment minimalna vrijednost momenta koju smo izmjerili u ovisnosti o položaju rotora.

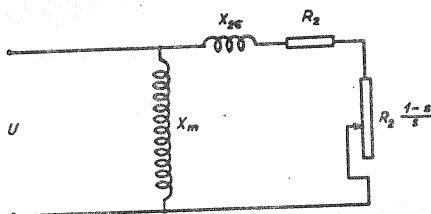
4.3.4 Korekcija poteznog momenta i struje. Ako je potezni moment nešto prenizak, postavlja se često zadatak ispitnoj stanici, da provede korekciju, kako bi potezni moment dosegao traženu vrijednost. Prema jednadžbi (4) iz 4.3.3 može se to postići povećanjem rotorskog otpora R_2 . Time se nešto smanjuje struja kratkog spoja, pa dobitak na poteznom momentu nije proporcionalan s povećanjem otpora R_2 , već je nešto manji. Najjednostavniji je zahvat na kratko-spojnim prstenima, koje možemo sa strane odtokariti, i time povećati otpor rotorskog kaveza. Za približni predračun potrebnog povećanja otpora može se u prvoj aproksimaciji zanemariti promjena struje kratkog spoja, pa uzeti:

$$\frac{M_{kor}}{M} \approx \frac{R_{2kor}}{R_2} \quad (1)$$

Podjelu rotorskog otpora na štapove i kratkospojne prstene treba uzeti iz projekta. Tokarenje treba vršiti vrlo oprezno, radije u više navrata, kako bi se moglo pratiti efekat poduzetih mjera, i kako ne bi pretjerali. Prije ovakvog zahvata treba uvijek ocijeniti sve posljedice. Povećanje otpora rotora svakako će izazvati veće klizanje, veće gubitke i veće zagrijavanje. O veličini tih promjena treba biti na čistu prije početka radova, kako ne bi poboljšanjem poteznog momenta izazvali veće zlo.

Drugi slučaj, koji katkada zahtijeva zahvat u ispitnoj stanici, predstavlja premalena struja kratkog spoja, što samo po sebi ne bi smetalo, ali je s time vezano i smanjenje maksimalnog, tzv. prekretnog momenta. To se odmah vidi na osnovu pojednostavljene nadomjesne sheme prema sl. 4-22,

gdje smo zbog pojednostavljenja zanemarili pad napona u statorskom namotu, pa uzeli da je $E = U$.



Sl. 4-22

Ukupni djelatni otpor rotora kod klizanja s predstavljen je sa $\frac{R_2}{s}$, pa se moment može izraziti s pomoću snage, koja prelazi sa statora na rotor kao :

$$M = \frac{P_{12}}{\omega} = \frac{m \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s}}{\omega} = \frac{m \cdot U^2}{\omega} \cdot \frac{1}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2\sigma}^2} \cdot \frac{R_2}{s} \quad (2)$$

Ako potražimo maksimum tog izraza deriviranjem po s dobivamo kao rezultat :

$$s_m = \frac{R_2}{X_{2\sigma}} \quad (3)$$

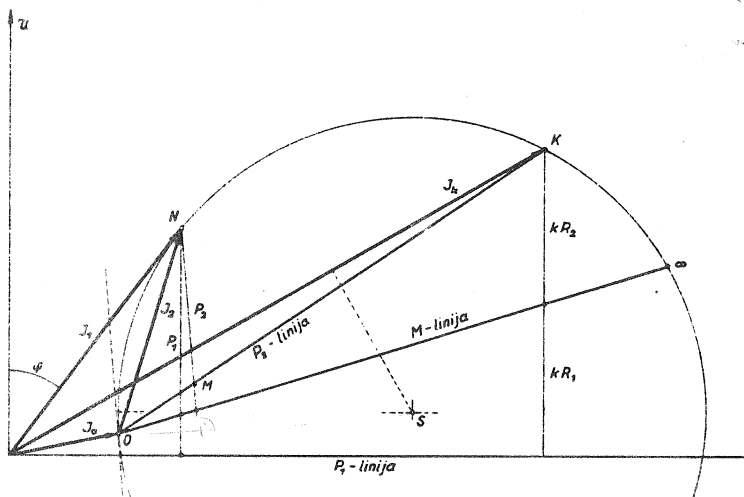
$$M_m = \frac{m \cdot U^2}{2 \cdot \omega \cdot X_{2\sigma}} \quad (4)$$

Prekretni moment je dakle obrnuto proporcionalan rasipnom otporu rotora. Ako je taj rasipni otpor ispao s bilo kojeg razloga prevelik, bit će struja kratkog spoja niska, ali prekretni moment će biti smanjen još u većoj mjeri. Najčešći je uzrok tome povećanje rasipnih tokova uslijed blizine magnetski dobro vodljivih materijala - učvršćenja, ventilatora, ventilacionih zasloni i sl. Ove dijelove treba zamijeniti dijelovima od nemagnetskog materijala. Ako niti to nije dovoljno, ne preostaje drugo, već da smanjimo rotorsko rasipanje otvaranjem utora s pomoću glodalice, ili proširenjem utorskog otvora. Dakako da i ovdje treba prvo kalkulacijom provjeriti efekat namjeravanih zahvata, i radije u prvom zahvatu učiniti premalo nego previše.

4.4 Opterećenje asinhronog motora

=====

Iz pokusa praznog hoda i pokusa kratkog spoja dobili smo struju praznog hoda i njezin fazni kut, a isto tako i struju kratkog spoja s pripadnim faznim kutom. Ako uočitamo vertikalno vektor napona U , i unesemo vektore struje praznog hoda J_0 i kratkog spoja J_k , imamo 2 tačke kružnog dijagrama, O i K (sl.4-23). Središte S leži na horizontali koja raspolavlja vertikalnu udaljenost tačke O od smjera J_k . Vertikalnu kroz tačku K do apscisne osi podijelimo u omjeru otpora statora i rotora. Spojnica s tačkom O predstavlja liniju momenta ili snage P_{12} , i odsijeca tačku klizanja $s = \infty$. Spojnica tačaka O i K predstavlja liniju mehaničke snage P_2 ,



Sl. 4-23

a apscisna os liniju primarne snage P_1 . Ne ulazeći u posebne konstrukcije za klizanje s i korisnost η , već i ovakav dijagram pruža sve podatke: struju I_1 i njezin fazni kut φ , pripadnu rotorsku struju $J_2 = J_1 - J_0$, snagu P_2 i P_{12} (mjeriti u smjeru tangente u tački O), snagu P_1 (mjeriti u smjeru ordinatne osi). Sve te dužine imaju dimenziju struje, pa treba svaku od njih množiti sa $m \cdot U$ da dobijemo snagu, odnosno $\frac{mU}{\omega l}$ da dobijemo moment. Osim već spomenutih veli-

čina dobivamo gubitke u statoru kao $P_1 - P_{12}$, gubitke u rotoru kao $P_{12} - P_2$, korisnost η kao P_2/P_1 , klizanje s kao $\frac{P_{12} - P_2}{P_{12}}$. Na taj način izgleda, kao da kružni dijagram pruža sve potrebne podatke, i da se sve karakteristike

motora mogu dobiti na osnovu dvaju jednostavnih pokusa, pokusa praznog hoda i kratkog spoja. Ako i ne uzmemo u obzir dosta slabu tačnost crtanja, ima ozbiljnih razloga, da se za ione tačniju analizu ne zadovoljavamo kružnim dijagramom, već želimo izmjeriti stvarne vrijednosti struje, snage, momenta, faktora snage, klizanja itd. pri opterećenju. Kružni dijagram slijedi naime iz istih jednačbi (1) u 4.3.2, ako se vrtnja rotora uzme u obzir na taj način, da se reaktancije rotora smanje u omjeru u kojemu se smanjila frekvencija okretnog polja u rotoru, tako da druga jednačba glasi:

$$-J_1 \cdot j \cdot s \cdot \omega \cdot L_{12} + J_2 R_2 + J_2 j s \omega L_2 = 0$$

ili što je isto :

$$-J_1 \cdot j \cdot \omega \cdot L_{12} + J_2 \left(\frac{R_2}{s} + j \omega L_2 \right) = 0$$

Ovaj izraz zajedno s prvom jednačbom :

$$J_1 (R_1 + j \omega L_1) - J_2 j \omega L_{12} = U$$

daje izraz za struju J_1 :

$$J_1 = U \cdot \frac{\frac{R_2}{s} + j \omega L_2}{(R_1 + j \omega L_1)(R_2/s + j \omega L_2) + \omega^2 L_{12}^2}$$

koji kod promjene klizanja s od $-\infty$ do $+\infty$ predstavlja kružni dijagram. Čitav ovaj dijagram zasniva se dakle na pretpostavci, da su reaktancije konstantne, što u stvari nije slučaj. Reaktancija glavnog magnetskog kruga jako pada sa zasićenjem, a zasićenje ovisi o padu napona u statorskom namotu, pa se mijenja s opterećenjem. Isto tako i rasipne reaktancije mijenjaju se s opterećenjem. Kad bi htjeli tačan kružni dijagram, morali bi snimiti prazni hod i kratki spoj upravo kod zasićenja koje odgovara određenom opterećenju, i takav kružni dijagram bi bio tačan samo za tu tačku. Za drugo opterećenje trebalo bi snimiti i crtati drugu kružnicu, itd.

Osim reaktancija mijenja se i djelatni otpor rotora uslijed potiskivanja struja. Te su promjene tolike, da kod dvokaveznih rotora, ili rotora s dubokim utorima, uopće više nema govora o kružnom dijagramu, već smo upućeni isključivo na direktno snimanje karakteristika.

Mjerenje u praznom hodu i kratkom spoju uz malen faktor snage uključuje priličnu pogrešku, pa su dvije osnovne tačke, iz kojih se izvodi čitav kružni dijagram, dosta nepouzđano snimljene. Pogotovo će to biti slučaj, ako nismo izmjerili struju kratkog spoja pri punom naponu, već smo je dobili ekstrapolacijom.

Iz svih tih razloga potrebno je direktno snimiti karakteristike opterećenja, a kružni dijagram može poslužiti samo u nekim slučajevima za orijentaciju.

4.4.1 Snimanje karakteristika opterećenja. Spoj instrumeta pri snimanju karakteristika ostaje isti kao na sl.4-3, uz izbor instrumenata, koji odgovaraju većim strujama i boljem faktoru snage pri opterećenju. Regulacija napona je i ovdje potrebna, kako bi se eliminirale varijacije napona mreže. Najbolje je upotrebiti za napajanje vlastiti sinhroni generator, tjeran istosmjernim motorom jer je time osigurano održavanje i napona i frekvencije na nazivnim vrijednostima u toku čitavog ispitivanja. Na osovini motora mjerimo opterećenje kočnicom ili strojem za opterećenje (4.4.3), i za svako opterećenje očitamo struju u sve tri faze i snagu, koju motor uzima iz mreže, te klizanje s . Veličine koje nas zanimaju pri opterećenju su sljedeće: 1) snaga koju motor uzima iz mreže P_1 , 2) struja iz mreže I_1 , 3) faktor snage $\cos \varphi$, 4) klizanje s , koje ujedno daje brzinu vrtnje n , 5) ukupni gubici P_g , 6) snaga na osovini P_2 , 7) korisnost η , i 8) zakretni moment M_2 , koji je raspoloživ na osovini stroja pri određenom pogonskom stanju.

Kao varijabla za unošenje svih ovih veličina u dijagrame upotrebljavala se često snaga na osovini P_2 . No kako ovu veličinu dobivamo tek nakon izračunavanja preko drugih veličina, mnogo je zgodnije nanositi na apscisu os veličinu P_1 , koju dobivamo direktno mjerenjem. Ne samo da na taj način sve veličine redom, kako ih izmjerimo odnosno izračunamo, možemo unositi u dijagram, već se mjerenje svake tačke može vrlo lako reproducirati prema očitavanju vatmetara.

Prije početka mjerenja motor treba da bude u pogonski topлом stanju, jer promjena otpora može znatno utjecati na karakteristike. Snagu P_1 direktno očitavamo s pomoću dva ili tri vatmetra. Struju I_1 dobivamo kao srednju vrijednost mjerenja u sve 3 faze:

$$I_1 = \frac{I_a + I_s + I_r}{3} \quad (1)$$

Faktor snage slijedi računski iz mjerenih vrijednosti:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_1} \quad (2)$$

Klizanje s mjerimo što je moguće tačnije jednom od metoda prema 4.4.2. Veza između brzine vrtnje n i klizanja s - uz sinhronu brzinu vrtnje n_1 - je sljedeća:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (3)$$

$$n = n_1 (1 - s) \quad (4)$$

Gubitke P_g računamo u skladu s propisima, kako će to biti u 4.5 pobliže izloženo, uz pretpostavku da dodatni gubici iznose 0,5 % P_1 kod nazivnog opterećenja, i da se

mijenjaju proporcionalno sa statorskom strujom na kvadrat.

Snagu na osovini dobivamo odbijanjem ukupnih gubitaka od snage iz mreže :

$$P_2 = P_1 - P_g \quad (5)$$

Odatle odmah slijedi korisnost :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{P_g}{P_1} \quad (6)$$

Napokon, zakretni moment M_2 slijedi iz snage na osovini :

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{P_2}{n} = \frac{60}{2\pi n_s} \cdot \frac{P_2}{1-s} \quad (7)$$

Taj je moment manji od momenta u zračnom rasporu $M = \frac{P_{12}}{\omega_1}$ za veličinu momenta, kojim mehanički gubici koče motor:

$$M_2 = M - M_{meh} \quad (8)$$

Potrebna korekcija za iznos M_{meh} vrlo je mala, jer su gubici P_{meh} mali u usporedbi s P_2 , pa se često identifikira moment izračunat iz P_{12} s momentom mjerenim na osovini.

Kod crtanja dijagrama opterećenja (sl.4-24) obično unosimo pravac $P_1 = f(P_2)$ zbog bolje preglednosti veličina P_1 i P_2 . Krivulja P_2 počinje od tačke na apscisnoj osi, koja predstavlja prazni hod, u kojoj snaga iz mreže P_1 upravo pokriva gubitke praznog hoda P_g . Sve karakteristike počinju dakle od te vrijednosti apscise, ako se ograničimo na normalni motorski pogon. Dalje na lijevo, za idealni prazni hod, a zatim za generatorsko područje rada, trebalo bi asinhronom motoru dovoditi snagu na osovini.

Uz isto mjerilo za P_1 , P_2 i P_g bit će karakteristika P_1 pravac pod 45° . Krivulja gubitaka P_g početi će na pravcu P_1 u tački praznog hoda $P_g = P_g$. Ova krivulja postaje sve strmija, i kad njezina tangenta postane paralelna s pravcem P_1 , onda je prema jednadžbi (5) :

$$\frac{dP_2}{dP_1} = \frac{dP_1}{dP_1} - \frac{dP_g}{dP_1} = 0 \quad (9)$$

tj. krivulja snage na osovini P_2 ima na tom mjestu maksimum.

Snaga na osovini počinje vrijednošću nula u praznom hodu, a svaka tačka krivulje P_2 predstavlja razliku ordinata P_1 i P_g .

Korisnost η počinje vrijednošću 0 u praznom hodu, a tačku maksimalne korisnosti η dobivamo deriviranjem jednadžbe (6) :

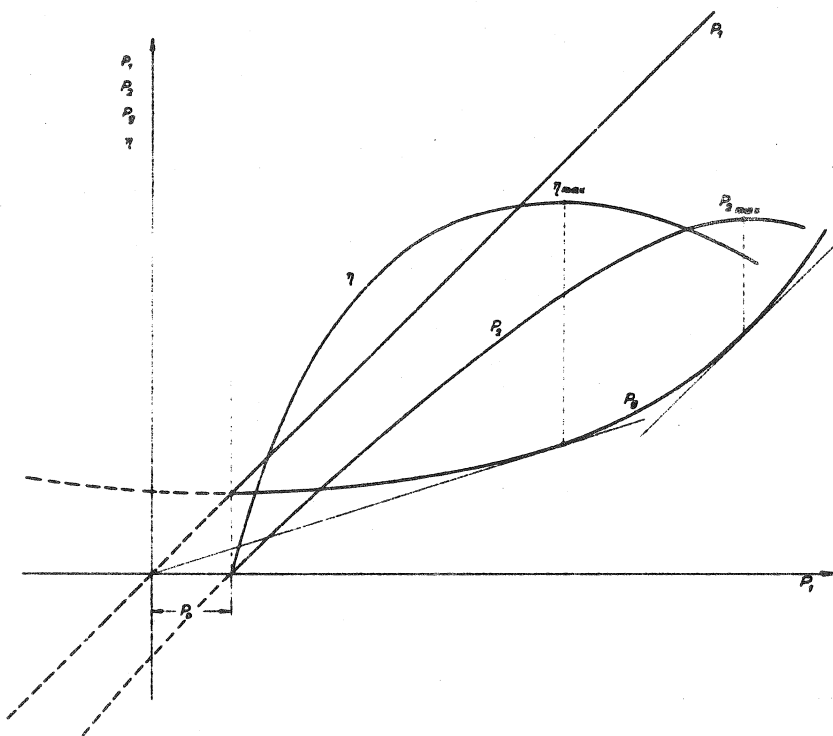
$$\frac{d\eta}{dP_1} = 0$$

iz čega slijedi :

$$P_1 \cdot \frac{dP_2}{dP_1} - P_2 \cdot \frac{dP_1}{dP_1} = 0$$

$$\frac{dP_2}{dP_1} = \frac{P_2}{P_1} \quad (10)$$

tj. maksimalna korisnost odgovara tački u kojoj pravac iz ishodišta tangira krivulju $P_2 = f(P_1)$.



Sl. 4-24

Ostale karakteristike nacrtane su zbog preglednosti u poseban dijagram (sl. 4-25). Struja I_1 počinje od vrijednosti struje praznog hoda I_0 , a isto i faktor snage od vrijednosti $\cos \varphi_0$. Klizanje počinje od vrijednosti u praznom hodu, koja je praktički jednaka nuli, pa raste skoro linearno, no kasnije nešto strmije. Brzina vrtnje smanjuje se u istom smislu. Zakretni moment počinje od nule u praznom hodu. Maksimalnu vrijednost, tj. prekretni moment dobit ćemo onda, kada bude :

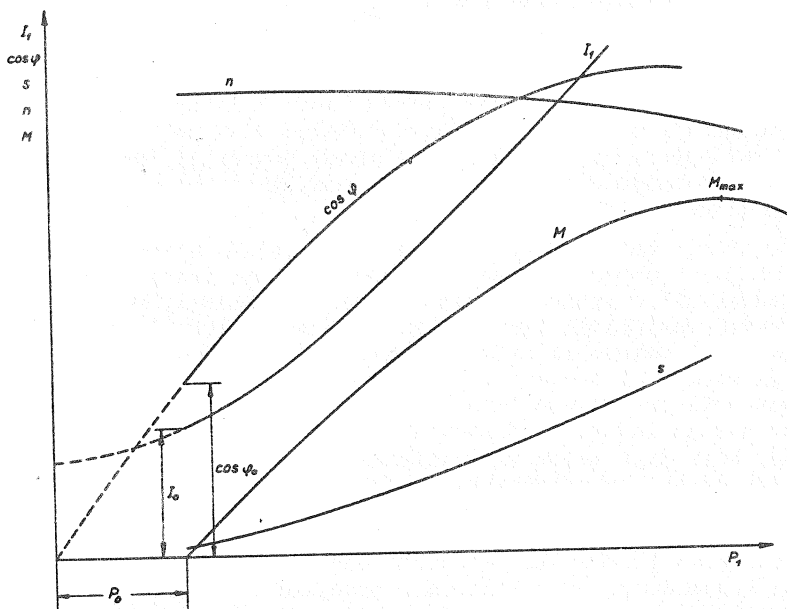
$$\frac{d}{dP_1} \left(\frac{P_2}{n} \right) = 0 \quad (11)$$

što daje :

$$n \cdot \frac{dP_2}{dP_1} - P_2 \cdot \frac{dn}{dP_1} = 0$$

$$\frac{dP_2}{dP_1} = \frac{P_2}{n} \cdot \frac{dn}{dP_1} \quad (12)$$

Pošto brzina vrtnje n pada s opterećenjem, bit će $\frac{dn}{dP_1}$ uvijek negativno, pa će prekretni moment nastupiti uvijek P_1 uz



Sl. 4-25

negativnu vrijednost dP_2/dP_1 , tj. nakon maksimalne snage. Tačka maksimalnog momenta leži dakle uvijek kod većeg opterećenja od tačke maksimalne snage na osovini. Vrijednost maksimalnog momenta vrlo je važna. Pošto se može dogoditi, da opterećenje bude pri tom odviše veliko, a da bi mogli snimiti karakteristike i u tom području, često mjerimo prekretni moment u okviru snimanja momentne linije prema 4.4.7 bez obzira na ostale karakteristične veličine.

4.4.2 Mjerenje klizanja. Brzina asinhronog motora u pogonu mijenja se tek vrlo malo, pa se za praktičke svrhe u prvoj aproksimaciji uzima konstantnom, i jednakom sinhronoj brzini :

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (1)$$

To prilično tačno vrijedi za neopterećeni motor. Kod punog opterećenja, međutim, brzina se smanjuje za nekoliko postotaka, u ovisnosti o veličini i konstrukciji motora. Ova razlika sinhronne brzine i brzine pri opterećenju u području od praznog hoda do punog opterećenja približno je proporcionalna momentu opterećenja, a izražava se u postocima sinhronne brzine i naziva klizanjem :

$$s \% = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (2)$$

Ovakovo predočavanje brzine vrtnje preko klizanja ne samo što omogućuje mnogo tačnije predočavanje stvarne brzine vrtnje kod opterećenja, već daje i mnogo pogodniji parametar za izračunavanje karakteristika i gubitaka te za određivanje pogonskog stanja motora.

Mjerenje klizanja može se izvršiti tačnim mjerenjem brzine vrtnje, i usporedbom sa sinhronom brzinom vrtnje, prema jednadžbi (2) . Brzinu vrtnje mjerimo tahometrom. Postoje tahometri različitih izvedbi, koje se mogu svrstati u četiri grupe : 1) tahometri na bazi mjerenja centrifugalne sile s pomoću pera, 2) tahometri na bazi mjerenja momenta, što ga izvođe vrtložne struje u rotirajućoj ploči na polove magneta, koji te struje inducira, 3) tahogenerator s konstantnim magnetskim tokom, koji daje napon proporcionalan brzini vrtnje, i 4) tahometri na bazi elektronskog brojača (countera), koji broji impulse u jedinici vremena. Tačnost tahometara, izuzev onih pod 4), doseže u povoljnom slučaju 1 % . Razlog je toj relativno slaboj tačnosti mehanička osjetljivost konstrukcije, zatim temperaturna osjetljivost, promjene svojstava materijala uslijed starenja, itd. Razumljivo je, da ovakova tačnost pri mjerenju brzine n , koja se od n_1 vrlo malo razlikuje, nije dovoljna, pa se ovakav tahometar i ne upotrebljava kod klizanja manjih od 5-6 %.

Tahometri na bazi elektronskog brojača mogu se napraviti vrlo tačni. Elektronskim brojačem brojimo impulse u određenom vremenskom intervalu. Impuls daje mali davač na osovinu stroja, no može se izvesti i davač impulsa s pomoću fotoćelije i svjetlosne zrake, koja se reflektira od svjetlog znaka na osovinu, ili se prekida zaslonom na osovinu. Na taj način davač mehanički ne opterećuje ispitivani stroj, što je važno kod vrlo malih jedinica. Brojanje impulsa je potpuno tačno, pa tačnost mjerenja brzine vrtnje ovisi samo o tačnosti kojom mjerimo vrijeme. Ako jedan okretaj osovine daje k impulsa onda će N registriranih impulsa u vremenu T zna-

čiti brzinu vrtnje :

$$n = \frac{60 \cdot N}{k \cdot T} \quad (3)$$

Ako sa Δ označimo relativnu pogrešku pri mjerenju vremena T , a sa Δ_r uz odgovarajući indeks relativnu pogrešku pri određivanju brzine vrtnje i klizanja, bit će mjerena brzina :

$$n_{mj} = n(1 + \Delta_r) = \frac{60 \cdot N}{kT(1 + \Delta)} \quad (4)$$

iz koje slijedi klizanje :

$$S_{mj} = S(1 + \Delta_s) = \left(\frac{n_s - n}{n_s} \right)_{mj} \quad (5)$$

Sinhrona brzina n_s treba da bude ona sinhrona brzina, koja odgovara stvarnoj frekvenciji mreže f za vrijeme ispitivanja, a ne nazivnoj frekvenciji mreže f_n , tj. ne treba uvrstiti nazivnu sinhronu brzinu vrtnje :

$$n_{sn} = \frac{60}{p} \cdot f_n \quad (6)$$

nego stvarnu :

$$n_s = \frac{60}{p} \cdot f \quad (7)$$

Ovu stvarnu sinhronu brzinu vrtnje treba odrediti mjerenjem, i to u isto vrijeme dok mjerimo i brzinu vrtnje n , kako ne bi došlo do greške uslijed variranja u frekvenciji mreže. Ako brojačem registriramo pozitivne poluperiode napona mreže kroz isto vrijeme T_{mj} u kojemu smo mjerili i brzinu vrtnje n , dobit ćemo broj impulsa :

$$N_s = T_{mj} \cdot f \quad (8)$$

iz kojeg slijedi sinhrona brzina :

$$n_{smj} = \frac{60}{p} \cdot \frac{N_s}{T_{mj}} \quad (9)$$

Klizanje dobiveno iz ovakvih mjerenja bit će :

$$S_{mj} = \left(\frac{n_s - n}{n_s} \right)_{mj} = \frac{\frac{60}{p} \cdot \frac{N_s}{T_{mj}} - \frac{60 \cdot N}{k \cdot T_{mj}}}{\frac{60}{p} \cdot \frac{N_s}{T_{mj}}} = \frac{\frac{N_s}{p} - \frac{N}{k}}{\frac{N_s}{p}} \quad (10)$$

Očito je ovakvom metodom eliminirana ne samo pogreška uslijed varijacija frekvencije mreže, nego i pogreška mjerenja vremena T . Potrebno je samo da vrijeme T bude dovoljno dugačko prema razmaku impulsa, a to je lako postići. Ovakav uređaj ipak je dosta kompliciran, i dolazi u obzir samo kad se zahtijeva specijalna tačnost, dok se kod svakodnevnih rutinskih mjerenja rijetko susreće.

Kod ne prevelikih klizanja mjerenje se može vršiti tako,

usporedi s frekvencijom mreže :

$$f_2 = s \cdot f_1 \quad (11)$$

$$s = \frac{f_2}{f_1} \quad (12)$$

Kod kolutnih motora mjerenje f_2 lako je provedivo. Potrebno je priključiti dovoljno osjetljiv voltmetar na dva rotorska izvoda. Čak i u slučaju da su kolutovi direktno spojeni uredjajem za kratko spajanje, padovi napona bit će dovoljni, da voltmetar njiše frekvencijom rotorskih struja. Ako je upotrebljen voltmetar sa zakretnim svitkom za mjerenje istosmjernih napona, brojanjem pozitivnih otklona u vremenu T dobivamo broj cijelih perioda u tom vremenu, pa je prema tome :

$$f_2 = \frac{N}{T} \quad (13)$$

Ako je upotrebljen voltmetar za mjerenje izmjeničnih napona - s mekanim željezom, elektrodinamski, ili s ispravljačem - broj pozitivnih otklona identičan je s brojem poluperioda, pa vrijedi :

$$f_2 = \frac{N}{2T} \quad (14)$$

Kavezni motori ne dopuštaju direktno mjerenje frekvencije u rotoru, ali se vrlo često može ta frekvencija indirektno izmjeriti. Oblik rasipnih polja mijenja se, naime, zbog nesimetrija i nesavršenosti u izvedbi, i ovisi o međusobnom položaju statorskog okretnog polja i rotora. Promjene rasipnog polja pokazuju periodičnost, i to s onom frekvencijom, s kojom se periodički mijenja taj međusobni položaj. To je upravo frekvencija f_2 . Ako dakle u blizini ležajnog štita postavimo svitak s nekoliko stotina zavoja, u njemu će se inducirati napon frekvencije mreže, kojemu je superponiran napon frekvencije f_2 . Na taj svitak možemo priključiti galvanometar, i odrediti f_2 na isti način kao kod mjerenja na kliznim kolutima. Često su varijacije rasipnog polja tako velike, da je dovoljno približiti magnetsku iglu ležajnom štitu, i brojiti njene njihaje kroz određeno vrijeme, pa odatle izračunati frekvenciju rotorskih struja f_2 .

Najčešće upotrebljavana metoda za mjerenje klizanja je stroboskopska metoda. Zasniiva se na promatranju rotacije u periodički isprekidanoj rasvjeti. Ako se svjetlosni impulsi periodički ponavljaju u vremenskim razmacima T_1 (sl.4-26a), tj. frekvencijom :

$$f_1 = \frac{1}{T_1} \quad (15)$$

pokazati će se slika radijalne crte na ploči koja rotira
 (sl. 4-26b) kao da se ova međusobno pokreće

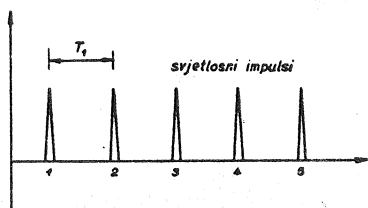
nutih za kut α_1 , gdje je :

$$\alpha_1 = \omega \cdot T_i \quad (16)$$

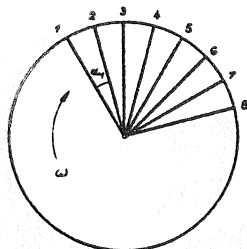
Ako je kvocijent punog kuta 2π i kuta α_1 cijeli broj :

$$\frac{2\pi}{\alpha_1} = K \quad (17)$$

slika radijalne crte pojavljivat će se kod svakog okreta na



a)



b)

Sl. 4-26

istim mjestima, pa će promatrač, uslijed tromosti oka, vidjeti mirnu sliku zvijezde sa K krakova, gdje je :

$$K = \frac{2\pi f_1}{\omega} \quad (18)$$

Iz broja krakova K i frekvencije bljeskova f_1 može se odrediti brzina ploče :

$$n = \frac{60 \cdot \omega}{2\pi} = \frac{60 \cdot f_1}{K} \quad (19)$$

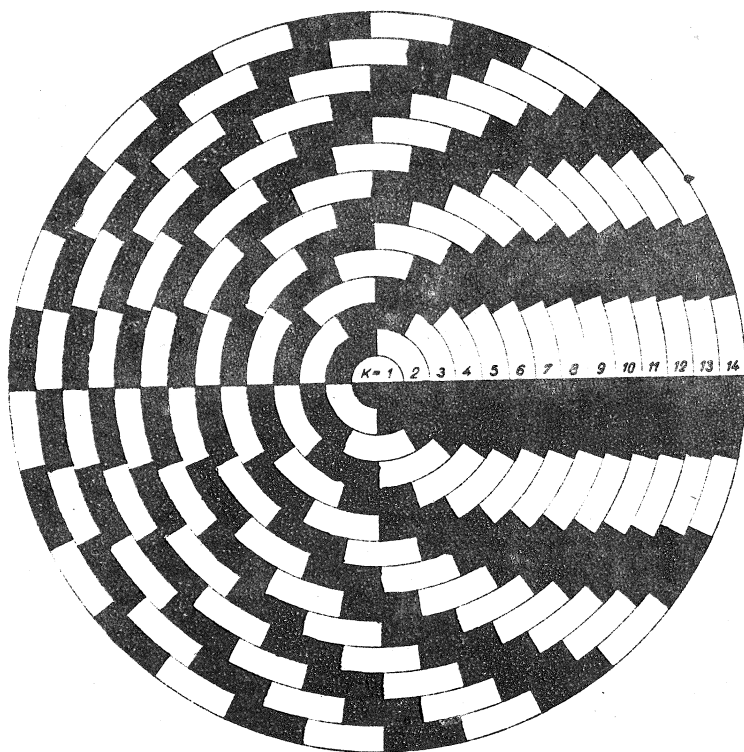
Mnogi stroboskopski uređaji građeni su tako, da se frekvencija f_1 može kontinuirano mijenjati, i direktno očitavati na za to predviđenoj skali. Brzina vrtnje može se odrediti prema izrazu (19), no najzgodnije je udesiti frekvenciju tako, da se vidi samo jedna mirna crta, tj. da bude $K = 1$. Onda je :

$$n = 60 \cdot f_1 \quad (20)$$

Ne smije se zaboraviti, da istu sliku daju i frekvencije $\frac{f_1}{2}$, $\frac{f_1}{3}$ itd., pa treba mjerenje provesti tako, da se frekvencija f_1 smanjuje, dok broj krakova zvijezde prvi puta ne spadne na 1. Prava frekvencija f_1 je dakle ona najviša frekvencija, kod koje se dobiva samo 1 krak zvijezde.

Mjerenje brzine vrtnje, bar približno, može se izvesti i uz stroboskopsku rasvjetu konstantne frekvencije f_1 upo-

trebam stroboskopske ploče prema sl. 4-27. Ako brzina vrtnje n ploče odgovara broju krakova K iz izraza (19),



Sl. 4-27

onda će pojas kruga, koji je podijeljen na K crnih i K bijelih segmenata, prividno mirovati. Mirovati će i pojas s $2K$, $3K$... segmenata, pa je potrebno ustanoviti, koji najniži pojas miruje. Brzina vrtnje n slijedi onda iz izraza (19). Ako imamo - što je najčešće - izvor koji bljesne u svakoj poluperiodi napona mreže, dakle $f_1 = 100$, bit će brzine koje odgovaraju broju K :

Tabela 4.4-1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	itd.
6000	3000	2000	1500	1200	1000	857	750	667	600	546	500	461	428	itd.

To su brzine, koje se mogu direktno izmjeriti na ovaj način. Kod nižih brzina raspodjela je sve finija, dok je kod viših brzina vrlo gruba. Kad bi htjeli dobiti veći broj mjerenja u odredjenom području, trebalo bi povisiti frekvenciju f_1 i broj pari segmenata K . Tako npr. u području od 1500 do 1000 o/min možemo mjeriti 3 tačke ($K=4, 5$ i 6) ako je $f_1 = 100$ l/sek. Ako uzmemo $f_1 = 1000$ l/sek, dobivamo 21 tačku ($K=40$ do $K=60$).

Prednosti stroboskopske metode dolaze do punog izražaja upravo tamo, gdje želimo izmjeriti mala odstupanja brzine vrtnje od sinhronne brzine, kao što je to slučaj kod mjerenja klizanja asinhronog motora. Frekvenciju stroboskopa povezujemo u tom slučaju kruto s frekvencijom mreže na koju je priključen ispitivani motor. To se postiže tako, da živinu svjetiljku, koja daje bljeskove, napajamo preko elektronskog uređaja, kojemu daje takt frekvencija mreže f . Obično radimo s paljenjem u svakoj poluperiodi, tako da je :

$$f_1 = 2f \quad (21)$$

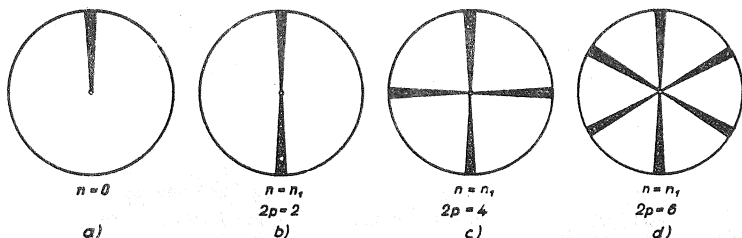
ali se može raditi i s paljenjem u svakoj pozitivnoj poluperiodi, tj. $f_1 = f$. Drugi je način, da se konstantna svjetlost prekida zaslonom s odredjenim brojem rupa N_z , koji vrtimo sinhronom motorom s brojem pari polova f_z , dakle sinhronom brzinom :

$$n_z = \frac{60 \cdot f}{p_z} \quad (22)$$

U tom je slučaju frekvencija bljeskova :

$$f_1 = \frac{n_z \cdot N_z}{60} = \frac{N_z}{p_z} \cdot f \quad (23)$$

Ako na spojnici asinhronog motora povučemo radijalno crtu prema sl. 4-28a, i promatramo zatim spojku u stroboskopskoj rasvjeti uz $f_1 = 2f$, dobit ćemo pri sinhronoj brzini (što je praktički slučaj u praznom hodu) zvijezdu s toliko



Sl. 4-28

krakova, koliko motor ima polova. Od bljeska do bljeska,

dakle u jednoj poluperiodi, rotor se ~~na~~ine zakrene upravo za jedan polni razmak (sl.4-28b-d). Kutna brzina rotora iznosi:

$$\omega = \frac{2\pi f}{p} \quad (24)$$

pa je kut zakreta α_1 između dva bljeska (sl.4-29a) :

$$\alpha_1 = \omega \cdot T_1 = \frac{2\pi f}{p \cdot f_1} = \frac{\pi}{p} \quad (25)$$

a broj krakova zvijezde:

$$K = \frac{2\pi}{\alpha_1} = 2p \quad (26)$$

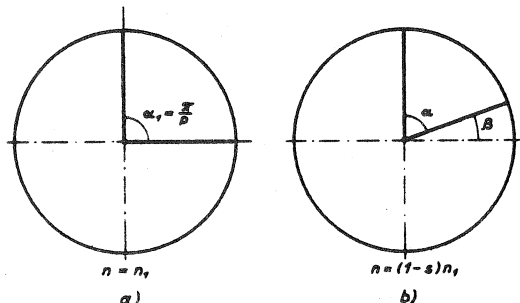
Kod opterećenja brzina će se smanjiti na $n = (1-s)n_1$, pa će i kut zakreta između dva bljeska biti u istom omjeru manji (sl.4-29b) :

$$\alpha = (1-s) \cdot \alpha_1 \quad (27)$$

Do prvobitnog položaja pod kutom α_1 nedostajati će još kut:

$$\beta = \alpha_1 - \alpha = s \cdot \alpha_1 \quad (28)$$

Pri svakom bljesku ovo zaostajanje će se povećavati za taj



Sl. 4-29

isti iznos, pa će se stroboskopska slika okretati unazad brzinom:

$$\omega = \frac{\beta}{T_1} = \frac{s \cdot \alpha_1}{T_1} = s \cdot \frac{\pi}{p} \cdot 2f = s \cdot \omega_1 \quad (29)$$

$$n = s \cdot n_1 \quad (30)$$

Kod malih klizanja - do cca 5 % - može se brojanjem okretaja stroboskopske slike uz mjerenje vremena stop-ujem odrediti brzina vrtnje kojom rotor klizi prema statoru. Uz N okretaja kroz vrijeme T bit će :

$$n = s n_1 = \frac{N}{T} \cdot 60 \quad (31)$$

$$s\% = \frac{N}{T} \cdot \frac{60}{n_s} \cdot 100 = \frac{2pN}{T} \quad (32)$$

Izraz $N' = 2pN$ u brojniku predstavlja broj krakova zvijezde, koji prođu kraj određene marke uz obod spojke u vrijeme T , pa se često postupa tako, da se broji prolaze krakova N' , i računa :

$$s\% = \frac{N'}{T} \quad (33)$$

Što vrijedi uz frekvenciju bljeskova $f_1 = 2f$, odnosno.

$$s\% = \frac{2N'}{T} \quad (34)$$

Što vrijedi uz $f_1 = f$. Prolaz svakog kraka kraj marke označava u prvom slučaju poluperiodu, a u drugom slučaju čitavu periodu rotorske frekvencije. Bilo da brojimo periode rotorske frekvencije stroboskopski, bilo da ih određujemo kojim drugim načinom, uz $f_1 = 50$ Hz uvijek se možemo poslužiti praktičkim pravilom, koje slijedi iz izraza (12), i uz $T = 20$ sek; ako brojimo čitave periode rotorske frekvencije kroz 20 sekundi, klizanje u postocima je jednako desetini dobivene brojke:

$$s\% = \frac{N}{T} \cdot \frac{1}{f_1} \cdot 100 = \frac{N}{20 \cdot 50} \cdot 100 = \frac{N}{10} \quad (35)$$

Razmotrimo sada slučaj stroboskopske rasvjete s pomoću sinhronog motora i zaslona. Frekvencija bljeskova određena je izrazom (23). Kut α_1 za koji se zakrene rotor ispitivanog stroja sa p pari polova bit će :

$$\alpha_1 = \omega \cdot t_1 = \frac{2\pi f}{p} \cdot \frac{1}{f_1} \quad (36)$$

Da dobijemo u sinhronizmu mirnu sliku mora biti ispunjen uvjet:

$$\frac{2\pi}{\alpha_1} = K = \text{cijeli broj} \quad (37)$$

Broj krakova K bit će dakle :

$$K = p \cdot \frac{f_1}{f} = \frac{p}{p_z} \cdot N_z \quad (38)$$

U slijedećoj tabeli prikazan je najmanji mogući broj rupa na zaslonu N_z i broj krakova zvijezde K koji tome odgovara, pri upotrebi sinhronog motora s brojem pari polova $p_z = 1$ do 4, i pri ispitivanju asinhronih motora različitim brzinama.

Tabela 4.4-2

p =	1	2	3	4	5	6	7	8
$p_z = 1$	$\frac{N_z}{K} = 1/1$	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8
2	2/1	1/1	2/3	1/2	2/5	1/3	2/7	1/4
3	3/1	3/2	1/1	3/4	3/5	1/2	3/7	3/8
4	4/1	2/1	4/3	1/1	4/5	2/3	4/7	1/2

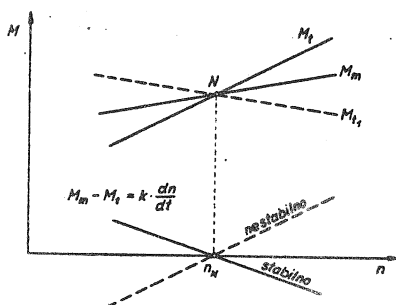
Ista razmatranja koja su dovela do izraza (29) i (30) pokazuju i ovdje, da će stroboskopska slika zaostajati brzinom klizanja $s \cdot n_1$. Razlika je samo u tome, što broj krakova zvijezde sada nije $2p$ odnosno p , već K prema (38). Sada je broj prolaza :

$$N' = K \cdot N = \frac{p}{p_z} \cdot N_z \cdot N \quad (39)$$

pa je klizanje konačno:

$$s\% = 60 \cdot \frac{N}{T} \cdot \frac{1}{n_1} \cdot 100 = \frac{N'}{T} \cdot \frac{2 p_z}{N_z} \quad (40)$$

4.4.3 Metode opterećenja. Da bi mogli očitavati tačke karakteristika opterećenja, potrebno je opteretiti motor na osnovini mehaničkim momentom, koji možemo po volji smanjiti ili povećati, i time udesiti opterećenje upravo ono koje želimo. Pri tome je potrebno, da opterećenje bude stabilno, tj. da se udešena vrijednost može bez poteškoća održavati za vrijeme mjerenja. Opterećenje nazivamo stabilnim onda, kad pri odstupanju brzine od udešene vrijednosti, do kojega može doći s bilo koga razloga, rezultira ukupni moment takvog predznaka, da vraća motor u prvotno pogonsko stanje. Prema sl.4-30 vidimo, da će pogonska tačka N biti određena sjecištem krivulje momenta tereta $M_t = f(n)$ i krivulje momenta motora $M_m = f(n)$. Kod odstupanja od brzine n_N rezultira višak momenta :



$$\begin{aligned} \Delta M &= M_m - M_t = \frac{GD^2}{4} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \\ &= \frac{GD^2}{38,3} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1) \end{aligned}$$

koji je prikazan krivuljom s nul-tačkom kod brzine n_N .
U odstupanju od brzine n_N

je negativno kod povećanja brzine, pa će negativna akceleracija vraćati rotor u pogonsko stanje pri n_N , i obrnuto,

M je pozitivno kod smanjenja brzine, pa će pozitivna akceleracija i opet vraćati rotor u tačku opterećenja pri n_N . Kad bi imali drugačiju karakteristiku opterećenja, kao M_N na sl.4-30 (ortkana krivulja), dobili bi sve veću brzinu n kod najmanjeg povećanja, i sve manju kod najmanjeg smanjenja od početne vrijednosti n_N . I u jednom i u drugom slučaju motor se ne bi vratio u početno stanje opterećenja, definirano brzinom n_N , već bi prešao u neko novo pogonsko stanje. Kriterij za stabilnost opterećenja je očito:

$$\frac{\Delta M_t - \Delta M_m}{\Delta n} > 0 \quad (2)$$

ili što je isto :

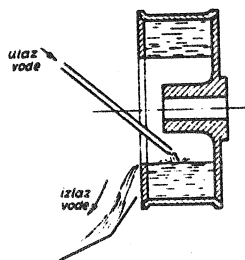
$$\frac{d M_t}{d n} > \frac{d M_m}{d n} \quad (3)$$

Za opterećenje stroja mogu poslužiti različite kočnice, gdje se snaga koju motor predaje na osovini pretvara u toplinu u samoj kočnici, ili priključeni električki generator, koji prima snagu na osovini, te je šalje bilo u mrežu, bilo je pretvara u toplinu u vanjskim otpornicima za opterećenje. Poseban je slučaj dinamo-vaga, koja osim mogućnosti opterećenja motora i pogona generatora pruža još mogućnost direktnog očitavanja zakretnog momenta na osovini.

4.4.4 Kočnice. Najjednostavnije su mehaničke kočnice, gdje se kočni moment stvara trenjem na remenici motora. Čitava mehanička snaga pretvara se pri tome u toplinu na samom obodu remenice. Kod vrlo malih snaga i kod kratkotrajnog mjerenja odvod ove topline ne predstavlja teškoću, ali što je veća snaga, to je teže odvesti toplinu. Po podacima iz praktičkog iskustva potrebna je tarna površina remenice od najmanje 800-900 cm² po 1 kW kočene snage kod zračnog hladjenja, a 200-400 cm²/kW kod hladjenja vodom. Hladjenje vodom vrši se na unutarnjem obodu remenice, koja je tako formirana, da voda ne istječe bilo kuda sa strane (sl.4-31), već kroz podmetnuti lijevak. Svježa voda stalno se pušta u remenicu, tako da zagrijanje vode u remenici ne prekorači 20 - 25 °C.

Prony-jeva kočnica (sl.4-32) ima dvije drvene čeljusti, koje obuhvaćaju remenicu i pritežu se sa dva ručna vijka. Jačim ili slabijim pritezanjem udešava se sila trenja, a time i moment opterećenja. Krak kočnice može se nasloniti na vagu, i na taj način direktno mjeriti moment $P \cdot l$. Ovome momentu treba pribrojiti moment trenja zraka i event. rashladne vode na remenici, koji se dobiva haždarenjem.

Jednostavna je pojava kočnica, s utezima ili pernim vagama na obe strane pojasa (sl.4-33). Osiguračem O treba se osigurati protiv neočekivanog prebacivanja utega preko remenice.

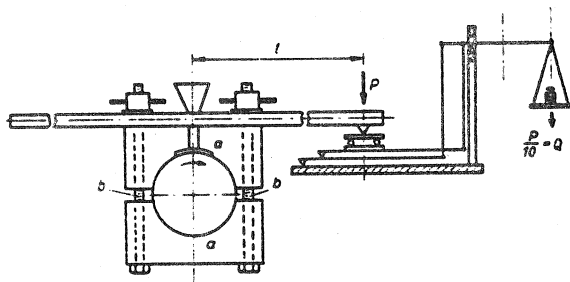


Sl.4-31

Za veća opterećenja prikladna je užna kočnica prema sl.4-34 . Opterećenje mijenjamo povećanjem utega G . Na suprotnoj strani mjerimo pernom vagom silu F . Od te sile treba još odbiti težinu G_1 dijelova za pričvršćenje, pa je ukupna sila na obodu $G - (F - G_1)$, a krak na kojemu djeluje jednak je polumjeru remenice r povećanom za polovicu promjera užeta $d/2$, jer silu mjerimo u osi užeta. Slično se može teretiti vrlo male moto-

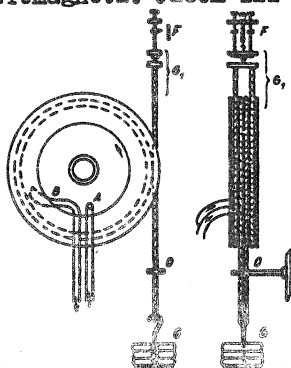
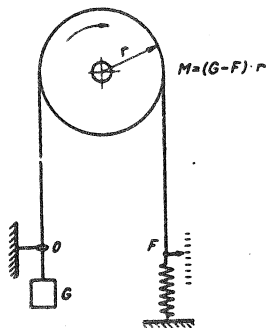
re uz mjerenje momenta na osovini, ako ovijemo konac oko remenice ili direktno oko osovine, i zatežemo ga s dvije perne vage.

Za male motore prikladna je i kočnica s vrtložnim strujama. Na osovinu motora navučena je puna aluminijska ploča,



Sl. 4-32

koja rotira između polova elektromagneta. Jačom ili slabijom



jon uzbuđen magneta postiže se jači ili slabiji moment kočenja uslijed vrtložnih struja. Ako se elektromagnet izvede tako, da se može zakretati oko osi vrtnje motora, može se na njemu vagati zakretni moment.

Kod većih snaga dolaze u obzir vodene vrtložne kočnice na principu trenja ploče s rebrima koja rotira u tekućini, ili hidrauličke kočnice turbinskog tipa, no u ispitnoj stanici električkih strojeva za opterećenje se najčešće upotrebljavaju električki strojevi.

4.4.5 Generator za opterećenje. Kao generator za opterećenje može se upotrebiti istosmjerni stroj ili sinhroni stroj. U oba slučaja može se snaga, koju daje generator slati u mrežu, ili poništiti u otpornicima za opterećenje.

Istosmjerni generator, uzbuđen tako, da mu je magnetski tok jednak ϕ , pri struji armature I , suprotstavljati će se pogonu na osovini momentom :

$$M = k \cdot \phi \cdot I \quad (1)$$

gdje je k konstanta karakteristična za namot stroja. Uslijed pada napona u otporu armature IR_a i na četkicama (cca 2V), bit će inducirani napon E veći od napona U mreže na koju opterećujemo generator :

$$E = U + 2 + IR_a \quad (2)$$

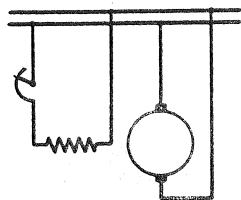
Inducirani napon vezan je s brzinom vrtnje:

$$E = k_f \cdot \phi \cdot n \quad (3)$$

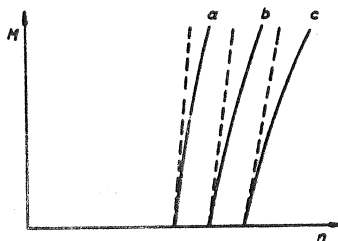
Iz gornja tri izraza slijedi veza brzine vrtnje i momenta :

$$n = \frac{U+2}{k_f \phi} + \frac{R_a}{k_f k \phi^2} M \quad (4)$$

Prvi član predstavlja brzinu vrtnje u praznom hodu. Kad bi tok ϕ bio konstantan, karakteristika momenta bi bila prikazana crtkanim krivuljama a, b, c ... na sl. 4-35, pri čemu



a)



b)

a odgovara najvećoj uzbuđnoj struji, a za krivulje b, c... se uzbuđna struja smanjuje. U stvari će se uslijed reakcije armature kod veće struje I - dakle kod većeg momenta M - tok ϕ smanjiti, pa će karakteristike skretati kao što pokazuju puno izvučene linije. Promjenom napona mreže U mogu se pomicati karakteristike - povišenjem u desno, sniženjem u lijevo.

Istosmjerni generator opterećen na otpornike ponaša se drugačije. Umjesto konstantnog napona U imamo ovdje na stezaljkama :

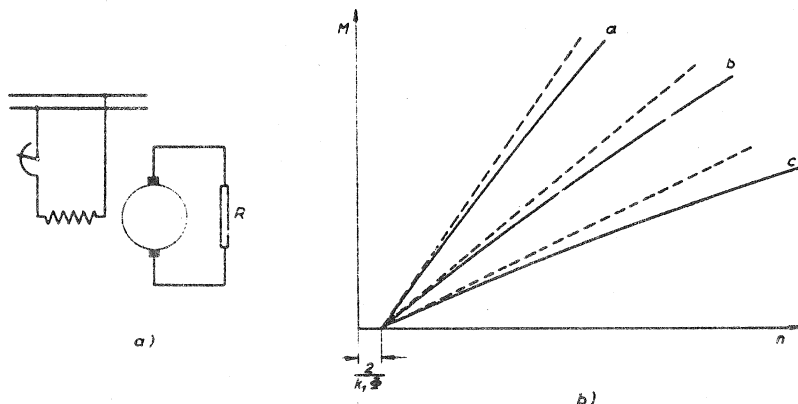
$$U = IR \quad (5)$$

gdje je R otpor opterećenja. S time prelazi gornji izraz u:

$$n = \frac{2}{k_1 \phi} + \frac{R + R_a}{k_1 k \phi^2} \cdot M \quad (6)$$

Karakteristike su prikazane na sl. 4-36, za različite omjere

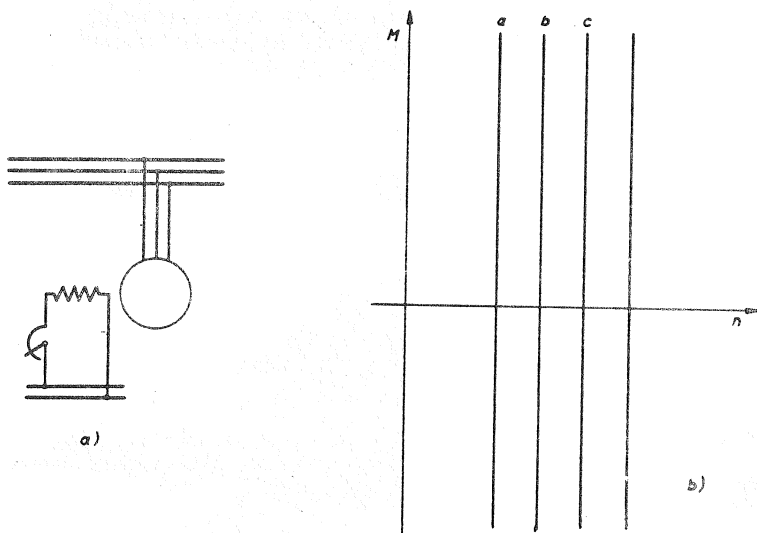
$\frac{R + R_a}{k_1 k \phi^2}$, pri čemu za crtkane krivulje vrijedi pretpostavka konstantnog toka ϕ , dok je za izvučene krivulje uzet u obzir utjecaj slabljenja toka zbog reakcije armature. Krivu-



Sl. 4-36

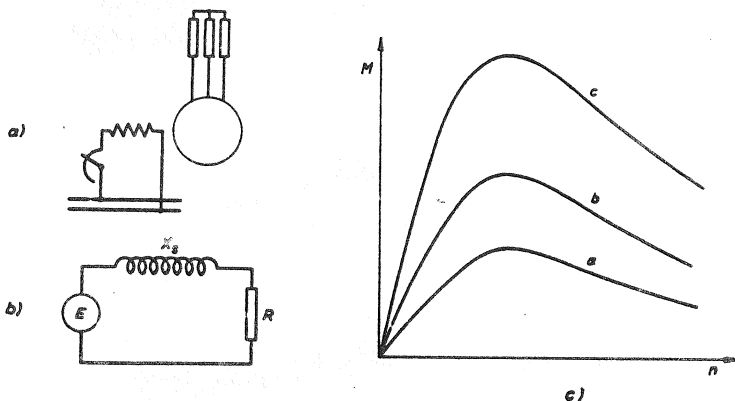
lje a odgovaraju manjem otporu, dok b, c, ... odgovaraju sve većem otporu opterećenja. Povećanje otpora djeluje slično kao smanjenje uzbuđe, s tom razlikom, što će pri smanjenoj uzbuđi reakcija armature doći jače do izražaja i što će odsječak na apscisnoj osi $\frac{2}{k_1 \phi}$ kod sve manjih uzbuđi biti sve veći, dok se kod povećanja otpora R neće mijenjati. Uzbuđni namot treba priključiti nezavisno na konstantan napon, kako ne bi uzbuđa ovisila o naponu na stezaljkama U .

Sinhroni generator priključen na mrežu konstantne frekvencije ne će mijenjati brzinu vrtnje kod promjene opterećenja. Udešavanje brzine možemo izvršiti jedino promjenom frekvencije mreže. Karakteristike su prikazane na sl. 4-37, pri čemu redoslijed a, b, c ... odgovara rastućoj frekvenciji.



Sl. 4.-37

Potpuno su različite karakteristike sinhronog generatora opterećenog na otpornike (sl.4-38). Prema nadomjesnoj shemi, struja se može izračunati iz vrijednosti induciranog



Sl. 4-38

napona E - koji je određivan udešenom uzbudnom strujom i brzinom vrtnje n - te iz sinhronne reaktancije X_s pri brzini n i otpora opterećenja R kao :

$$I = \frac{E_n}{\sqrt{R^2 + X_{sn}^2}} = \frac{E \cdot \frac{n}{n_1}}{\sqrt{R^2 + X_s^2 \left(\frac{n}{n_1}\right)^2}} \quad (7)$$

gdje su E i X_s vrijednosti koje odgovaraju sinhronoj brzini n_1 . Označimo omjer brzine prema sinhronoj brzini sa N :

$$N = \frac{n}{n_1} \quad (8)$$

Snaga generatora je onda :

$$P = m \cdot I^2 R = \frac{m \cdot E^2 \cdot R \cdot N^2}{R^2 + X_s^2 \cdot N^2} \quad (9)$$

gdje je sa m označen broj faza. Zakretni moment možemo izračunati kao :

$$M = \frac{P}{\omega_s \cdot N} = \frac{mR}{\omega_s} \cdot \frac{E^2}{\frac{R^2}{N} + X_s^2 \cdot N} \quad (10)$$

Što je prikazano krivuljama na sl. 4-38, gdje redoslijedu $a, b, c \dots$ odgovara sve veća uzbudna struja. Maksimalni moment nastupa kod brzine, kod koje je $\frac{dM}{dN} = 0$, a to je :

$$N = \frac{R}{X_s} \quad (11)$$

dakle kod jedne te iste brzine pri različitim uzбудama. Povećanje otpora R pomaknut će tačke maksimalnog momenta prema većoj brzini.

Kod ovih razmatranja uzeta je u račun samo jedna vrijednost sinhronne reaktancije X_s , što bi odgovaralo cilindričkom rotoru. Kod istaknutih polova trebalo bi računati s uzdužnom reaktancijom X_d i poprečnom X_q , pa prema sl. 4-39 slijedi:

$$U \cdot \cos \psi + I \cdot X_d \cdot \sin \psi = E \quad (12)$$

$$U \cdot \sin \psi = I \cdot X_q \cdot \cos \psi \quad (13)$$

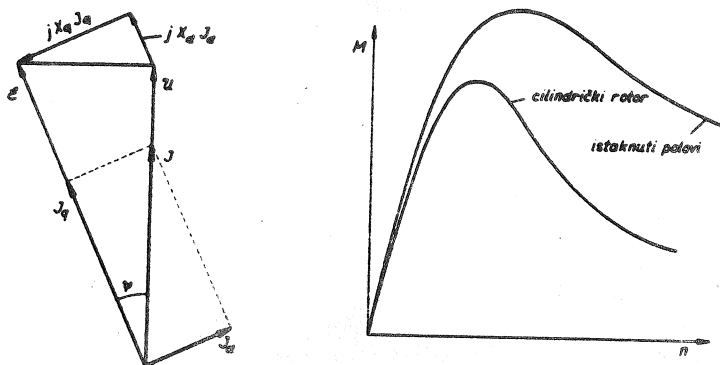
Budući da je ovdje napon na stezaljkama $U = I \cdot R$, slijedi iz druge jednadžbe :

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{X_q}{R} \quad (14)$$

Što uvršteno u prvu daje :

$$I \cdot \left(R + \frac{X_d X_q}{R} \right) = \frac{E R}{\sqrt{R^2 + X_q^2}} \quad (15)$$

$$I = \frac{ER^2}{(R^2 + X_d X_q) \sqrt{R^2 + X_q^2}} \quad (16)$$



Sl. 4-39

Uvrstimo opet za moment :

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{m I^2 R}{\omega} \quad (17)$$

pa dobivamo kod sinhronne brzine :

$$M = \frac{mR}{\omega} \cdot \frac{E^2}{R^2 + X_q^2} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{X_d X_q}{R^2}\right)^2} \quad (18)$$

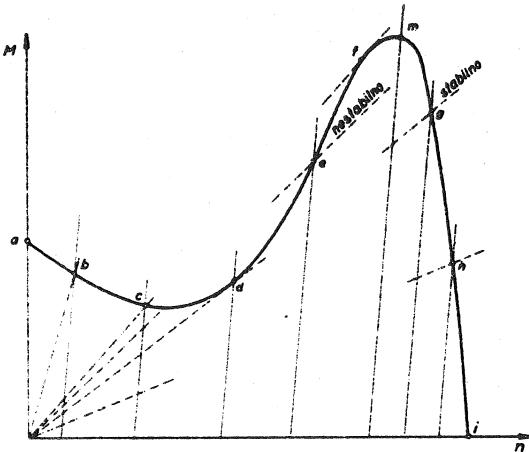
Kod bilo koje brzine n treba napon E uz istu uzbudu uzeti pomnožen sa $N = \frac{n}{n_1}$, a isto tako i svaku reaktanciju, pa konačno dobivamo ovisnost momenta i brzine :

$$M = \frac{mR}{\omega_s} \cdot \frac{E^2}{\frac{R^2 + X_q^2}{N} \cdot \left(1 + N^2 \frac{X_d X_q}{R^2}\right)^2} \quad (19)$$

Izraz je sličan onome za cilindrički rotor, ali ima još jedan član koji je uvijek manji od 1, i naglo pada s rastućim N , pa će moment kod istaknutih polova naglije padati s brzinom (sl.4-39).

Način opterećenja uvijek ćemo odabrati tako, da karakteristike momenta generatora i motora koji ispitujemo daju stabilan rad, sa što finijom mogućnošću udešavanja. Kod snimanja momentne karakteristike asinhronnog motora prema

sl. 4-40 očit je, da ćemo tačke između b i d moći jednako dobro snimiti istosmjernim generatorom opterećenim na

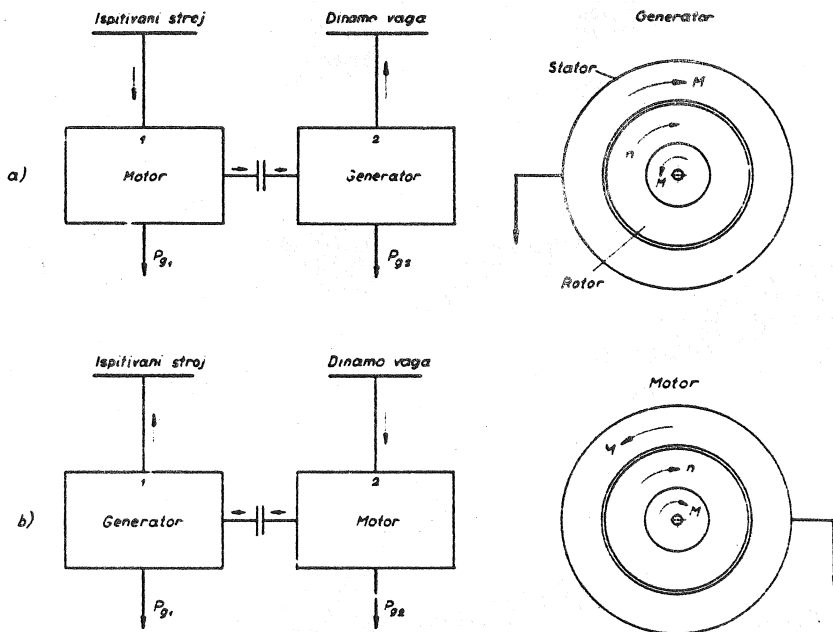


Sl. 4-40

otpornike, kao i na mrežu. Za tačke od d do f bit će upotrebljivo jedino opterećenje na mrežu, jer kod opterećenja na otpornike sjecišta ne predstavljaju stabilne pogonske tačke. Naprotiv, u području od f do i primjenljive su obe metode, ali opterećenje na otpornike dopušta finije udešavanje. Opterećenje sinhronim generatorom na mrežu predstavlja komplikaciju oko regulacije frekvencije mreže, dok opterećenje na otpornike ne može poslužiti za velik dio krivulje oko tačaka d do f.

4.4.6 Dinamo-vaga. Ako opterećujemo ispitivani stroj električkim strojem bilo koje vrste, dovodimo stroju za opterećenje (2 na sl.4-41a) na osovini isto toliku snagu, kolika je predana snaga stroja 1, a to znači takodjer da je zakretni moment na spojci stroja za opterećenje jednak zakretnom momentu stroja koji ispitujemo. Analogno vrijedi i za slučaj ispitivanja generatora (1 na sl.4-41b), koji tjeramo strojem ispitne stanice (2 na sl.4-41b) kao motorom. U oba slučaja moment na spojci stroja 2 nastaje djelovanjem magnetskog polja u rasporu na vodiče u kojima teče struja. Magnetsko polje vezano je uz stator, a strujom protjecani vodiči uz rotor, ili obrnuto, pa se očit radi o međusobnom djelovanju statora i rotora. To znači, da će rotor djelovati na stator jednako velikim momentom, kao što djeluje stator na rotor, samo suprotnoga smjera. Na tome se zasniva

funkcija dinamo-vage, vrlo čestog pomagala u ispitnoj stanici. Ako naime kućište statora, umjesto krutog učvršćenja

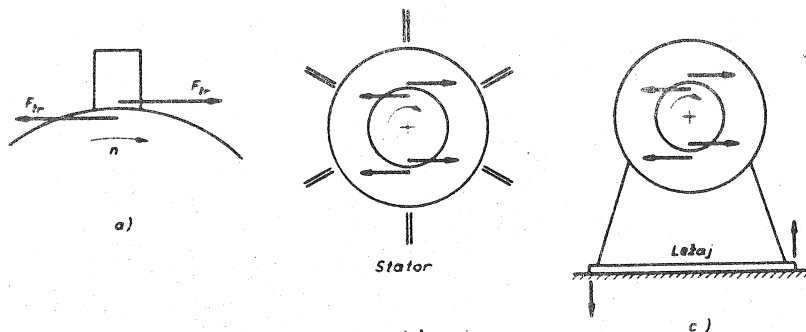


Sl. 4-41

na podnožje, postavimo u ležajeve, tako da se može zakretati oko iste osi kao rotor, i pobrinemo se da mase budu tako izjednačene, da je stator u svakom položaju u ravnoteži, onda možemo vaganjem na kućištu - tj. određivanjem sile F na poznatom kraku l , kojim održavamo stator u ravnoteži - mjeriti veličinu momenta koji djeluje na stator, a time smo odredili i moment koji djeluje na rotor odn. na spojku stroja za opterećenje ili pogon 2.

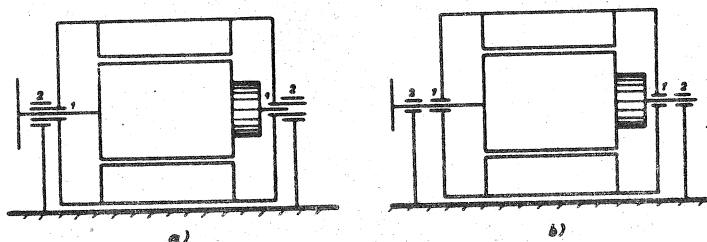
Prema sl. 4-41 vidimo, da se kod generatorskog rada moment na spojci suprotstavlja narinutom momentu, tj. djeluje nasuprot smjeru vrtnje. Obrnuto, kod motorskog rada na spojci djeluje u smjeru vrtnje. Iz toga slijedi, da će na kućište statora djelovati moment u smjeru vrtnje kod generatora, a nasuprot smjeru vrtnje kod motora. U generatorskom radu rotor nastoji povući stator sa sobom, dok u motorskom radu rotor otiskuje stator u suprotnom smjeru. Prema tome, pri istom smjeru vrtnje biti će potrebno dodavati utege za uravnoteženje na različitoj strani.

Moment između statora i rotora određjen je snagom koja prolazi kroz zračni raspor, i brzinom vrtnje. Pri tome je posve svejedno, što se dalje događja sa snagom koja je prošla kroz raspor - hoće li ona otići u mrežu, ili će se poništiti u vanjskim otpornicima, ili će se pretvoriti u toplinu u samom stroju. To znači, da gubici u stroju ne utječu na tačnost mjerenja momenta. Rezultat mogu kvariti samo takovi momenti, koji djeluju na rotor, a ne djeluju na stator, ili obratno. Ako npr. po kolektoru rotora kliču četkice pričvršćene na stator, pojavit će se uslijed trenja isti moment na rotoru kao i na statoru, samo suprotnog smjera. Kod generatorskog rada moment na spojci i moment na kućištu statora, dakle na vagi, povećati će se za jednaki iznos, a kod motorskog rada oba će se momenta smanjiti za isti iznos (sl.4-42a).



Sl. 4-42

Slično djeluje trenje u ležajima, ako su ležaji pričvršćeni na kućište statora (sl.4-42b). Ako su, međutim, ležaji u kojima se vrti rotor pričvršćeni direktno na postolje, onda se moment prenesen trenjem na ležaje prenosi na postolje, a ne na stator, pa ga ne ćemo mjeriti na statoru (sl.4-42c). U takovom slučaju moment trenja u ležajima predstavlja pogrešku mjerenja. Zbog toga se dinamovage radije izvode tako, da se rotor vrti u ležajima koji su smješteni u ležajne štitove statora (1 na sl. 4-43a), dok je unutrašnja strana ležaja 2, vezanih na postolje, pričvršćena na kućište statora. Trenje u ležajima 1 djeluje i na stator



i na rotor, pa ne uzrokuje grešku kod mjerenja, dok trenje u ležajima 2 praktički ne djeluje, jer se stator ne vrti. Ono može jedino ometati postavljanje statora u položaj ravnoteže kod vaganja, no uslijed vibracija u pogonu i ta "neosjetljivost" vage bit će svedena na neznatnu mjeru. Gdje-kada se još nailazi starija izvedba prema sl. 4-43b, kod koje trenje u ležajima 1 ne smeta, ali trenje u ležajima 2 djeluje samo na rotor, a ne prenosi se na stator, te uslijed toga predstavlja pogrešku kod mjerenja.

Ostali uzroci pogreške kod mjerenja mogu biti trenje vanjskog zraka na osovini, spojci i rotoru, koje uvijek djeluje nasuprot smjeru vrtnje, i trenje vanjskog zraka (uslijed stranih ventilatora i sl.) na kućištu statora, koje može djelovati u jednom ili drugom smjeru. Naprotiv, trenje unutarnjeg zraka djeluje jednako na stator i na rotor, ako se samo pobrinemo, da na ulazu i na izlazu iz stroja ne bude tangencijalnog strujanja, već da zrak struji aksijalno. Označimo zbroj svih momenata trenja koji djeluju samo na rotor sa $\Delta M'$. Smjer ovog momenta bit će uvijek suprotan smjeru vrtnje. Kod generatorskog rada dinamo-vage (sl. 4-41a) bit će moment M_s , doveden dinamo-vagi na spojci, veći od momenta u rasporu M za moment trenja $\Delta M'$:

$$M_s = M + \Delta M' \quad (1)$$

Moment uslijed djelovanja vanjske ventilacije ili neuravnoteženosti na stator označimo sa $\Delta M''$, i pretpostavimo da djeluje takodjer nasuprot smjeru vrtnje. Na polugi dinamo-vage mjeriti ćemo u tom slučaju moment:

$$M_p = M - \Delta M'' = M_s - \Delta M' - \Delta M'' \quad (2)$$

Pogreška mjerenja, kao razlika mjerene vrijednosti momenta na polugi M_p i stvarne vrijednosti momenta na spojci, predstavljena je sa:

$$M_p - M_s = -\Delta M' - \Delta M'' = -\Delta M \quad (3)$$

a korekcija će biti

$$K = M_s - M_p = \Delta M \quad (4)$$

Pozitivan predznak korekcije daju momenti koji djeluju nasuprot smjeru vrtnje i to samo na rotor ili samo na stator. Ovakove momente moramo uravnotežiti dodavanjem utega na stator, koji ga zakreću u smjeru vrtnje. Prava je vrijednost momenta na spojci za generatorski rad:

$$M_s = M_p + K \quad (5)$$

Ako sada ponovimo slično razmatranje za motorski pogon prema sl. 4-41b uz isti smjer vrtnje, vidimo, da su momenti M_s i M_p promijenili predznak, ali momenti $\Delta M'$ i $\Delta M''$

nisu. Ako zadržimo i ovdje isti smjer, tj. nasuprot smjeru vrtnje za pozitivnu vrijednost ΔM , vrijedit će relacija za motorski rad :

$$M_s = M_p - K \quad (6)$$

U motorskom će radu, naime, moment na polugi biti veći od momenta u rasporu za ΔM , a moment na spojci će biti manji od momenta u rasporu za ΔM . Iz jednadžbe (6) izgleda, kao da je moment ΔM , koji predstavlja korekciju, promijenio predznak. U stvari, njegov je predznak ostao isti, a promijenio se predznak momenata M_s i M_p , što vidimo i po tome, da treba utege za uravnoteženje dodavati na suprotnoj strani. Pošto pak za M_s i M_p pišemo apsolutne, tj. pozitivne vrijednosti, potrebno je izmijeniti predznak korekcije K .

Korekcija K ovisi praktički samo o trenju i ventilaciji, te se mijenja samo kod promjene brzine vrtnje. Vrlo je jednostavno snimiti korekciju K u ovisnosti o brzini vrtnje. Potrebno je samo tjerati dinamo-vagu električki iz mreže kao motor, bez priključenog opterećenja na spojci, tj. s momentom na spojci :

$$M_s = 0$$

U tom slučaju je korekcija jednaka :

$$K = M_p \quad (7)$$

pa je možemo odrediti vaganjem na kućištu statora. Pozitivan predznak odgovara momentu nasuprot smjeru vrtnje, odnosno smjeru otklona vage, koji odgovara motorskom radu. Može se, međjutim, dogoditi, uslijed neuravnoteženosti statora ili vanjskih strujanja na stator, da krivulja korekcije leži djelomično ili potpuno u području negativnih vrijednosti. Zbog utjecaja ventilacije ne mora korekcija za lijevi i desni smjer vrtnje biti jednaka, pa je potrebno snimiti dvije krivulje, za lijevi i za desni smjer vrtnje.

Svaki električki stroj može se izvesti kao dinamo vage. Kao najpogodniji stroj za pogon i opterećenja uzima se obično istosmjerni stroj s nezavisnom uzbudom, event. uz nekoliko zavoja serijske uzbuđ, koji se mogu uključiti prema potrebi, i time postići odgovarajuća kompauncacija. Osim istosmjernog stroja dolazi u obzir kao dinamo-vaga i sinhroni stroj. U pogledu karakteristika vrijedi sve što je izloženo u 4.4.5, pa se može provesti terećenje bilo na mrežu, bilo na otpornike, uz direktno mjerenje momenta na osovini. Mjerenjem momenta na osovini i brzine vrtnje dobivamo snagu na osovini :

$$P = M\omega = \frac{2\pi}{60} \cdot Mn \quad (8)$$

a da nije potrebno, kao što je to slučaj kod opterećenja električkim strojem s nepokretnim statorom, poznavati vlastite gubitke stroja za terćenje.

4.4.7 Mjerenje momenta. Već prilikom razmatranja različitih metoda opterećenja (4.4.4 do 4.4.6) pokazalo se, da nam različiti sistemi kočnica omogućuju direktno mjerenje mehaničkog momenta, koje se svodi na mjerenje sile na poznatom kraku, potrebne da bi održali kočnicu u ravnoteži. Napose je takovo mjerenje bilo provedivo kod dinamovage. Pa čak i kod običnog električkog stroja za opterećenje - ili za pogon, ako ga koristimo kao motor - ukoliko je on baždaren, možemo izračunati snagu na spojci, i uz izmjerenu brzinu vrtnje odrediti moment. Sve ove metode omogućuju snimanje karakteristike momenta u ovisnosti o brzini tačka po tačku. Ovakovo snimanje zahtijeva dosta vremena, a pri opterećenjima iznad nominalnog momenta dolazi pri tome do znatnih zagrijavanja, koja s jedne strane iskrivljuju rezultate, a s druge strane mogu ugroziti izolaciju stroja.

Postoji čitav niz metoda za direktno mjerenje momenta na ispitivanom stroju, od kojih je jedan dio našao široku primjenu, dok su druge ostale u fazi razvoja. Svim tim metodama je zajedničko, da vršimo zalet ispitivanog motora, koji smo priključili na mrežu, event. uz dodane zamašne mase, kako bi se trajanje zaleta produljilo, i za vrijeme zaleta usporedno mjerimo brzinu vrtnje i moment, kako bi mogli postaviti međusobnu ovisnost. Moment možemo mjeriti :

a) na statoru (prema 4.4.8)

b) na osnovu ubrzanja rotora (prema 4.4.9 i 4.4.11).

Iz relacije :

$$M = \frac{mD^2}{4} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{mD^2}{4} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1)$$

slijedi, naime, da je moment koji vrši ubrzanje svakog časa direktno proporcionalan veličini kutnog ubrzanja, odnosno derivaciji brzine vrtnje po vremenu. Prema načinu na koji određujemo moment iz ubrzanja možemo metode opet podijeliti u 3 grupe :

ba) metode s direktnim mjerenjem $\frac{dn}{dt}$ (prema 4.4.9)

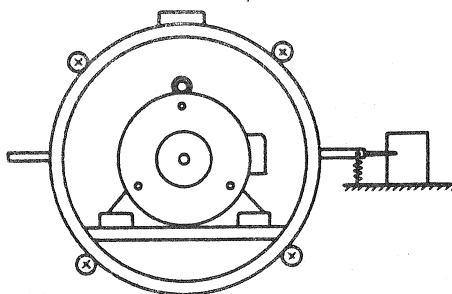
bb) metode kod kojih snimamo brzinu $n=f(t)$, pa je diferenciramo bilo pri samom mjerenju, bilo naknadno (prema 4.4.10)

bc) metode s brojanjem okretaja, i dvostrukim diferenciranjem (prema 4.4.11).

Ovakovo "dinamičko" mjerenje momenta može se, bez bojazni od zagrijavanja, protegnuti na čitavo radno područje asinhronog motora, od kratkog spoja do praznog hoda. Pri tome nas-

tojimo, da snimljena momentna karakteristika obuhvati sve detalje, kao što su sedla i nepravilnosti, koje snimanjem tačku po tačku zbog ograničenog broja tačaka ne bi mogli otkriti.

4.4.8 Mjerenje momenta vaganjem na statoru. Kod svakog stroja pojavljuje se protumoment na statoru, jednak momentu koji djeluje na rotor. Da bi taj protumoment mogli mjeriti, potrebno je da se stator može zakretati oko iste osi kao i rotor, kao što je to omogućeno kod dinamovage. To isto se može postići kod svakog stroja, ako ga postavimo na postolje, koje se može zakretati (sl. 4-44). Montažu treba izvršiti tako, da se os vrtanja postolja i rotora podudaraaju, a



Sl. 4-44

odgovarajućim utezima treba uređaj izbalansirati, da bude u svakom položaju u ravnoteži. Naravno, da se ovakav uređaj može primijeniti samo na relativno male strojeve serijske proizvodnje, gdje se uređaj može prilagoditi dimenzijama i konstrukciji stroja.

Ako želimo brzo mjerenje, potrebno je registrirati moment za vrijeme zaleta. U tu svrhu mogu se primijeniti različiti postupci, kao :

1. Mehaničko pokazivanje. Zakret statora ograničimo elastičnim perima s odgovarajućim prigušenjem, tako da se kut zakreta prenosi uz jako povećanje na kazaljku, koja piše po registracionoj traci. Kut zakreta proporcionalan je sili pera, dakle i momentu:

$$M = K \cdot \alpha \quad (1)$$

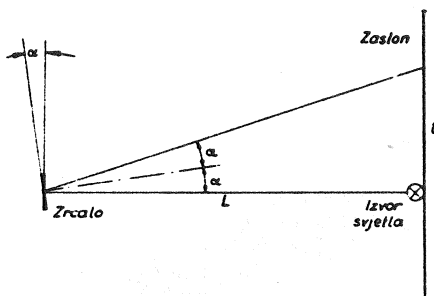
pa registrirani otklon predstavlja u odredjenom mjerilu zakretni moment.

2. Optičko pokazivanje. Zakret statora prenosi se povećano na zakret zrcala. Svjetlosna zraka daje na skali udaljenost za L od zrcala otklon, koji pri zakretu zrcala za

mali kut α iznosi približno

$$l \cong 2\alpha L \quad (2)$$

tj. možemo ga po volji povećati prijenosom od statora na zracalce, i povećanjem udaljenosti skale L (sl.4-45).



Sl. 4-45

.3 Induktivni davač. Mali zakret statora uzrokuje promjenu zračnog rasporeda male prigušnice sa željezom, i time jako mijenja njezin induktivitet. Prigušnica je obično uključena u jednu granu mosta napajanog visokom frekvencijom. Razliku napona kod ispadanja mosta iz ravnoteže pojačavamo, i dovodimo na registracioni instrument, koji je baždaren prema momentu na statoru, ili na oscillograf.

.4 Kapacitivni davač. Zakret statora uzrokuje promjenu razmaka između pločica kondenzatora, i time mijenja njegov kapacitet. Daljnji postupak je sličan kao kod induktivnog davača.

.5 Magnetoelastični davač. Poznata je pojava magnetostrikcije : magnetsko polje izaziva u željezu unutrašnje napetosti, tako da npr. kod cca 50 A/cm dolazi do istezanja dužine od cca $4 \cdot 10^{-4} \%$. Obrnuto, naprezanje u željezu uzrokuje promjenu permeabilnosti. Ako se npr. zakret statora koristi za elastičnu deformaciju željeznog davača, kroz koji se zatvara tok prigušnice, onda će se mijenjati njezin induktivitet u ovisnosti o zakretnom momentu, pa možemo provesti mjerenje slično kao kod induktivnog davača.

.6 Tenzometarski davač. Kao što je opisano u 3.1.10, tenzometarske trake se mogu koristiti za registraciju brzih promjena naprezanja. Mjerimo li npr. naprezanje u elastičnim vezama, koje zadržavaju stator, dobiti ćemo zakretni moment.

.7 Piezoelektrički davač. Pritisak na kristal kvarca stvara na njemu piezoelektrički naboj, koji preko pojačala registriamo.

Kod svih ovih postupaka osnovni problem predstavlja s

jedne strane pokretnost statora, a s druge strane dovoljno prigušenje relativno velikih masa. Pomak statora potreban za mjerenje treba da bude što manji. U drugu ruku, paralelno s mjerenjem momenta treba snimiti i brzinu vrtnje, npr. električkim tahogeneratorom na osovini motora. Ovakvo snimljena brzina vrtnje može i sama poslužiti za mjerenje momenta, pa ćemo kod većih strojeva izbjegavati direktno mjerenje momenta na statoru.

4.4.9 Moment iz direktnog mjerenja ubrzanja. Na osovinu stroja priključimo dodatnu zamašnu masu. Ova može biti spojena elastičnom vezom - npr. preko pera, ili tanke torziono osovine - pri čemu razvijeni moment M , koji se prenosi na dodatnu masu, rezultira u zakretu α te mase prema položaju ravnoteže (sl.4-46). Moment je u tom slučaju:

$$M = K \cdot \alpha = \frac{mD^2}{4} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (1)$$

Nužan je preduslov za ispravno mjerenje, da zamašni moment dodatne mase bude vrlo malen u usporedbi s onim mjerenog stroja :

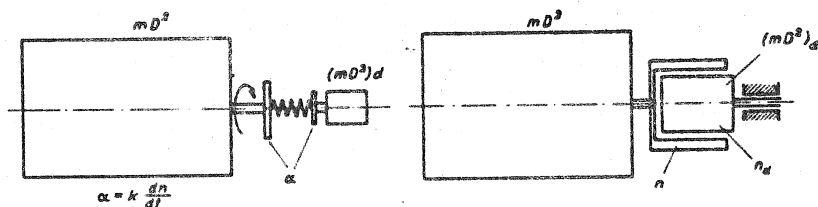
$$(mD^2)_d \ll mD^2 \quad (2)$$

kako bi dodatna masa u zanemarivo kratkom vremenu izjednačila svoju brzinu s brzinom rotora. Prigušenje treba da bude takovo, da dodatna masa ne titra oko položaja ravnoteže. Mjerenje momenta svodi se dakle na registraciju torzionog kuta između dodatne mase i mjerenog stroja. Ovakove metode nazivaju se i statičkim mjerenjem ubrzanja.

Druga je mogućnost tzv. astatičko mjerenje ubrzanja, koje se svodi na mjerenje relativne brzine između rotora i dodatne zamašne mase. Pri tome dodatna masa nije elastično povezana s osovinom ispitivanog stroja, već prema njoj slobodno klizi. Klizna veza je takova, da između obe strane djeluje moment proporcionalan relativnoj međusobnoj brzini, pa prema sl. 4-47 vrijedi :

$$M = K(n - n_d) \quad (3)$$

Relativnu brzinu $(n - n_d)$ lako je mjeriti, ako jednu stranu snabdijemo permanentnim magnetom, koji u svitku pričvršće-



nom na drugu stranu inducira napon proporcionalan relativnoj brzini.

Statičke i astatičke metode mjerenja ubrzanja možemo još dalje podijeliti prema izvedbi mjerenja.

Statičke metode dijelimo prema načinu kojim mjerimo otklon dodatne mase prema rotoru :

.1 Mehaničko mjerenje otklona. Medjusobni zakret pretvara se preko polužja u aksijalni pomak, koji se može prenijeti na kazaljku van rotirajućeg sistema, ili se prenosi na pomak potencijometra, koji rotira zajedno s osovino. Mjerenje se vrši u ovom posljednjem slučaju preko kliznih koluta, ili se mjeri visokom frekvencijom, koja omogućuje prijenos mjerenih podataka bez direktnog kontakta s rotirajućim dijelovima.

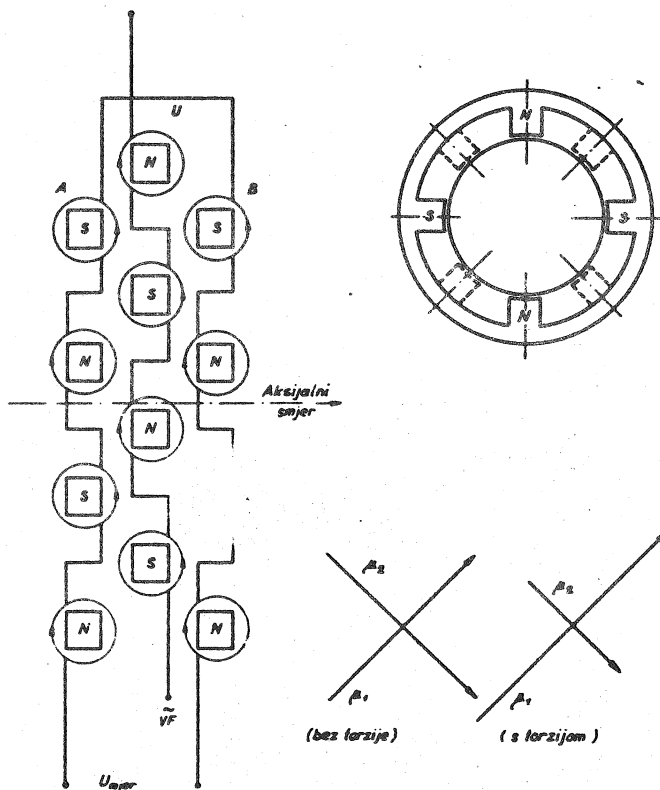
.2 Optičko mjerenje. Dvije ploče s prorezima propuštaju snop svjetlosti u punoj veličini kad je $\alpha = 0$. Kod medjusobnog zakreta prorezi se sve više prekrivaju, sve manje svjetlosti prolazi, tako da fotoćelija registrira medjusobni zakret obih ploča α .

.3 Induktivni davač. Vrijedi isto što je rečeno u 4.4.8, samo što ovdje treba mjernu struju dovesti do rotirajućih dijelova. Obično se radi s VF uređajima. Mjerne naprave na ovom principu mnogo se upotrebljavaju.

.4 Kapacitivni davač. Vrijedi isto kao što je izneseno u 4.4.8. Kapacitivni davač izložen je mnogo više smetnjama nego induktivni, pa je manje u upotrebi.

.5 Magnetoelastični davač. Ovdje se može upotrebiti torzionna osovina kao davač prema sl. 4-48. Oko osovine razmjestimo 3 reda polova. Srednji red nosi uzbudni namot, koji uzbuđujemo npr. sa 1000 Hz. Druga dva reda, A i B, pomaknuta su tangencijalno tako da polovi leže pod kutom od 45° prema uzbuđenim polovima (na sl.4-48 prikazano na razvijenom plaštu osovine). Namoti na polovima grupe A spojeni su u seriju, a isto tako grupe B, dok su obje grupe medjusobno u protuspoju. Kod neopterećene osovine lako je vidjeti, da će inducirani naponi u svakom sistemu za sebe i u oba zajedno biti jednaki nuli, jer je permeabilitet u svim smjerovima jednak. No ako dodje do torzionih naprezanja, permeabilitet će se povećati u smjeru vlačnih, a smanjiti u smjeru tlačnih naprezanja, tj. pod kutom od 45° prema osi zakreta. Uslijed toga će se povećati djelovanje svih uzbuđenih polova na suprotno označene polove sistema A, i na jednako označene polove sistema B, i obratno. Rezultat će biti inducirani napon na stezaljkama namota, čija veličina uz određeno baždarenje predstavlja zakretni moment. Kod ovog mjerenja nije potrebno dovesti struju mjerenja niti preko kliznih koluta, niti preko posebnih VF uređaja, a mogu se mjeriti vrlo brze promjene momenta.

.6 Tenzometrički dawač. Tenzometričke trake se mogu prili-
jepiti direktno na torzionu osovinu, pod kutom od 45° pre-
ma osi u jednom i u drugom smjeru. Mjerenje se vrši u nosnom



Sl. 4-48

spoju, a koristi se, slično kao kod induktivnog i kapaci-
tivnog dawača, visokofrekventna struja.

.7 Piezoelektrički dawač. Kristal služi ujedno i kao pero,
pri čemu je kut zakreta zanemarlivo malen. Napon je potreb-
no pojačati da bi ga mogli mjeriti. Ako je mjerenje rasteg-
nuto, dolazi do pogreške zbog neizbježnog ocvoda naboja s
kristala preko nesavršene izolacije.

Sve metode od .1 do .7 služe za mjerenje zakreta α do-
datne mase prema rotoru. Kod astatičkih metoda mjerimo na
već spomenuti način relativnu brzinu dodatne mase prema ro-
toru, a dijelimo te metode prema načinu na koji je ostvarena
klizna veza :

.8 Hidraulička veza s pomoću ulja koje struji između oba dijela uređaja. Moment je pri tome proporcionalan relativnoj brzini uz pretpostavku idealne tekućine. U stvari svojstva tekućine odstupaju od idealnih pretpostavki, a daljnje greške nastupaju zbog vrtloženja tekućine pri ubrzavanju, te uslijed znatne promjene viskoziteta sa zagrijanjem tekućine.

.9 Električka veza s permanentnim magnetom s jedne strane, a kratko spojenim svitkom s druge strane. Za tu svrhu može se iskoristiti onaj isti magnet, koji služi za registraciju relativne brzine $n - n_0$, a i svitak za mjerenje brzine $n - n_0$, ako je izveden tako da mu je otpor vrlo malen. Čitav uređaj za kliznu vezu i mjerenje relativne brzine sastoji se onda od permanentnog magneta s jedne strane, a svitka, koji je praktički u kratkom spoju, i kojemu mjerimo struju kratkog spoja, s druge strane. Očito je struja, a time i moment, proporcionalna relativnoj brzini između obe strane klizne veze.

4.4.10 Indirektno određivanje momenta iz mjerenja brzine
 $n = f(t)$. Za mjerenje brzine možemo se poslužiti različitim metodama. Ovdje nas, međutim, zanimaju samo one metode, kod kojih se rezultati mogu lako registrirati, i po mogućnosti bez posebnog računanja odmah diferencirati. Iz tako dobivenih krivulja :

$$n = f(t)$$

$$M = \frac{dn}{dt} = f(t)$$

može se onda lako konstruirati krivulja

$$M = f(n)$$

Još je elegantnije, ako veličinu $n = f(t)$ dovedemo na horizontalnu os katodnog oscilografa, a $M = f(t)$ na vertikalnu os, jer će oscilograf u tom slučaju odmah registrirati $M = f(n)$.

Od različitih sistema tahometara (4.4.2) nisu svi prikladni za diferenciranje brzine vrtnje. Za mjerenje brzine vrtnje vrlo mnogo se upotrebljava tahometar na centrifugalnom principu, koji brzinu pretvara u otklon kazaljke, no taj nije prikladan za brzo mjerenje s direktnim diferenciranjem, jer je centrifugalna sila proporcionalna s n^2 , a ne s brzinom n , koju treba diferencirati. Drugačije je kod tahometra na principu permanentnog magneta i vrtložnih struja. Ovdje je otklon proporcionalan brzini vrtnje n , ukoliko je pero, koje daje protumoment, linearne karakteristike. Korištenje tekućine kao prenosnog sredstva, koje daje moment proporcionalan brzini, nije pogodno, s razloga navedenih u 4.4.9, taš.8.

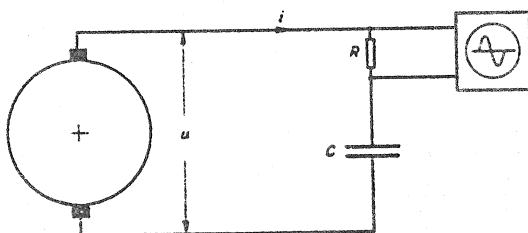
Najprikladniji način mjerenja brzine vrtnje je tahogenerator, koji radi na elektrodinamskom principu. Ako se rotor vrti u magnetskom polju konstantne veličine, inducirati će

se u pojedinim vodičima napon proporcionalan brzini vrtnje. Prema spoju namota može tahogenerator davati izmjenični ili istosmjerni napon. Pošto zahtijevamo strogu proporcionalnost napona i brzine vrtnje, ne možemo upotrebiti ispravljač za izmjenični napon, a pošto želimo diferencirati brzinu vrtnje, koju prikazuju amplitude, a ne momentane vrijednosti izmjeničnog napona, vidimo da izmjenični tahogenerator nije prikladan za tu svrhu. Preostaje istosmjerni tahogenerator, koji u stvari predstavlja mali istosmjerni stroj s permanentnim magnetima, ili s vrlo konstantnom nezavisnom uzбудom. Zahtijevamo strogu proporcionalnost napona U i brzine vrtnje n , što znači da struje mjerenja ne smiju utjecati na magnetsko polje, te što bolje izgledjenu krivulju napona, bez viših harmoničkih članova od utora i kolektora, jer se ovi jako povećavaju kod diferenciranja, i onemogućuju snimanje sedala i sitnih detalja krivulje momenta. Najpogodniji bi bio unipolarni generator, ali napon koji se može na taj način dobiti odviše je nizak, tako da nepravilnosti zbog pada napona na četkicama odviše smetaju.

Prema načinu diferenciranja razlikujemo nekoliko postupaka za obradu krivulje $n = f(t)$:

.1 Grafički. Krivulju napona snimimo na traku, i izvršimo grafičko diferenciranje, kao što je opisano u 3.6.3. Netačnost crtnje onemogućuje pri tome dobivanje detalja.

.2 Diferenciranje preko kondenzatora. Na stezaljke tahogeneratorskog priključimo kondenzator kapaciteta C , a u seriju s njime vrlo mali otpor R (sl.4-49). Pad napona na otporu $i \cdot R$, koji je proporcionalan struji nabijanja kondenzatora,



Sl. 4-49

dovodimo na oscilograf. Pošto vrijedi

$$u = k \cdot n \quad (1)$$

$$u = \frac{q}{C} + i \cdot R \quad (2)$$

bit će :

$$\frac{du}{dt} = k \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{1}{C} \cdot \frac{dq}{dt} + R \cdot \frac{di}{dt} \quad (3)$$

Ako smo otpor R odabrali dovoljno malen, drugi član ovog izraza možemo zanemariti, pa izlazi :

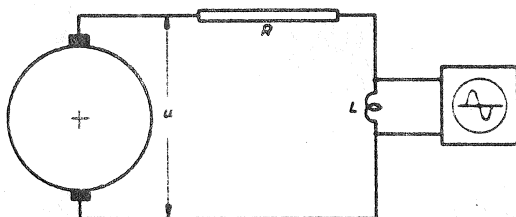
$$\frac{dn}{dt} \approx \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{C} = iR \cdot \frac{1}{kCR} \quad (4)$$

Na horizontalnu os oscilograma dovedemo napon u , pa odmah dobivamo sliku, koja u određenom mjerilu predstavlja :

$$M = f(n)$$

Poteškoću predstavljaju viši harmonički članovi od utora i kolektora tahogeneratora. Njihova frekvencija raste od nule s brzinom vrtnje, pa bi filtri, kojima bi ih htjeli ukloniti, morali obuhvatiti čitavo to područje, i na taj način bi posve sigurno eliminirali i one titraje u krivulji napona, koji potječu od sedla u momentnoj krivulji. Osim toga, pri upotrebi većeg kondenzatora nastaje izobličenje uslijed odvoda naboja kroz nesavršeni dielektrik. Zato je potrebno uzeti visokovrijedni kondenzator, pa makar i manjeg kapaciteta. Struja je u tom slučaju manja, pa je treba mjeriti preko pojačala.

3 Diferenciranje preko induktiviteta. Spoj se vidi na sl.4-50



Sl. 4-50

Za prikazani strujni krug vrijedi :

$$u = iR + L \frac{di}{dt} = k \cdot n \quad (5)$$

Otpor R treba ovdje uzeti vrlo velik, tako da bude

$$iR \gg L \cdot \frac{di}{dt} \quad (6)$$

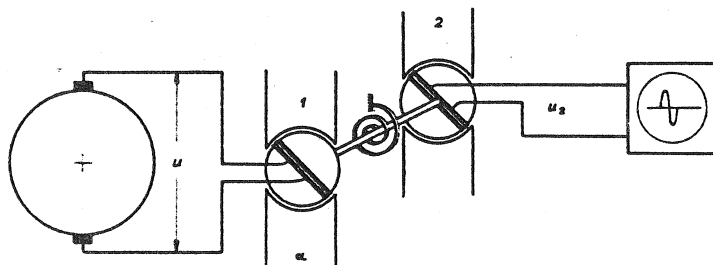
$$i \approx \frac{u}{R} \quad (7)$$

Napon s prigušnice, koji dovedemo na oscilograf, bit će tada:

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{du}{dt} = k \cdot \frac{L}{R} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (8)$$

Prigušnica mora biti izvedena tako, da joj je induktivitet unutar područja promjene struje i konstantan, a to se postiže malim zasićenjem i velikim zračnim rasporom. Otpor namota prigušnice mora biti zanemarivo malen. Viši harmonički članovi stvaraju i ovdje iste poteškoće, kao kod kondenza-

.4 Elektromehaničko diferenciranje. Napon tahogeneratora $u = k \cdot n$ dovodimo na zakretni svitak 1 u konstantnom polju permanentnog magneta (sl.4-51). Svitak 1 povezan je na



Sl. 4-51

istoj osovini s još jednim takovim svitkom 2, a pero P daje protumoment, tako da je otklon uslijed narinutog napona u :

$$\alpha = k_1 \cdot u \quad (9)$$

Napon u_2 sa sistema 2, koji dovodimo na oscilograf, proporcionalan je brzini vrtnje svitka 2, dakle:

$$u_2 = k_2 \cdot \frac{d\alpha}{dt} = k_1 k_2 \cdot \frac{du}{dt} = k k_1 k_2 \cdot \frac{dn}{dt} \quad (10)$$

Mehanička tromost sistema donekle prigušuje više harmoničke članove, pogotovo kod viših frekvencija.

.5 Diferenciranje s dva tahometra. Ako za mjerenje brzine vrtnje upotrebimo tahometar s vrtložnim strujama, otklon njegove kazaljke bit će proporcionalan mjerenoj brzini vrtnje:

$$\alpha_1 = k_1 \cdot n \quad (11)$$

Ako sa istim drugim tahometrom mjerimo brzinu vrtnje na osovini kazaljke prvog tahometra, onda će otklon drugog tahometra biti:

$$\alpha_2 = k_2 \cdot \frac{d\alpha_1}{dt} = k_1 k_2 \cdot \frac{dn}{dt} \quad (12)$$

tj. pokazivat će direktno veličinu proporcionalnu zakretnom momentu.

4.4.11 Odredjivanje momenta brojanjem okreta i dvostrukim diferenciranjem. Na osovinu stroja pričvrstimo davač impulsa - npr. u obliku željeznog zapčasnika, koji rotira pored svitka s permanentnim magnetom, i kod prolaza svakog zuba inducira u svitku električki impuls. U istu svrhu može poslužiti i izmjenični tahogenerator. Svaki impuls označava zakret osovine

za određeni dio punog okreta. Ako impulse dovodimo digitalnom računalu, koje u određenim razmacima vremena pravi razlike $\Delta\alpha$ za vremenski interval Δt , dobivamo $n = \frac{d\alpha}{dt}$, a ako na isti način postupimo s dobivenim vrijednostima za n , dobivamo $K = k \cdot \frac{dn}{dt}$. Za tole zadovoljavajuću tačnost potreban je vrlo velik broj impulsa.

Svi sistemi diferenciranja imaju nedostataka, od kojih su glavni smetnje zlog utora i kolektora, te neosjetljivost na detalje momentne karakteristike. Statički sistemi su u tom pogledu dotjeraniji. U svakom slučaju je važno, da vlastita frekvencija mjernog sistema ne bude preniska. Obično zadovoljava 30 - 50 Hz, no kod snimanja direktnog zaleta asinhronog motora na mrežu, bez dodatnih masa, potrebno je i 150 - 200 Hz.

4.5 Gubici asinhronog stroja

Gubici asinhronog stroja nastaju u aktivnim dijelovima - u paketu limova, u namotu statora i namotu rotora - te u slijed trenja u ležajima i u ventilacionom krugu. Prema tome mogli bi ih podijeliti na gubitke u željezu, gubitke trenja i ventilacije, gubitke u namotu statora i gubitke u namotu rotora računajući ovamo i event. gubitke na četkicama u rotorskom krugu. Kod proračunavanja gubitaka uobičajeno je, da se uz osnovne gubitke u aktivnim dijelovima zasebno izračunavaju relativno mali gubici uzrokovani sekundarnim pojavama, i da ih se naziva "dodatnim gubicima". To je npr. slučaj s reluktantnim gubicima u željezu P'_d i gubicima u željezu uslijed protjecanja P''_d (4.2.6). Kod mjerenja gubitaka pristupamo podjeli gubitaka sasvim drugačije, jer nije moguće mjeriti ih onim redom kako smo ih računali, već ih mjerimo grupirane onako, kako to odgovara različitim pogonskim stanjima. Mjerenja obuhvaćaju osnovne gubitke i jedan dio proračunskih "dodatnih gubitaka", pa i jedan dio gubitaka, koje proračun nije mogao obuhvatiti. Ostaje, međjutim, jedan dio gubitaka, koji nisu obuhvaćeni mjerenjima pojedinih gubitaka. U propisima i praksi ispitnih stanica ovi su gubici poznati kao dodatni gubici. Oni nisu identični s proračunskim "dodatnim gubicima", a još manje s povećanjem gubitaka, koje je posljedica grešaka u materijalu, izradi ili konstrukciji, a koje se takodjer često naziva "dodatnim gubicima". U daljnjim razmatranjima tretirati će se dodatni gubici u smislu propisa, tj. kao razlika stvarnih ukupnih gubitaka i pojedinačne izmjenjenih gubitaka, te će se označavati indeksom "dod". Gubici koji su u proračunu dodatno izračunati bit će označeni indeksom "d". Zbog što jasnijeg pregleda potrebno je razmotriti čitavu energetsku bilancu.

4.5.1 Energetska bilanca. Prema sl.4-52 možemo pratiti gubitke i tok energije kroz stroj. Od snage P_1 koju motor uzima iz mreže troši se $P_{Cul} + P_{Cul\ dod}$ na gubitke Joule-ove topline u statorskom namotu. Pri tome predstavlja član :

$$P_{Ca} = 1,5 \cdot R_{st} \cdot I_1^2 \quad (1)$$

gubitke koje određujemo mjerenjem otpora između stezaljki R_{st} istosmjernom strujom i računom, a $P_{Cul\ dod}$ dodatne gubitke uslijed potiskivanja struje, koji nisu obuhvaćeni mjerenjem.

Dругу grupu gubitaka predstavljaju gubici u željezu uzrokovani glavnim poljem $P_{Fe1} + P_{Fe2\ dod}$. Gubici P_{Fe1} obuhvaćeni su mjerenjem u praznom hodu, kao što je pokazano u 4.2.6. Kod opterećenja dolazi do deformacije krivulje glavnog polja, pa se i gubici histerenze i vrtložnih struja mijenjaju za iznos $P_{Fe2\ dod}$, koji nije obuhvaćen mjerenjem, te predstavlja dodatne gubitke.

Svi do sada spomenuti gubici pokrivaju se direktno iz mreže, i treba ih odbiti od snage P_1 , da bi dobili snagu P_{12} , koja prolazi kroz raspor na rotor. Od ove snage dio $s \cdot P_{12}$ predstavlja gubitke u rotoru:

$$s \cdot P_{12} = P_{rot} = P_{rot\ nam} + P_{rot\ d} \quad (2)$$

Rotorske gubitke takodjer smo podijelili na gubitke u rotorskom namotu $P_{rot\ nam}$, koje određujemo proračunom na osnovu izračunatog otpora, i na gubitke $P_{rot\ d}$ koji povrhu toga nastaju uslijed većih stvarnih otpora, zatim potiskivanja struje, zatvaranja struje kroz rotorsko željezo i slično. Svi ovi gubici pokrivaju se iz iznosa $s \cdot P_{12}$, tj. očituju se u povećanom klizanju. Oni su prema tome uključeni u mjerenje gubitaka, te ne predstavljaju dodatne gubitke u smislu ranije definicije.

Ostatak snage koja je prošla kroz raspor predstavlja razvijenu mehaničku snagu :

$$P_{2m} = (1-s) \cdot P_{12} \quad (3)$$

Dio te mehaničke snage troši se na pokrivanje gubitaka trenja i ventilacije $P_{tr.v}$. Osim toga mehanički se pokrivaju i površinski i pulzacioni gubici koji nastaju u statoru zbog rotorskih utora i u rotoru zbog statorskih utora, tzv. "reluktantni" gubici u željezu, označeni u 4.2.6 sa P'_d . Gubici $P_{tr.v}$ i P'_d mjere se u istom iznosu i u praznom hodu, pa prema tome ne predstavljaju dodatne gubitke u pravom smislu riječi. Nešto je drugačije s gubicima uslijed protjecanja P''_d (vidi 4.2.6) koji su uzrokovani protjecanjem u utorima statora odn. rotora, i nazubljenjem krivulje polja s time u vezi.

Veličina tih gubitaka ovisi o veličini jedne i druge struje.

U praznom hodu, uz $I_1 = I_0$ i $I_2 = 0$, bit će ti gubici manji, nego kod punog opterećenja pri nazivnim strujama. Označimo prema (1) iz 4.2.6 sa $\Delta P_d''$ prirast tih gubitaka pri punom opterećenju prema vrijednosti P_{d0}'' u praznom hodu:

$$P_d'' = P_{d0}'' + \Delta P_d'' \quad (4)$$

U dodatne gubitke spada onda samo dio $\Delta P_d''$, koji nije obuhvaćen mjerenjem gubitaka u praznom hodu.

Ostale gubitke, koji nastaju uslijed viših harmoničkih članova u krivulji polja pri opterećenju, i pokrivaju se iz mehaničke snage, označimo sa P_m dod. Oni nisu bili obuhvaćeni mjerenjem, te predstavljaju prave dodatne gubitke.

4.5.2 Gubici prema propisima. Odredjivanje korisnosti asinhronog stroja tretirano je u svim nacionalnim propisima kao i u IEC-preporukama na isti način. Gubitke treba odrediti pojedinačno. Pri tome se govori o 4 grupe gubitaka, koje treba odrediti :

a) Gubici u statorskome namotu :

$$P_{cu1} = 1,5 \cdot R_{st} \cdot I^2 \quad (1)$$

koje dobivamo mjerenjem otpora namota (ovaj treba preračunati na pogonski toplo stanje), i mjerenjem struje statora, te računanjem.

b) Uži gubici praznog hoda :

$$P_0' = P_{Fe1} + P_{tr,v} + P_d' + P_{d0}'' \quad (2)$$

koje dobivamo mjerenjem snage u praznom hodu i nazivnom naponu, i odbijanjem gubitaka u statorskome namotu pri struji praznog hoda I_0 (vidi 4.2.6).

c) Dodatni gubici, koje prema propisima treba uzeti u račun sa 0,5 % primljene snage iz mreže pri nazivnom opterećenju, a reducirati ih u omjeru struja na kvadrat za ostala opterećenja :

$$P_{dod} = 0,005 \cdot P_n \cdot \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \quad (3)$$

Ovako računanje dodatnih gubitaka gruba je aproksimacija, koja se uzima u pomoć samo zato, što odredjivanje stvarne vrijednosti dodatnih gubitaka dovodi do poteškoća, koje nisu prihvatljive za svakodnevnu praksu. Postoje indikacije, da se dodatni gubici često penju i na vrijednosti do 10 puta veće od propisima pretpostavljenih.

d) Rotorski gubici, koje odredjujemo mjerenjem klizanja s :

Shema na sl.4-52 pokazuje vezu između gubitaka definiranih u 4.5.1, i gubitaka koje pojedinačno određujemo u smislu propisa. Dodatni gubici u smislu propisa obuhvaćaju prema tome :

$$P_{\text{dod}} = P_{\text{dod el}} + P_{\text{dod m}} \quad (5)$$

gdje su električki pokriveni dodatni gubici :

$$P_{\text{dod el}} = P_{\text{cu i dod}} + P_{\text{Fe dod}} \quad (6)$$

a mehanički pokriveni dodatni gubici :

$$P_{\text{dod m}} = \Delta P_{\alpha}'' + P_{\text{m dod}} \quad (7)$$

4.5.3 Određjivanje dodatnih gubitaka. Određjivanje dodatnih gubitaka vrlo je mukotrpan i nesiguran posao. Većina metoda daje vrlo netačne rezultate, bilo zato što je tačnost mjerenja ograničena, bilo zato što sama metoda nije egzaktna, pa rezultat predstavlja samo aproksimaciju. Po definiciji dodatni gubici predstavljaju razliku stvarnih ukupnih gubitaka P_g i sume pojedinačnih gubitaka izmjerenih prema propisima :

$$P_{\text{dod}} = P_g - (P_{\text{cu}} + P_{\text{Fe}}' + P_{\text{rot}}) \quad (1)$$

Egzaktno određivanje dodatnih gubitaka zahtijeva dakle određivanje ukupnih gubitaka. Sjetimo se, da su propisi usvojili metodu pojedinačnih gubitaka za određivanje korisnosti η upravo zbog nedovoljne tačnosti pri mjerenju ukupnih gubitaka. Iz toga su očite poteškoće ovih metoda. Postoje i druge metode, koje pokušavaju mjerenjima pri različitim pogonskim stanjima odrediti dodatne gubitke. Nedostatak je tih metoda, što izmjereni gubici nisu oni isti, koji bi bili pri normalnom pogonskom stanju, pa se takova mjerenja ne mogu smatrati pouzdanim. Nekoliko metoda za određivanje dodatnih gubitaka mogli bi sažeti kako slijedi :

.1 Metoda mjerenja P_1 i P_2 . Vatmetrima izmjerimo snagu P_1 koju motor uzima iz mreže, a kočnicom ili baždarenim strojem za opterećenje predanu mehaničku snagu P_2 . Ukupni su gubici onda :

$$P_g = P_1 - P_2 \quad (2)$$

Pojedinačne gubitke odredimo kako je navedeno u 4.5.2 a, b, d, pa računamo dodatne gubitke kao razliku ukupnih i pojedinačnih gubitaka prema (1) . Nedostatak metode je mala tačnost mjerenja, jer se rezultat dobiva kao razlika dviju vrlo sličnih veličina, koje bi morali vanredno tačno izmjeriti, dok u stvari mjerenje mehaničke snage P_2 nije tako tačno kako bi želili.

.2 Povratni rad na istoj osovini. Dva jednaka motora rade na istoj osovini prema sl. 4-53 . Prvi je priključen na mrežu

frekvencije f_a , a drugi f_b , gdje je :

$$f_a > f_b \quad (3)$$

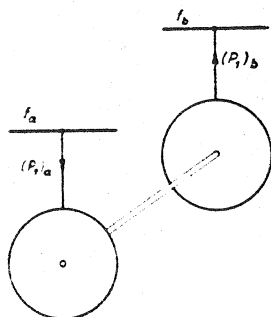
Prvi će raditi kao motor, i uzimati snagu $(P_1)_a$, drugi kao generator, i vraćati u mrežu snagu $(P_1)_b$. Ukupni gubici za oba stroja iznose:

$$(P_g)_a + (P_g)_b = (P_r)_a - (P_r)_b \quad (4)$$

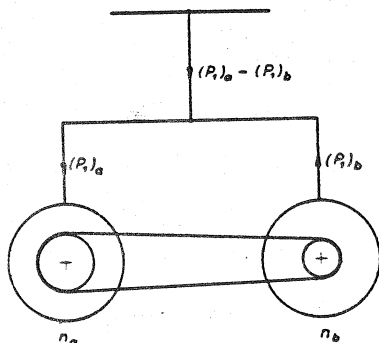
Frekvencije f_a i f_b ne razlikuju se mnogo, a isto tako i magnetski tokovi i struje u oba stroja, pa se može približno uzeti, da su dodatni gubici u oba stroja jednaki. Uz određene pojedinačne gubitke slijede dakle dodatni gubici kao:

$$2P_{a.o.} = (P_r)_a - (P_r)_b - (P_{cu1} + P_o' + P_{rot})_a - (P_{cu1} + P_o' + P_{rot})_b \quad (5)$$

Prednost je ove metode pred onom pod .1 u tome, što se oba mjerenja snage izvode električki, pa je rezultat tačniji.



Sl. 4-53



Sl. 4-54

.3 Povratni rad preko remena. Umjesto spoja na istoj osovini upotrebljen je ovdje remenski pogon s različitim remenicama (sl.4-54), tako da oba motora rade na istoj mreži, ali se vrte različitim brzinama n_a i n_b . Ako je nazivno klizanje s , mora biti :

$$n_a = (1-s) \cdot n_s \quad (6)$$

$$n_b = (1+s) \cdot n_s \quad (7)$$

Prenosni omjer remenica mora dakle biti :

$$m = \frac{D_a}{D_b} = \frac{n_b}{n_a} = \frac{1+s}{1-s} \quad (8)$$

Prednost je metode u tome, što jednim jedinim slogom vatmetara u zajedničkom dovodu možemo odmah izmjeriti razliku $(P_1)_a - (P_1)_b$.

a to je znatno tačnije. Ta razlika predstavlja, međutim, uz sumu gubitaka obaju strojeva još i gubitke remenskog prijenosa :

$$P_{mjer} = (P_1)_a - (P_1)_b = (P_g)_a + (P_g)_b + P_{rem} \quad (9)$$

Gubici remenskog prijenosa sastoje se od gubitaka klizanja remena i gubitaka savijanja remena. Tačnim mjerenjem klizanja obaju motora s_a i s_b dobivamo stvarni omjer brzina:

$$m' = \frac{1 + s_b}{1 - s_a} \quad (10)$$

iz kojega slijedi klizanje remena :

$$s_r = m - m' \quad (11)$$

Gubici klizanja remena iznose :

$$P_{kl rem} = P_{mah} \cdot s_r = (P_{1a} - P_{ga}) \cdot s_r \quad (12)$$

Gubici savijanja remena, uz omjer debljine remena i promjera remenice $d/D \leq 1/100$, iznose manje od 0,3 % prenošene snage. Dodatni gubici slijede iz izraza (9) kao :

$$2P_{dod} = (P_1)_a - (P_1)_b - (P_{cu1} + P_o' + P_{rot})_a - (P_{cu1} + P_o' + P_{rot})_b - P_{rem} \quad (13)$$

Uz nesigurnost u odredjivanju gubitaka remenskog prijenosa mana je ove metode što za svaki ispitivani motor treba tačno prilagodjeni par remenica.

4 Kratki spoj s istosmjernom uzбудom. Izvode se tri mjerenja:

- a) Mjerenje snage koju uzima stator s izvadjenim rotorom priključen na toliki napon nazivne frekvencije, da teče nazivna struja. Ako od ovako izmjerene snage P_{10} odbijemo računске gubitke u statorskome namotu P_{cu10} , dobivamo približno onaj dio dodatnih gubitaka, koji se pokriva izravno električki :

$$P_{10} - P_{cu10} \cong P_{dod el} = P_{cu1 dod} + P_{Fe dod} \quad (14)$$

- b) Pokus kratkog spoja s nazivnom strujom i frekvencijom, koji daje :

$$P_{1k} = P_{rot k} + P_{cu1 k} + P_{dod el} \quad (15)$$

gdje su gubici $P_{dod el}$ poznati iz mjerenja pod a).

- c) Mjerenje mehaničke snage koju dovodimo na osovinu P_{meh} dok rotor izvana tjeramo sinhronom brzinom. Kroz dvije faze statora puštamo pri tome istosmjernu struju veličine :

$$I_s = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot I_{1n} \quad (16)$$

U rotoru se kod toga induciraju struje kao u pokusu kratkog spoja s nazivnom strujom, pa su gubici u rotoru $P_{rot k}$ također jednaki kao u normalnom pokusu kratkog spoja i možemo ih odande uzeti.

Mehanički dovedena snaga pokriva gubitke rotora, gubitke trenja i ventilacije i mehanički pokriveno dodatne gubitke :

$$P_{mech} = P_{rot k} + P_{trv} + P_{dod m} \quad (17)$$

Iz tih mjerenja alijedi:

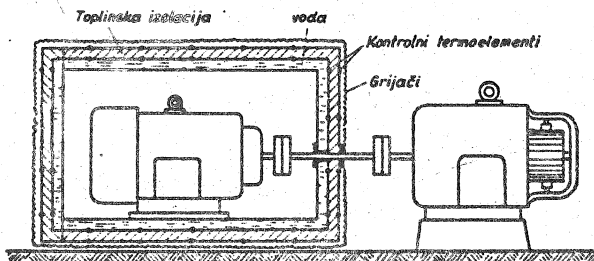
$$P_{dod m} = (P_{mech} - P_{trv}) - (P_{ik} - P_{cu,k}) + P_{dod el} \quad (18)$$

$$P_{dod} = P_{dod m} + P_{dod el} \quad (19)$$

Bez obzira na niz mjerenja, te zbrajanja i odbijanja rezultata, što znatno kvari tačnost, ova metoda je opterećena nizom načelnih nedostataka. Kod mjerenja a) s izvađenim rotorom dodatni gubici $P_{dod el}$ nisu isti kao u normalnom pogonu. Glavno polje biti će sasvim drugačije raspoređeno nego u slučaju kad je rotor na mjestu i znatno smanjeno prema normalnom pogonskom stanju. Sasvim slično vrijedi i za član $P_{dod el}$ kod mjerenja pod b).

5 Mjerenje P_1 i P_2 pri sniženom naponu. Ova metoda ista je kao što je opisana pod .1, samo se radi pri sniženom naponu, i nazivnoj struji. Uslijed toga su mjerene snage P_1 i P_2 manje, pa je pogreška pri računanju razlike $P_1 - P_2 = P'$ manja. Kod pojedinačnih gubitaka treba P' izmjeriti za sniženi napon. Na žalost, ni dodatni gubici ne će ostati isti pri sniženom naponu. Manji iznos glavnog toka znatno mijenja član $P_{Fe dod}$, a uslijed drugačijeg zasićenja promijenit će se i ΔP_{ik} , tako da se u stvari ne može pouzdano reći, koliko su izmjereni rezultati blizu stvarnim dodatnim gubicima u normalnom pogonu.

6 Kalorimetarska metoda. Ukupne gubitke možemo egzaktno iz-



mjeriti, ako ispitivani motor smjestimo u kalorimetar (sl.4-55), i opteretimo ga nazivnim opterećenjem. Toplina stvorena uslijed gubitaka ostaje u kalorimetru, i može se mjeriti iz zagrijanja tekućine u kalorimetru :

$$P_g \cdot t = m \cdot c \cdot \Delta \vartheta \cdot 4190 \quad (Ws) \quad (20)$$

gdje su P_g = gubici u (W), t = trajanje pokusa u (s), m = količina zagrijane tekućine u (kg), c = specifična toplota u (kcal/kg, °C), $\Delta \vartheta$ = izmjereni prirast temperature tekućine u (°C), te 4190 = konstanta preračunavanja jedinica (Ws/kcal). Plašt kalorimetra punjen je vodom, koja cirkulira, a izvana dobro toplinski izoliran. Kako bi se izbjegao gubitak topline kroz plašt, može se oko toplinske izolacije smjestiti grijače, i automatski ih regulirati tako, da temperatura s vanjske i unutarnje strane toplinske izolacije bude jedna te ista. Bez pada temperature nema ni prolaza topline kroz izolaciju u bilo kojem smjeru.

Da bi mjerili ukupne gubitke, puštamo kroz kalorimetar određeni protok tekućine :

$$q = \frac{m}{t} \quad (kg/s) \quad (21)$$

Mjerenje započinjemo tek pošto je uspostavljeno stacionarno stanje, tj. pošto je zagrijan i motor i kalorimetar. Vatmetrima kontroliramo snagu koju motor uzima P_1 , a preciznim termometrima prirast temperature $\Delta \vartheta$, te računamo ukupne gubitke iz (20). Dodatne gubitke dobivamo onda odbijanjem svih ostalih pojedinačnih gubitaka.

Drugi je način mjerenja, da ostavimo u kalorimetru istu vodu za vrijeme čitavog pokusa. U tom slučaju isključimo motor nakon vremena t , i pustimo da se temperature unutar kalorimetra izjednače. Razvijena toplota utrošena je na zagrijavanje mase kalorimetra m_1 , zraka u kalorimetru m_2 , motora m_3 , i vode m od početne temperature na konačnu temperaturu :

$$\Delta \vartheta = \Delta \vartheta_1 = \Delta \vartheta_2 = \Delta \vartheta_3 = \vartheta - \vartheta_0 \quad (22)$$

Pri tome vrijedi :

$$P_g \cdot t = (m_1 c_1 + m_2 c_2 + m_3 c_3 + mc) \cdot \Delta \vartheta \cdot 4190 \quad (23)$$

Da bi eliminirali iz računa nepoznate mase i specifične topline pojedinih dijelova uređaja, izvršimo još jedno baždarno mjerenje s poznatim gubicima, npr. tako da statordi namot grijemo istosmjernom strujom, i mjerimo dovedenu snagu P' kroz vrijeme t' . Nakon izjednačenja temperatura izmjerimo prirast temperature vode $\Delta \vartheta'$, pa računamo :

$$P' t' = (m_1 c_1 + m_2 c_2 + m_3 c_3 + mc) \cdot \Delta \vartheta' \cdot 4190 \quad (24)$$

Iz (23) i (24) slijede gubici :

$$P_g = P' \cdot \frac{1'}{1} \cdot \frac{\Delta \varphi}{\angle \varphi} \quad (25)$$

Kalorimetrička mjerenja zahtijevaju skupe uređaje, pomni postupak i dosta vremena, pa nisu prikladna za svakodnevna rutinska mjerenja. Ova je metoda, međutim, jedina dovoljno egzaktna i dovoljno tačna da se utvrdi prava vrijednost dodatnih gubitaka, pa je potrebna za analize na modelima i prototipima.

4.5.4 Korisnost η . Iz mjerenih gubitaka pri različitim opterećenjima crtamo karakteristiku $\eta = f(P_1)$, kako je izloženo u 4.4.1 i prikazano na sl. 4-24 . Tamo je također pokazano, da krivulja $\eta = f(I_1)$ ima maksimum kod iste snage P_1 , kod koje pravac iz ishodišta tangira krivulju $P_g = f(P_1)$.

Kod kolutnih motora gubici na četkicama i vanjskim otpornicima uključenim u rotorski krug uključeni su u rotorske gubitke prema 4.5.1 , jednaždba (2). Ako uključimo više otpora u rotorski krug, magnetske prilike u stroju ostati će nepromijenjene, a isto tako i struje u rotoru i statoru potrebne za svladavanje određenog momenta M . Uz iste struje i isti $\cos \varphi$ bit će i snaga P_1 nepromijenjena. Drugačije je sa snagom na osovini : uz k -puta veći rotorski otpor potrebno je i k -puta veće klizanje, da bi u rotoru potekle iste struje, tj. da bi motor svladao isti moment M (vidi jednažbu (2) u 4.3.4). Vrijedi dakle :

$$s_R = k \cdot s \quad (1)$$

$$n_R = \frac{1 - k \cdot s}{1 - s} n \quad (2)$$

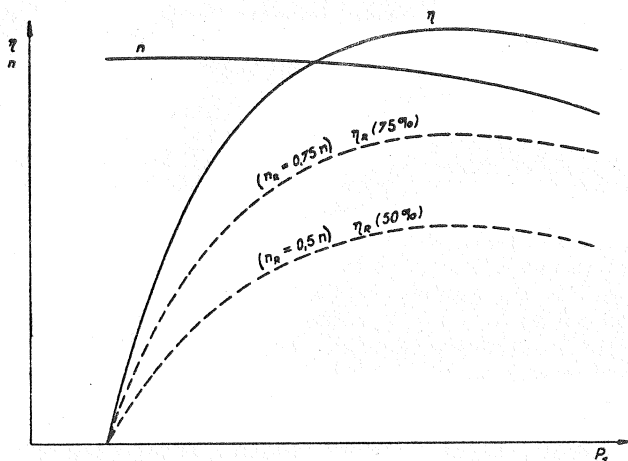
Uz isti moment M , zanemarujući gubitke koje pokriva razvijena mehanička snaga, a koji su ovdje mali prema rotorskim gubicima, korisna snaga na osovini bi. će proporcionalna brzini vrtnje :

$$P_{2R} = \frac{n_R}{n} \cdot P_2 \quad (3)$$

Odatle slijedi, da će se i korisnost η pod regulacije brzine vrtnje otporima u rotorskom krugu mijenjati proporcionalno s brzinom vrtnje :

$$\eta_R = \frac{P_{2R}}{P_1} = \frac{n_R}{n} \cdot \frac{P_2}{P_1} = \frac{n_R}{n} \eta \quad (4)$$

Nije dakle potrebno snimati krivulje η za različite otpore u rotorskom krugu, već je dovoljna krivulja za kratko spojene kolute (sl.4-56). Sve ostale krivulje dobivamo jednostavnim putem računski.



Sl. 4-56

4.6 Zagrijavanje asinhronog stroja

Pokusom zagrijavanja treba utvrditi, hoće li u normalnim pogonskim uslovima zagrijavanje na pojedinim mjestima u stroju ostati u granicama, koje su određene propisima obzirom na osjetljivost aktivnih dijelova prema povišenoj temperaturi, odnosno obzirom na sigurnost pogona. Dopusštena zagrijanja prikazana su u tabeli 3.8-1 u poglavlju 3.8.5. Opterećenje asinhronog stroja pri pokusu zagrijavanja provodimo redovito istosmjernim generatorom za opterećenje prema 4.4.5, ili dinamo-vagom prema 4.4.6.

4.6.1 Mjerenja zagrijanja statora. Dok smo kod sinhronih strojeva često imali jedinice takve veličine, da je ugradnja otporničkih termometara ili termoelemenata u aktivni dio stroja bila ne samo provediva, nego i propisana, kod asinhronih strojeva jedinice su znatno manje, i termometri se normalno ne ugrađuju. Temperatura statorskog namota, i odatle zagrijavanje, određuje se mjerenjem otpora statorskog namota bilo mostom, bilo U-I metodom. Uključivanje istosmjerne struje za mjerenje otpora nije pri tome velik problem, kao što je to bilo kod transformatora, jer je uslijed zračnog rasporeda između statora i rotora induktivni otpor znatno manji no što bi bio kod magnetskog kruga zatvorenog potpuno u željezu, a radni otpor je relativno veći uslijed tijesnog prostora u utorima i uslijed glava namota. Vremenska konstanta je uslijed toga znatno manja, i samo mjerenje se može brzo provesti.

4.6.2 Mjerenje zagrijavanja rotora. Kod kolutnih rotora postupak je isti kao kod statora. Posebno treba paziti, da se priključci za mjerenje pada napona prislonu direktno na klizne kolute, kako se ne bi mjerio i pad napona od strujnih dovoda na klizne kolute.

.. Temperatura kaveznih rotora obično nas ne zanima, jer nema u blizini izolacije, koja bi bila ugrožena. Iznimno je potrebno kontrolirati i zagrijavanje kaveznih rotora, kao npr. kod motora u izvedbi s povišenom sigurnosti za rudnike, kod kojih se zahtijeva, da temperatura ni na kojem mjestu ne smije premašiti određenu vrijednost čak ni onda, ako pogonski topli motor ostane određen broj sekundi u kratkom spoju na punom naponu. Mjerenje temperature rotora vršimo u tom slučaju termoelementima, koje kroz posebno predviđene rupe na ležajnim štitovima pritisnemo na zaustavljeni rotor. Druga je metoda, da motor opteretimo dinamo-vagom, i da mjerimo klizanje hladnog i toplog motora pri tačno istom zakretnom momentu M na osovini. Naime, prema (2) u 4.3.4 zakretni moment bit će isti onda, ako je R_2/s nepromijenjeno, pa vrijedi :

$$\frac{R_{2\phi}}{R_2} = \frac{s_\phi}{s_0} \quad (1)$$

Iz odnosa :

$$\frac{235 + \phi}{235 + \phi_0} = \frac{R_{2\phi}}{R_{2\phi_0}} \quad (2)$$

slijedi onda odmah zagrijanje rotora.

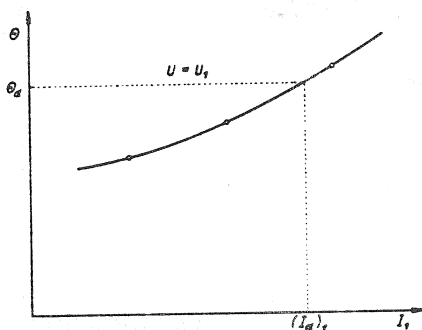
4.6.3 Opterećenje. Za provedbu pokusa zagrijavanja potrebno je opteretiti motor kroz dovoljno dugo vremena uz uslove koji odgovaraju nazivnom opterećenju. Odstupanje napona od nazivne vrijednosti znači drugačije gubitke u željezu, drugačiju struju statora i drugačiju struju rotora. Odstupanje frekvencije znači osim svega toga još i drugačiju brzinu, što znači i drugačije hladjenje. Posljedice svih ovih odstupanja teško je ocijeniti, pa se ne mogu korigirati rezultati. Potrebno je, umjesto toga, održavati tačno nazivni napon i frekvenciju. Ako mreža nije dovoljno stalna, treba za ispitivanje upotrebljavati agregat ispitne stanice, kojim možemo održavati napon i frekvenciju na nazivnoj vrijednosti.

Nazivnu snagu možemo održavati kontrolom momenta na osovini s pomoću dinamo-vage, ili na taj način, da snimimo karakteristike opterećenja na pogonski toplom stroju, s kojih onda očitamo nazivnu struju, te provodimo pokus zagrijavanja pri nazivnoj struji. Ovakav postupak je mnogo praktičniji, ali je potrebno prethodno snimiti karakteristike opterećenja.

Poseban je problem opterećenje motora namijenjenih intermitiranim pogonu. Uz tačno poznat ciklus opterećenja moglo bi se računski promatrati zagrijavanje i hladjenje u pojedinim

dijelovima ciklusa, i odatle izvući zaključke. Međutim, kod čestog uklapanja biti će toplina razvijena za vrijeme zaleta bitni dio topline koja zagrijava motor, pa je treba uzeti u obzir. Jedinu pouzdani način mjerenja je taj, da se tačno reproduciraju pogonski uslovi, i to ne samo u pogledu ciklusa opterećenja, već i u pogledu priključenih zamašnih masa, koje motor svaki puta mora ubrzati.

4.6.4 Termička granična snaga. Ako snimimo zagrijavanje motora za nekoliko različitih vrijednosti statorske struje, pri konstantnom naponu, možemo nacrtati krivulju zagrijavanja u ovisnosti o struji prema sl. 4-57. S ove krivulje lako je očitati struju $(I_a)_1$, kod koje će zagrijanje doseći propisima dopuštenu vrijednost. Korisna snaga P_2 , koja odgovara toj struji, a koju možemo očitati s karakteristika opterećenja prema sl. 4-25 i 4-24, predstavlja termičku graničnu



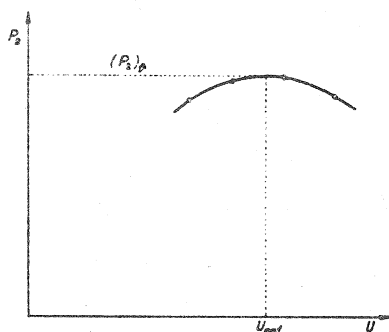
Sl. 4-57

snagu pri naponu U_1 . Uz drugačije zasićenje biti će ta snaga drugačija. Kako ne bi prematali motor za svaki novi pokus, radimo s istim namotom, ali s drugim naponom na stzaljkama. Za svaki novi napon izvršimo nove pokuse zagrijavanja pri različitim strujama, i odredimo termičku graničnu snagu za taj napon. Tako odredjene termičke granične snage za napone U_1 , U_2 , U_3 itd. unesemo u dijagram u ovisnosti o naponu (sl.4-58). S ovakovog dijagrama možemo očitati termičku graničnu snagu modela, i napon kod kojega se ta snaga može postići. Odatle je lako izračunati podatke za prematanje, kako bi iste magnetske i električke prilike, dakle i istu graničnu snagu, dobili pri nazivnom naponu.

4.7 Podaci natpisne pločice

Svaki stroj mora nositi natpisnu pločicu, s koje se vide svi osnovni podaci. Osim oznake proizvođača, fabričkog broja, tipa stroja i sličnih podataka, asinhroni motor ima na pločici označenu nazivnu snagu, koja se označava u kW, i predstavlja korisnu mehaničku snagu na osovini stroja, zatim broj faza, nazivnu frekvenciju, nazivni napon, vrstu spoja namota, nazivnu struju, faktor snage $\cos \varphi$ i brzinu vrtnje n . Ukoliko nije ništa posebno navedeno, nazivna snaga se odnosi na trajno opterećenje. Ako nije tako, vrsta opterećenja mora biti navedena. Često se navodi klasa izolacije i dopušteno zagrijavanje, te oznaka propisa koje stroj zadovoljava. Kod kolutnih rotora potrebno je još označiti i napon i struju rotora.

4.7.1 Nazivna snaga. Kod projektiranja stroja nije dovoljno voditi računa o dopuštenom zagrijavanju, već treba uzeti u obzir sve karakteristične vrijednosti, kao što je faktor snage, korisnost, potezna struja i potezni moment, prekretni moment i ostalo. Zato nazivna snaga obično nije identična s termičkom graničnom snagom modela. Kod određivanja ove posljednje prema sl.4-58 trebalo bi u isti dijagram ucrtati



Sl.4-58

i ostale karakteristične vrijednosti u ovisnosti o naponu. Tek na osnovu svih ovih podataka mogli bi odlučiti, kako treba namotati motor, jer će često biti važniji znatno bolji $\cos \varphi$ od nekoliko vata dobivene snage, ili slično. Osim toga, kod većih strojeva, koji se projektiraju pojedinačno, snaga je definirana narudžbon, a kod manjih strojeva, koji se proizvode serijski, snaga je definirana brojkama u standardnom redu snaga.

Ako je naručen motor od 1500 kW, onda će ta brojka stajati na plo-

čici iako bi motor možda zadovoljavao i za 1550 kW. Isto tako, ako motor zadovoljava i za 3,1 kW, on će ipak biti označen sa 3 kW, jer je to snaga iz standardnog reda. To je u serijskoj fabrikaciji potrebno već i zbog neizbježivih rasipanja u zagrijavanju pojedinih primjeraka iste serije, uslijed sitnih razlika u materijalu i izradi. Zbog toga je uvijek povoljnija mala rezerva u zagrijavanju, umjesto potpunog iskorištenja modela, jer se mogu ponešto razlikovati ne samo zagrijavanja strojeva iz serijske fabrikacije napravana onima kod prototipa i pokusne serije, već i zagrijavanja pojedinih serija i pojedinih strojeva unutar serije među sobom.

4.7.2 Rotorski podaci. Poznavanje napona i struje rotora potrebno je zbog odabiranja uputnika ili regulatora. Napon rotora u , kako je definiran u 4.2.1, možemo lako izmjeriti među kliznim kolutima otvorenog mirnog rotora, uz nazivni napon na stezaljkama statora. Struja rotora i odnosi se na nazivno opterećenje motora. Zbog njene niske frekvencije teško ju je mjeriti običnim instrumentima, ali je nije teško izračunati. Uz klizanje s_n pri nazivnoj snazi P_2 bit će napon induciran u rotoru (računat među kliznim kolutima) :

$$U_2 = s_n \cdot u \quad (1)$$

pa je električka snaga rotora, koja se sva pretvara u toplinu u rotoru, uz struju po kolutu i :

$$P_{rot} = \sqrt{3} \cdot s_n \cdot u \cdot i \quad (2)$$

Ta ista snaga slijedi iz snage u rasporu:

$$P_{rot} = s_n \cdot P_2 \quad (3)$$

odnosno iz korisne snage na osovini :

$$P_{rot} = \frac{s_n}{1 - s_n} \cdot P_2 \quad (4)$$

tako da se usporedbom izraza (2) i (4) dobiva rotorska struja :

$$i = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot u \cdot (1 - s_n)} \quad (5)$$

Čak i gruba procjena umjesto tačne vrijednosti s_n ne će odviše izmijeniti rezultat.

4.7.3 Tolerancije. Vrijednosti na natpisnoj pločici bit će za sve motore iste serije jednake, unatoč tome, što će se stvarne vrijednosti nešto razlikovati. Uslijed rasipanja podataka izvedenih motora bit će dakle informacija na natpisnoj pločici u pojedinim slučajevima nužno netačna. Slično vrijedi i u slučajevima, gdje su podaci unaprijed garantirani, pa se na izvedenom stroju pokazuju manja odstupanja. Kako bi se vrijednosti ovih odstupanja ograničile na razumnu mjeru, propisi određuju tolerancije za odstupanje nekih veličina od garantiranih vrijednosti. Tako npr. vrijede tolerancije prema tabeli 4.7-1. Medjutim, prekretni moment uz odbijenu toleranciju ne smije nikad biti manji od $1,6 \cdot M_n$ kod motora za trajno ili kratkotrajno opterećenje, odnosno $2 \cdot M_n$ kod motora za intermitirano opterećenje.

Tabela 4.7-1

Garantirana vrijednost	Depuštana vrijednost
1. Faktor snage $\cos \varphi$	$\pm \frac{1}{6} (1 - \cos \varphi)$, ali najmanje 0,02, a najviše 0,07
2. Korisnost η - metodom pojedn načnih gubitaka	- 0,1 (1 - η)
- metodom uzlazne i izlazne snage	- 0,15 (1 - η), ali najmanje 0,7%
3. Klizanje s	$\pm 20 \%$
4. Potezna struja	$\pm 20 \%$
5. Potezni moment	- 10 %
6. Prekretni moment	- 10 %

4.8. Mjerenje šumova.

Borba protiv buke zahtijeva sve češće specijalno izvedene strojeve koji rade tiho, i na koje se u tom pogledu postavljaju određeni zahtjevi. Za strojeve opće namjene nema još definiranih zahtjeva u pogledu jačine njihovog šuma, ali proizvođač nastoji graditi strojeve sa što manje šumova. Zbog toga se sve veća pažnja posvećuje šumovima, utvrđivanju njihovih uzroka, te njihovom mjerenju i otklanjanju.

4.8.1 Uzroci šuma. Po mjestu gdje šumovi rastaju možemo ih podijeliti na magnetske šumove, šumove od ventilacije i šumove od ležaja i ostalih mehaničkih izvora. Magnetski šumovi mogu potjecati od magnetostrikcije uslijed glavnog toka, u kojemu slučaju se čuje karakterističan ton frekvencije 100 Hz, ili od varijacija indukcije, koje su uzrokovane utorima, nesimetrijama u statoru ili rotoru i slično. Svi ovi šumovi pojavljuju se kad je stroj uzbudjen, dakle pod naponom. Postoje šumovi uslijed varijacija indukcije uzrokovanih strujama u rotoru. Cvi se pojavljuju tek pod opterećenjem, dok ih u praznom hodu nema. Rupe u rotoru, krilca ventilatora i slično uzrokuju zvukove određene frekvencije, no isto tako šumove uzrokuje i strujanje zraka u rashladnim kanalima, osobito pri velikim brzinama i naglim promjenama presjeka, te vibracije dijelova uz koje zrak struji. Izvor znatnih šumova mogu biti i valjni ležaji, rezonancija pojedinih dijelova mehaničke konstrukcije, nebalansiranoost rotora i slično. Sve

mehaničke šumove, koji nisu vezani uz magnetska polja, možemo mjeriti neposredno nakon isključivanja sklopke, dok se motor još vrti punom brzinom.

Prema načinu prenošenja šumove možemo podijeliti na one, koji se prenose ventilacionim zrakom, i one, koji se prenose preko kućišta i podnožja. Ove posljednje možemo ublažiti postavljanjem stroja na elastične podloge s prigušenjem, oblaganjem kućišta sreastvima za prigušenje i slično, dok je one prve teško prigušiti.

4.8.2 Definicije. Fizikalna mjera za zvuk kao valnu pojavu promjene pritiska u zraku je zvučni pritisak p_w u mikrobarima (μb). Specifična energija zvuka vezana je sa zvučnim pritiskom izrazom :

$$E = \frac{p_w^2}{400} \quad \left(\frac{\mu W}{cm^2} \right) \quad (1)$$

Donjom granicom čujnosti smatrano kod frekvencije 1000 Hz zvučni pritisak:

$$p_0 = 0,0002 \quad (\mu b) \quad (2)$$

Kao "razinu zvučnog pritiska" u decibelima (db) definiramo :

$$L = 20 \cdot \log \frac{p_w}{p_0} \quad (db) \quad (3)$$

Mnogobrojni pokusi su pokazali, da tonovi iste razine zvučnog pritiska a različitih frekvencija ne izazivaju u ljudskom uhu osjećaj iste glasnoće, tj. čovjek ih subjektivno ne ocjenjuje kao jednako jake. Ako uzremo ton frekvencije 1000 Hz kao polaznu tačku, ustanoviti ćemo, da je ljudsko uho to manje osjetljivo, što je frekvencija niža. Osjetljivost se nešto povećava kod viših frekvencija do oko 5000 Hz, a dalje se opet nešto smanjuje. Razlike u osjetljivosti kod različitih frekvencija su to veće, što je ton niži. Kako bi se uzela u obzir i karakteristika osjetljivosti ljudskog uha, uvedena je jedinica za mjerenje jakosti šuma "fon". Jakost tona L_p u fonima jednaka je razini zvučnog pritiska L u decibelima tona od 1000 Hz, koji većina ocjenjivača na osnovu subjektivne ocjene smatra jednako jakim. Na osnovu izvršenih pokusa dobivena razlika između razine zvučnog pritiska i fona prikazana je u tabeli 4.8-1.

Instrument za mjerenje šuma treba da ima osjetljivost prilagođenu podacima iz tabele 4.8-1, a skalu baždarenu u fonima.

Šum električkih strojeva sastavljen je od mnogo frekvencija. Kod direktnog mjerenja instrument registrira ukupnu efektivnu vrijednost. Ako se pojedine frekvencije ne razli-

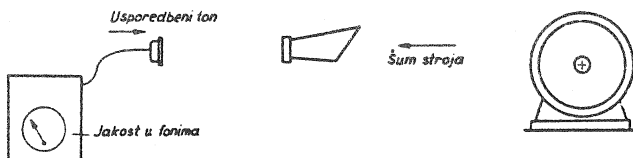
kuju jako mnogo, onda se ovako izmjereni rezultat dosta dobro podudara sa subjektivnom ocjenom jakosti šuma. U

Tabela 4.8-1

Korekcija $\Lambda - \Lambda_f$			
Frekvencija	$\Lambda_f \geq 60$ fona	$60 > \Lambda_f \geq 30$ fona	$\Lambda_f < 30$ fona
31,5	+ 19	+ 39	+ 53
63	+ 10	+ 26	+ 39
125	+ 4	+ 16	+ 27
250	+ 2	+ 8	+ 15
500	+ 1	+ 3	+ 5
1000	0	0	0
2000	- 1	- 3	- 3
4000	- 1	- 2	- 2
8000	+ 3	+ 3	+ 3
12500	+ 8	+ 10	+ 10

koliko se u šumu ističu izraziti tonovi vrlo različitih frekvencija, treba to uz naznaku ukupne jakosti šuma posebno istaknuti.

4.8.3 Metode mjerenja. Najjednostavnija, tzv. subjektivna metoda bazira se na usporedbi šuma stroja s usporedbenim tonom (sl.4-59). Ovaj ton možemo po želji pojačavati, i očitati mu jakost u fonima. Na osnovu subjektivne ocjene, da

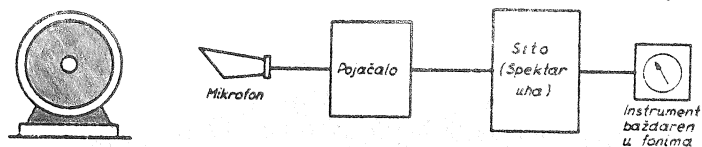


Sl. 4-59

je šum u jednoj slušalici jednako jak kao ton u drugoj slušalici, očitavamo jakost šuma u fonima. Mjerenje je pouzdano, ako su frekvencije slične.

Druga, tzv. objektivna metoda hvata šum mikrofonom, pojačava ga, propušta kroz sito prilagođeno frekventnoj osjet-

ljivosti uha, i na kraju direktno pokazuje jakost šuma u fonima na instrumentu (sl.4-60), a da nije bilo nikakvog

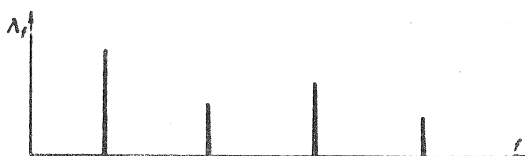
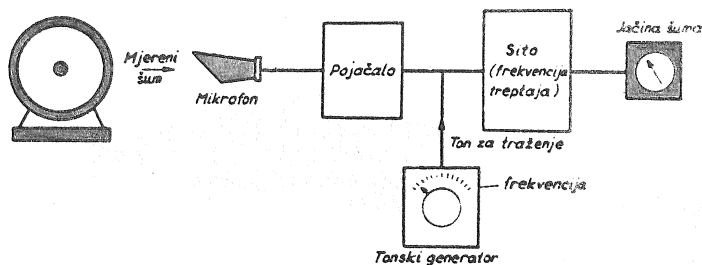


Sl. 4-60

subjektivnog ocjenjivanja, osim unaprijed utvrđene frekventne osjetljivosti uha prenesene u karakteristiku sita.

Na ovakvom ili sličnom principu radi većina instrumenata za mjerenje šuma. Za tačnije analize može se umjesto univerzalnog sita upotrebljavati sita koja propuštaju samo frekvencije tonova u opsegu jedne oktave, ili jedne terce. Na taj način dobivamo jakost šuma za svako oktavno ili terčno područje zasebno, što nam kazuje mnogo više. Iz takovog mjerenja može se nacrtati spektar šuma, tj. jakost šuma u ovisnosti o frekvenciji, što je vrlo korisno pri određivanju uzroka šumova.

Slično se može odrediti spektar šuma s pomoću tona za traženje (sl.4-61). Mjereni šum se preko mikrofona prima i pojačava, te se miješa sa sinusnim tonom za traženje, kojemu



Sl. 4-61

po volji mijenjamo i očitavamo frekvenciju. U blizini izrazitih tonova nastaju treptaji između tona za traženje i tona

iz šuma. Sito propušta samo niske frekvencije treptaja, a na instrumentu očitavano direktno jačinu šuma dotične frekvencije. Na sl. 4-61b prikazan je "spektar šuma" dobiven ovakvim postupkom.

4.8.4 Provedba mjerenja. Mjerenje šuma vršimo na više mjesta u jednakoj udaljenosti od konture stroja (obično 1 m, ali može biti i manje), a u međusobnom razmaku od 1 m do najviše 1,5 m. U konturu stroja ne računaju se odvojeni ležaji. Kod strojeva s horizontalnom osovinom mjerenja se vrše u visini osovine. Kod strojeva s vertikalnom osovinom mjerne tačke uzimamo u vertikalnoj ravni kroz osovinu stroja, ili, kod velikih promjera, u horizontalnoj ravni 1,5 m iznad poda. Kao jakost šuma uzima se aritmetička srednja vrijednost mjerenja u pojedinim tačkama. Ako se izmjerene vrijednosti međusobno razlikuju za više od 6 fona, treba broj tačaka udvostručiti. Pri ispitivanju treba stroj postaviti tako, da se zvuk što manje prenosi preko postolja i sl. a što više direktnom emisijom kroz zrak. To se postiže postavljanjem na elastične podloške. Takodjer treba izbjeći refleksiju zvuka od velikih priteznih ploča i slično.

4.8.5 Utjecaj prostorije. Prostorija u kojoj se mjeri mora biti takova, da na mjestu gdje je stroj postavljen bude reflektirani šum malen u usporedbi s direktno prenesenim šumom. Da bi to provjerili, emitiramo zvuk preko vibratora sitnih dimenzija, i mjerimo njegovu jakost u udaljenosti koju udvostručujemo - npr. 25 cm, 50 cm, 1 m, 2 m. Ako se jakost zvuka svaki puta smanji za najmanje 4 fona, prostorija zadovoljava zahtjevu.

Jakost šuma prostorije u kojoj se vrši mjerenje mora biti bar 8 fona ispod najniže vrijednosti dobivene pri mjerenju šuma stroja. Ako to nije ispunjeno, treba korigirati rezultat tako, da mjerimo ukupnu jakost šuma Λ_u , i jakost šuma prostorije Λ_o (uz isključen ispitivani stroj). Ako razlika tih očitavanja iznosi $\Lambda_u - \Lambda_o$ prema prvom redu slijedeće tabele, onda od ukupne jakosti šuma treba odbiti iznos $\Delta\Lambda$ prema drugom redu, da bi dobili jakost šuma stroja Λ_s :

Tabela 4.8-2

$\Lambda_u - \Lambda_o$	2	3	4 ÷ 6	7 ÷ 8	fona
$\Delta\Lambda = \Lambda_u - \Lambda_s$	4	3	2	1	fona

Ovaj postupak daje ispravne rezultate samo onda, kad je frekventni sastav žumova Λ_0 i Λ_1 sličan. Kad to nije slučaj, ili kad se treba prilagoditi mjernom području instrumenta kojim raspolažemo, može se mjerenje izvršiti u udaljenosti, koja je toliko manja od 1 m, da sve mjerenje vrijednosti budu bar 8 fona iznad žuma okoline. Možemo udaljenost i povećati, ako mjereno područje zahtijeva smanjivanje mjerenih vrijednosti. Preračunavanje na udaljenost od 1 m vršimo dodavanjem po 4 fona za udvostručenu udaljenost, kako se vidi iz slijedeće tabele :

Tabela 4.8-3

Udaljenost	25 cm	50 cm	1 m	2 m	4 m
Korekcija	- 8 fona	- 4 fona	0	+ 4 fona	+ 8 fona

5. ISPITIVANJE ISTOSMJERNOG STROJA

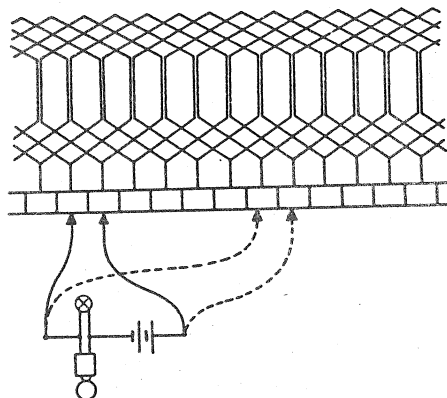
5.1 Ispitivanje u toku proizvodnje

Kao i kod ostalih električkih strojeva u toku fabricacije istosmjernih strojeva potrebne su brojne kontrole. Mag - netski tok doduše miruje relativno prema statoru, ali je zato paket rotora u slučaju spoja među limovima izvrnut istim opasnostima kao željezni paket svakog izmjeničnog stroja. S veličinom stroja ta opasnost raste. Kao i kod izmjeničnih strojeva potrebna je kontrola izolacije pojedinih namota, a povrh toga kontrola izolacije i ispravnosti priključaka na kolektor. Spajanju i označavanju različitih namota istosmjernog stroja treba posvetiti osobitu pažnju. Ispravno postavljanje četkica daljnja je zadaća kontrole u toku proizvodnje, koja može prištediti mnogo vremena i troškova kasnije u pogonu.

5.1.1 Kontrola rotorskog namota. Komplikiranije izrada namota kod istosmjernog stroja uzrokuje i veću mogućnost greške. Osobito se lako može dogoditi greška kod priključivanja namota na kolektor, bilo da spoj s lamelom kolektora ne bude siguran, bilo da se pri lemljenju dvije susjedne lamele međusobno spoje. Osim toga postoji, dakako, mogućnost ošteće-

nja izolacije prema željeznom paketu, i između zavoja svitaka, kao što je to bio slučaj i kod strojeva izmjenične struje. Ne treba zaboraviti, da se u svitcima rotora istosmjernog stroja induciraju izmjenični naponi, koji se tek preko kolektora ispravljaju. U slučaju spoja među zavojima ili dvostrukog spoja sa željezom posljedice će dakle biti slične kao kod namota asinhronog ili sinhronog stroja.

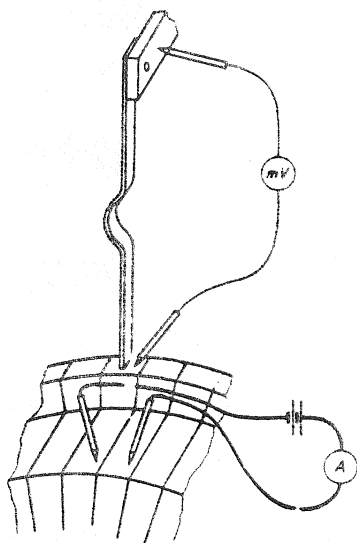
Kontrola ispravnog spoja namota s lamelom kolektora može se grubo provesti s pomoću kontrolne žaruljice ili zvonca (sl. 5-1), kojim kontroliramo vodljivu vezu između susjednih lamela po čitavom kolektoru. Lamela bez spoja s namotom izolirana je prema susjednim lamelama, što će se odmah pokazati. Kod velikih kolektora sa zastavicama postoji opasnost, osobito u pogonima koji su vezani uz udarce i vibracije, da se spojevi olabave. Prelazni otpor poraste, i nastaju lokalna zagrijavanja i smetnje u komutaciji, ali spoj nije potpuno prekinut, pa je defektno mjesto teško pronaći. U takovom slučaju treba između susjednih lamela pustiti veću struju u namot, pa s pomoću dovoljno osjetljivog milivoltmetra kontrolirati pad napona od kolektorske lamele do rotorskog vodiča, koji mora na svim lamelama biti približno iste veličine (sl. 5-2).



Sl. 5-1

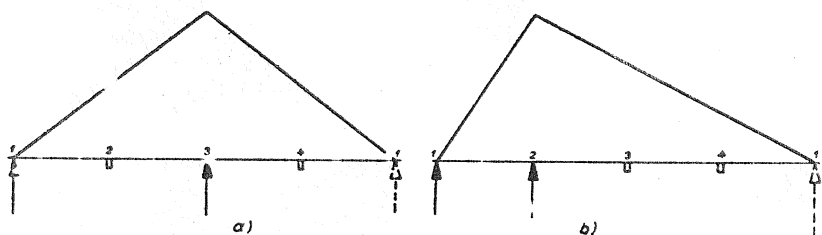
Eventualni spoj među lamelama lako je ustanoviti mjerenjem otpora između susjednih lamela, koji mora biti svuda isti. Kod velikih strojeva i strojeva za male napone, gdje su otpori vrlo niski, ovakovo je mjerenje teže provesti. Tu je zgodnije dovesti struju na dvije lamele kolektora, pa mjeriti pad napona u namotu između susjednih lamela po čitavom kolektoru. Ako su dovodi odabrani tako, da dijele namot na dva jednaka dijela (sl. 5-3a), onda će pad napona svuda biti iste veličine. Ako

dovodi ne dijele namot na jednake dijelove, padovi napona između susjednih lamela iste grane bit će isti, ali u jednoj i



Sl. 5-2

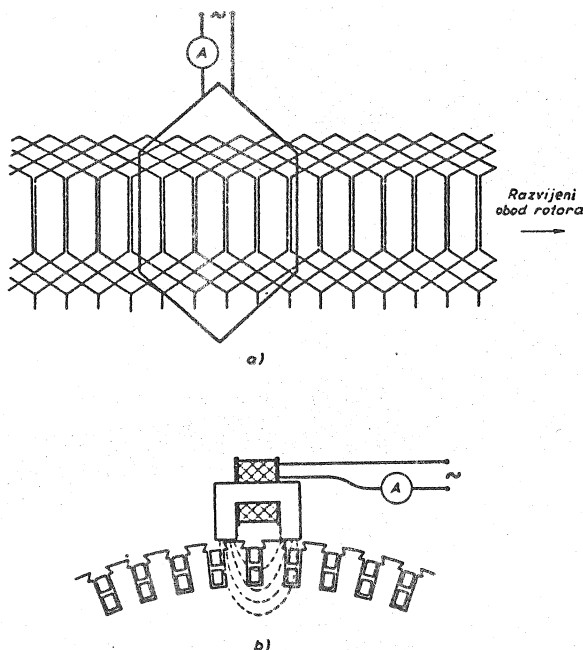
drugoj grani iznos tog pada napona bit će različit (sl. 5-3b). Dovoljno osjetljivim milivoltmetrom može se ovo mjerenje vrlo tačno izvesti. U slučaju da rotor ima spojeve za izjednačenje,



Sl. 5-3

ova metoda ne će uvijek dati rezultat, pogotovo ako se ne radi o direktnom spoju između lamelama kolektora, već o spoju između zavoja, koji obuhvaća manji dio zavoja jednog svitka. Jedini pouzdan način da se to otkrije predstavlja pokus s izmjeničnim naponom. Bazira se na tome, da uz rotor prislonimo svitak jednake širine kao što su svitci ispitivanog rotora, i da ga uzбудimo izmjeničnom strujom (sl. 5-4a). Ispravan svitak rotora ispod ovako uzbudjenog primarnog svitka predstavlja sekundarni namot transformatora u praznom hodu, dok neispravan

svitak predstavlja sekundar u kratkom spoju. Pomicanjem ispitnog svitka po površini čitavog rotora možemo tačno locirati neispravan svitak, koji odmah prepoznamo i po primarnoj struji, koja



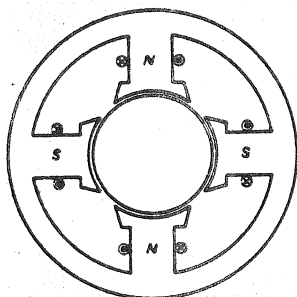
Sl. 5-4

poraste, i po karakterističnom brujanju. Drugi takav uređaj ima željeznu jezgru, i može se izvesti manjih dimenzija. Kad jezgra obuhvati utor u kojemu leži strana bolesnog svitka, struja u primaru i brujanje ukazuju na grešku (sl.5-4b). U utoru se nalaze dva sloja, tj. strane dvaju svitaka, pa je potrebno pronaći na obodu i drugi utor, koji pokazuje istu pojavu, da bi tačno odredili, koji je od oba svitka u kvaru.

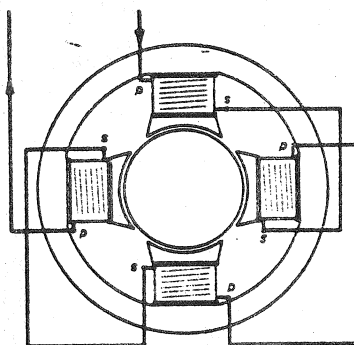
5.1.2 Kontrola statorskih namota. Kod statorskih namota mnogo je manja mogućnost greške, a u slučaju greške opasnost je manja, jer su to namoti protjecani istosmjernim strujama, tako da nema induciranih struja kratkog spoja. Kvar se dakle svodi na ispadanje odredjenog broja zavoja iz funkcije, a nema naglog širenja i velike štete.

U proizvodnji može lako nastati greška pri spajanju različitih namota medju sobom. Namoti pojedinih polova moraju biti medjusobno spojeni tako, da jedan za drugim naizmjence slijede N-pol i S-pol (sl.5-5). Često se to može lako ustanoviti

običnim pregledom. Ako slijedimo zavoje od početka prema kra-
ju namota, onda oni obilaze oko polova naizmjenice u smjeru
kazala na uri, i u obrnutom smjeru, gledano uvijek od rotora



a)



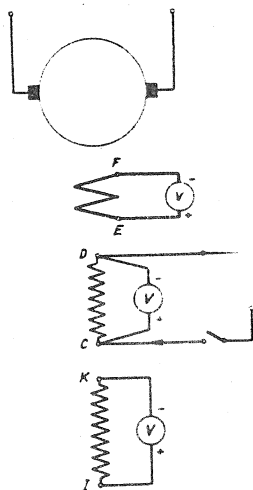
b)

Sl. 5-5

prema površini pola. Smjer struje - gledano na površinu pola -
u smjeru kazala na uri daje S-pol, a nasuprot smjeru kazala
na uri, N-pol. Budući da je krajeve namota uvijek lako zami-
jeniti, kod kontrole u proizvodnji bitno je samo to, da jedan
za drugim slijede raznoimeni polovi, tj. da je međusobni spoj
namota pojedinih polova ispravan. Ako su svitci svih polova
motani u istom smislu, te ako su počeci namota označeni sa P,
a svršeci sa S, onda spajanje mora prema sl. 5-5b teći :
 $P_1, S_1 - S_2, P_2 - P_3, S_3 - S_4, P_4 \dots$ itd, dakle uvijek
početak s početkom, i svršetak sa svršetkom namota idućeg sus-
jednog pola. Oznake početaka i svršetaka mogu se provjeriti
tako, da kroz namot svakog pola pustimo istosmjernu struju u
smjeru P-S. Magnetska igla mora u tom slučaju uz površinu sva-
kog pola pokazati otklon istog smisla. Na isti način možemo
provjeriti već spojeni namot polova: ako pustimo kroz namot
istosmjernu struju, magnetska igla, primaknuta polnim nastav-
cima, mora pokazati naizmjenice raznoimeni polaritet. Pri tome
je potreban oprez, jer bi naglo primicanje igle moglo dovesti
do premagnetiziranja prije no što se igla okrenula. U slučaju
da ne možemo iglom doći u blizinu pola, upotrebimo željeznu šip-
ku, koju jednim krajem dovedemo do polnog nastavka, a drugom
kraju primaknemo magnetsku iglu. Ovakova kontrola magnetskom
iglom na gotovom namotu prikladna je osobito kod manje pregled-
nih spojeva sa serijskim i paralelnim spajanjem namota pojedini-
h polova.

Na isti način treba provjeriti serijske namote glavnih po-
lova, ako su predviđeni. Osim naizmjeničnog slijeda raznoime-
nih polova ovdje treba ustanoviti i međusobni odnos različitih

uzbudnih namota, tj. treba pronaći smjer struje u svakom uzbudnom namotu, koji daje polje istog smisla kao struja određenog smjera u osnovnom uzbudnom namotu. Početke i krajeve uzбудnih namota označavamo tako, da smjer struje od slova nižeg u abecedi prema slovu višem u abecedi daje isti smjer polja, bez obzira na to, koji smo namot uzeli za stvaranje uzbuđe. Ako dakle označimo proizvoljno sa C-D krajeve jednog namota, onda krajeve I-K drugog i E-F trećeg namota treba označiti tako, da smisao polja bude jedan te



Sl. 5-6

isti pri istosmjernoj struji od C prema D, ili I prema K, ili od E prema F. To se najlakše kontrolira prema sl.5-6 metodom indukcije (vidi 2.6.4). Uključivanje istosmjernog izvora (+) polom na C, a (-) polom na D mora dati otklon istog smisla na voltmetru sa zakretnim svitkom, koji smo priključili (+) polom na C i (-) polom na D, kao i na voltmetru priključenom sa (+) na I i sa (-) na K, ili sa (+) na E i sa (-) na F.

Pomoćne polove i kompenzacioni namot kontroliramo na isti način: uzbuđeni pomoćni polovi moraju slijediti naizmjenice s različitim polaritetom, a uzbuđeni kompenzacioni namot mora isto tako dati naizmjenice suprotne polaritete u međupolnom razmaku, tj. na pomoćnim polovima. Napokon, djelovanje kompenzacionog namota i namota pomoćnih polova mora biti istog smisla, što provjeravamo magnetskom iglom, ili metodom indukcije, ukoliko nije odmah

vidljivo iz rasporeda vodiča. Ova dva namota odmah povežemo u seriju, jer im djelovanje mora uvijek ostati istoga smisla, pa dobivamo dva krajnja izvoda.

Spajanje serijskih namota - pomoćnih polova s kompenzacionim, te serijskog uzbudnog namota - i ostalih uzbudnih namota, s izvodima iz armature, bit će posebno razmatrano u 5.1.4.

5.1.3 Naponski pokusi. Kao i kod strojeva izmjenične struje, izolaciju prema željezu treba ispitati na gotovom stroju, po mogućnosti u toplom stanju, s montiranim svim dijelovima. Ispituje se izmjeničnim naponom sinusnog oblika, i to tako da se priključi između ispitivanog namota s jedne strane i svih ostalih dijelova s druge strane ne više od 50 % ispitnog napona odjednom, i da se napon povisuje do pune vrijednosti u najmanje 10 sek. Puni ispitni napon primjenjuje se kroz 1 minutu.

Visina ispitnog napona prema IEC preporukama iznosi:

Tabela 5.1-1

Za snage ispod 1 kW	$500 \text{ V} + 2 U_n$
1 kW i više, ali ispod 10 000 kW	$1000 \text{ V} + 2 U_n$, ali bar 1500 V
Nezavisno uzбудjeni namoti	$1000 \text{ V} + 2 U_{\text{uzb max}}$, ali bar 1500 V
Uzбудnici	ispitnim naponom namota koji uzbudjuju

Pri tome znači U_n nazivni napon, a $U_{\text{uzb max}}$ maksimalni napon uzbudnika, koji napaja nezavisnu uzбудu.

Osim ovih pokusa potrebno je ispitati i izolaciju medju zavojima, što činimo uzbudom na $1,3 \cdot U_n$ kroz tri minute.

5.1.4 Oznake stezaljki i spajanje. Oznake stezaljki moraju biti u skladu sa standardima. Preporuke IEC pripremaju takav standard za oznake stezaljki rotacionih strojeva, a do stupanja na snagu ovog standarda upotrebljavaju se oznake uvedene u praksi i fiksirane u mnogim nacionalnim standardima. Standardne oznake stezaljki istosmjernog stroja su slijedeće:

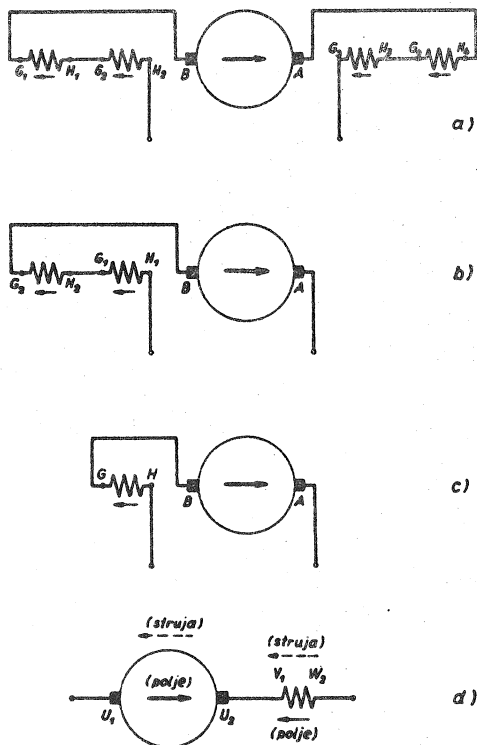
T a b e l a 5.1-2

	Prema uvedenoj praksi	Prema prijedlogu IEC standarda
Armatura	B - A	$U_1 - U_2$
Pomoćni polovi	H - G	$V_1 - V_2$
Kompenzacioni namot	H - G	$W_1 - W_2$
Poredna uzbud	C - D	$H_1 - H_2$
Nezavisna uzbud	I - K	$M_1 - M_2$
Serijska uzbud	E - F	$Z_1 - Z_2$

Smjer struje u namotima nazivamo "istim", ako struja u jednom i drugom namotu teče npr. od nižeg slova abecede prema višem slovu abecede, odnosno prema prijedlogu IEC, npr. od nižeg broja prema višem.

Slično se može definirati i "isti" smjer napona tako, da (+) polaritet mora biti npr. na niže označenoj, a (-) polaritet na više označenoj stezaljci kod oba namota. Kod uzbudnih namota razumijeva se, da se struje istoga smjera u svom magnetskom djelovanju potpomažu. Naprotiv, struja u pomoćnim polovima ili struja u kompenzacionom namotu uzima se da ima suprotno magnetsko djelovanje, kao što je to i potrebno, prema struji armature istoga smjera. Ako dakle kontroliramo namot pomoćnih polova ili kompenzacioni namot metodama prema 5.1.2, struja smjera G - H mora dati polje suprotnog smjera od struje A - B, odnosno $V_1 - V_2$ ili $W_1 - W_2$ mora dati suprotno polje od struje $U_1 - U_2$.

Različiti načini crtanja spojne sheme vide se na sl.5-7 .



Sl. 5-7

Dok je na sl. 5-7a prikazan način crtanja iz kojega se vidi, da je namot porazdijeljen u dvije grupe, $G_2 - H_2$ i $G_3 - H_3$ za pomoćne polove, te $G_1 - H_1$ i $G_4 - H_4$ za kompenzacioni

namot, na sl. 5-7b skupljen je čitav namot pomoćnih polova u $G_2 - H_2$, a kompenzacioni u $G_1 - H_1$. Obično se ide još i dalje, pa se namot pomoćnih polova i kompenzacioni namot zajedno uvrštavaju pod $G - H$ (sl. 5-7c). U svim tim slučajevima namoti su crtani tako, da smjer struje ujedno predstavlja smjer magnetskog djelovanja. Prema IEC-prijedlogu odustalo bi se od te prakse, pa bi shema izgledala kao na sl. 5-7d. Oznake W_2 i V_1 jasno pokazuju, da stroj ima i kompenzacioni namot, i pomoćne polove, a shema je ipak znatno jednostavnija i preglednija. Prema dogovoru, smjer struje $W_2 - V_1$ daje magnetsko polje suprotno onome kod "istoga" smjera struje $U_2 - V_1$. Izvučene strelice na shemi pokazuju smjer polja, a ne smjer struje. Ovaj je označen crtkano. U dva dijela rastavljeni namot pomoćnih polova, odnosno rastavljeni kompenzacioni namot označuje se sa $V_1 - V_2$, $V_5 - V_6$, odnosno $W_1 - W_2$, $W_5 - W_6$. Izvodi koji su čvrsto spojeni unutar stroja ne označuju se posebno, već samo krajnje stezaljke, a po oznakama se odmah vidi unutarnji spoj. Tako npr. izvedene stezaljke $U_1 - U_2$ znače da nema pomoćnih polova ni kompenzacionog namota (sl. 5-8a),



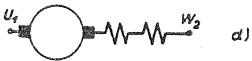
a)



b)



c)



d)

Sl. 5-8

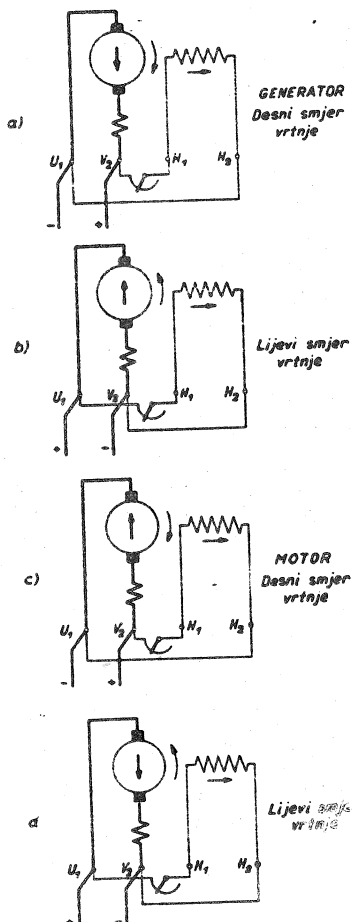
oznake $U_1 - V_2$ ukazuju na namot pomoćnih polova u jednoj grupi (sl. 5-8b). Namot s pomoćnim polovima u dvije grupe prema sl. 5-8c) bio bi na izvodima označen s $V_1 - V_6$. Pomoćni polovi i kompenzacioni namot u jednoj grupi prema sl. 5-8d daju izvode označene sa $U_1 - W_2$.

Smjer vrtnje treba da bude potpuno definiran shemom spoja. Pri tome govorimo o desnom smjeru vrtnje, ako se rotor, gledan od pogonskog kraja osovine (ili od debljeg kraja osovine, ako su oba izvedena), okreće u smjeru kazaljke na satu. Prijedlog IEC-sistema predviđa, da se dobije

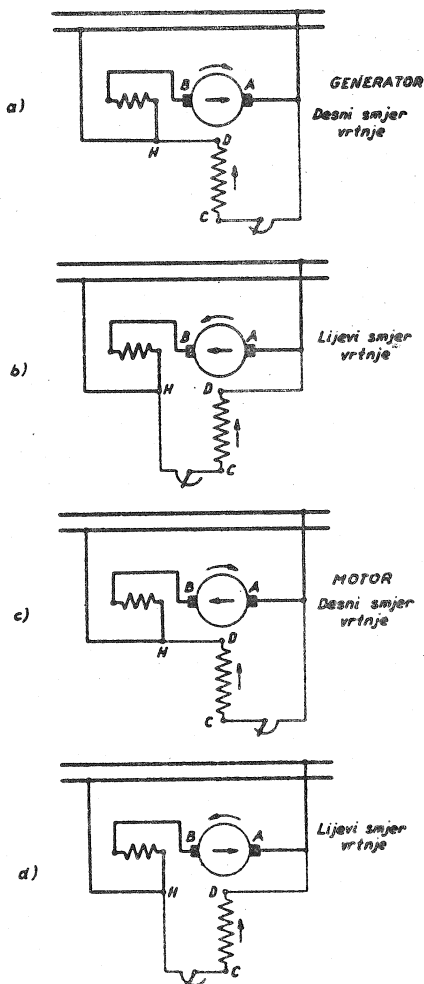
desni smjer vrtnje, ako su struje armature i uzbuđnog namota istoga smjera u generatorskom radu, odnosno suprotnog smjera u motorskom radu. Tako će npr. struja generatora s desnim smjerom vrtnje teći od V_1 prema V_2 , ako je smjer uzbuđne struje $H_1 - H_2$ (sl. 5-9a). Budući da je ovdje (+) polaritet na stezaljci V_2 , treba spojiti H_1 sa V_2 , a H_2 sa U_1 . Pri lijevom smjeru vrtnje dobili bi struje obrnutog smjera $V_2 - H_1$, te $H_1 - H_2$, pa bi spoj izgledao kao na sl. 5-9b). Kod motora smjer napona na armaturi i struje u armaturi isti su - za razliku od generatora, gdje je smjer obrnut, tako da naponu $V_2 - U_1$ odgovara struja $U_1 - V_2$ - pa spoj motora i generatora npr. za desni smjer vrtnje ispada potpuno isti, samo je smjer struje u armaturi obrnut.

Kod označavanja prema uvedenoj praksi uobičajeno je pravilo, za razliku od prijedloga IEC, da desnom smjeru vrtnje generatora odgovara isti smjer napona, a ne struje, na armaturi i na uzbuđ-

nom namotu. Sheme spoja će zato izgledati kao na sl. 5-10a do d). U biti je jedno i drugo posve isto, samo što redoslijedu U1 - V2 prema IEC prijedlogu odgovara smjer H - A prema uvedenoj praksi.



Sl. 5-9

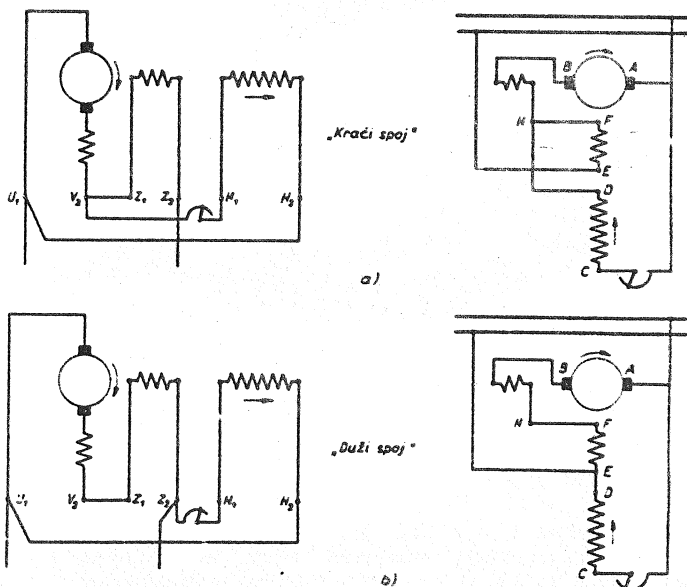


Sl. 5-10

Ako stroj ima više od jednog uzbuđnog namota, onda se gornja pravila odnose na smjer struje odnosno napona u onom uzbuđnom namotu, koji daje veći dio uzbude.

Serijski uzbuđni namot može biti priključen tako, da potpomaže porednu uzbudu (kompaundacija), ili da joj djeluje nasuprot (protukompaundacija). Spajanje samouzbuđuje može se izvršiti u "kraćem" ili "dužem" spoju, tj. da porednim uzbuđnim namotom

premostimo samo armaturu s event. pomoćnim polovima i kompenzacionim namotom (sl.5-11a), ili da obuhvatimo i serijski uzbudni namot (sl.5-11b)



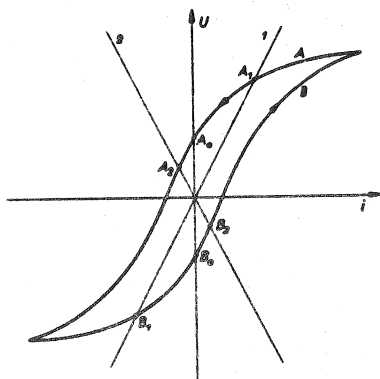
Sl. 5-11

Schema na sl.5-11 može predstavljati generator (ako struja u armaturi teče u smjeru $U_1 - V_2$) ili motor (ako struja teče u smjeru $V_2 - U_1$). Kod prelaza iz generatorskog u motorski rad promijenit će se smjer struje i u serijskom uzudnom namotu, pa prikazani spoj predstavlja kompaundaciju u generatorskom radu, a protukompaundaciju u motorskom radu. Ako zamijenimo stezaljke Z_1 i Z_2 , dobit ćemo protukompaundaciju u generatorskom radu, a kompaundaciju u motorskom radu.

Zadaca je ispitne stanice, da odredi prave oznake stezaljki, kako bi se stroj mogao spojiti na zahtijevani način. Obično je unaprijed određen polaritet glavnih izvoda, tj. odlučeno je koja stezaljka ima biti A, a koja B (odnosno U_2 i U_1). Treba sada odrediti ispravne oznake jednog od uzбудnih namota, npr. C - D (odnosno $H_1 - H_2$). U tu svrhu vrtimo rotor u desnom smjeru, i pustimo istosmjernu struju iz stranog izvora kroz uzbudni namot. Ako je kod toga napon na stezaljci A (odnosno U_2) pozitivan, onda ćemo stezaljku uzbudnog namota, na koju smo priključili (+) pol baterije, označiti nižim slovom odnosno brojem, a drugu višim (npr. C - D, ili I - K, ili E - F, odnosno $H_1 - H_2$, ili $M_1 - M_2$, ili $Z_1 - Z_2$). Sve ostale uzбудne namote kontroliramo i označimo u odnosu na ovaj prvi, kako je bilo prikazano u 5.1.2. Sada se može izvršiti spaja-

nje, bilo za desni, bilo za lijevi smjer vrtnje.

Još jedna kontrola prilikom samog spajanja provodi se tako, da se voltmetrom mjeri napon na stezaljkama armature A - B



Sl. 5-12

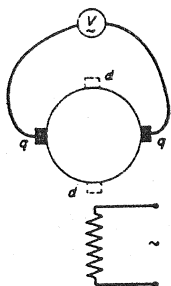
(odnosno $U_2 - U_1$), te se kratkotrajno prisilone krajevi samouzbuđenog namota na stezaljke armature onako, kako to shema spoja predviđa. Ako napon na stezaljkama počne rasti, spoj je ispravan, ako se čak nešto smanji, to znači da djelovanje samouzbuđenja poništava remanentni napon. Prema sl. 5-12 vidi se, da pravac 1, koji karakterizira otpor samouzbuđenog kruga $R = \frac{U}{I}$, siječe gornju granu A krivulje histereze $U = f(i)$ u tački A1, a donju granu B u tački B1. Uz pozitivni napon remanencije A_0 uzbudna struja će porasti u pozitivnom smjeru, dok se ne zaustavi u sjecištu A1. No, ako

je napon remanencije bio negativan, uzбудit će se napon suprotnog polariteta, koji odgovara tački B1. Treba dakle unaprijed provjeriti, da li je polaritet napona remanencije onaj koji želimo, pa ako nije, onda malom istosmjernom strujom (npr. iz džepne baterije) kroz uzбудni namot korigirati polaritet. Ako je, međjutim, spoj uzbuđenog namota pogrešan, onda će pozitivni napon uzrokovati negativnu uzбудu i obrnuto, tj. pravac samouzbuđenja je sada 2 prema sl.5-12. Kojeg god polariteta bila remanencija, napon će pasti kad priključimo uzбудu. To znači, da je samouzbuđenost za taj smjer vrtnje obrnuto priključena, pa joj treba obrnuti priključke.

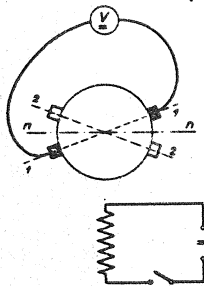
5.1.5 Određivanje neutralne zone. Kod starijih strojeva bez pomoćnih polova bilo je katkada potrebno ponaknuti četkice iz neutralne zone kako bi dobili zadovoljavajuću komutaciju. Ovo pomicanje trebalo je korigirati, kad bi se promijenilo opterećenje. Danas se pitanje komutacije rješava pomoćnim polovima, a položaj četkica ostaje u pogonu uvijek isti. Zato je osobito važno, da četkice budu postavljene tačno u neutralnu zonu, i to s dva razloga: 1. zbog ispravne komutacije, 2 zbog ispravnog udešavanja karakteristika stroja, pogotovo ako treba da radi u oba smjera vrtnje.

Kod strojeva s magnetskim krugom u lameliranoj izvedbi može se na uzbudni namot priključiti mali izmjenični napon prema sl. 5-13. Kad bi četkice postavili u položaj d - d, mjerili bi na njima puni napon, koji se inducira u armaturi trans-

formatorskim djelovanjem . Rotor pri tome miruje. U položaju $q - q$ ne bi bilo na četkicama napona, pa je to pouzdan način,



Sl. 5-13



Sl. 5-14

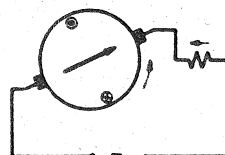
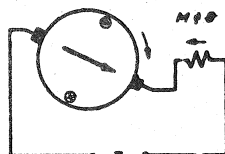
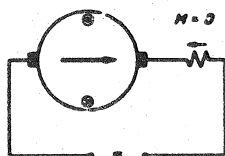
da nadjemo položaj četkica u neutralnoj zoni. Bez obzira na to, što su rijetki istosmjerni strojevi s lameliranim čitavim magnetskim krugom, kod ovakovog mjerenja postoji opasnost oštećenja četkica i kolektora uslijed induciranih struja u svitku, koji je kratko spojen četkicom na kolektoru, a obuhvaća čitav tok.

Bezopasna je i univerzalno primjenljiva metoda indukcije prema sl.5-14. Umjesto izmjeničnog napona na uzbudni namot priključimo istosmjerni izvor. Kod prekida istosmjerne struje promatramo polaritet kratkotrajnog otklona, koji će pokazati voltmetar sa zakretnim svitkom priključen na četkice. Ako pri položaju 1 - 1 ustanovimo određeni mali otklon u jednom smjeru, a pri položaju 2 - 2 približno jednaki otklon u drugom smjeru, bit će neutralna zona $n - n$ u sredini između oba položaja 1 i 2 . Osjetljivost metode je vrlo velika, pa se neutralna zona može odrediti vrlo tačno.

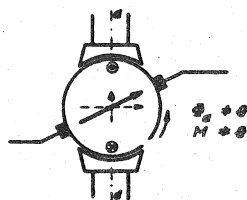
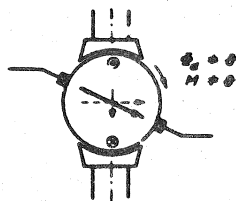
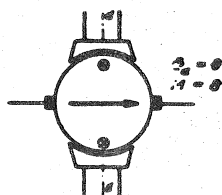
Metoda momenta prikazana je na sl. 5-15. Kroz namot pomoćnih polova i armaturu pustimo istosmjernu struju. Dok su četkice u neutralnoj zoni, struje u armaturi i polje pomoćnih polova ne daju nikakovog zakretnog momenta. No ako vrlo malo pomiknemo četkice u jednom smjeru, osjetit ćemo rukom na osovinu, da se pojavio zakretni moment. Zabilježimo taj položaj, i pomiknemo ih u drugom smjeru, dok ne osjetimo zakretanje u suprotnom smjeru. Po sredini između oba položaja leži neutralna zona.

Metoda momenta može se primijeniti i tamo, gdje nema pomoćnih polova. Prema sl. 5-16 vidi se, da struja u armaturi ne uzbuđuje nikakovo uzdužno polje u osi $d - d$ glavnih polova, ako su četkice u neutralnoj zoni. Čim četkice pomaknemo, amperzavoji armature uzbuđuju tok u glavnim polovima, koji daje sa strujom armature zakretni moment u smjeru u kojem smo pomaknuli četkice.

Konačnu provjeru ispravno udešene neutralne zone daje snimanje karakteristika opterećenja, ako ga provedemo za oba



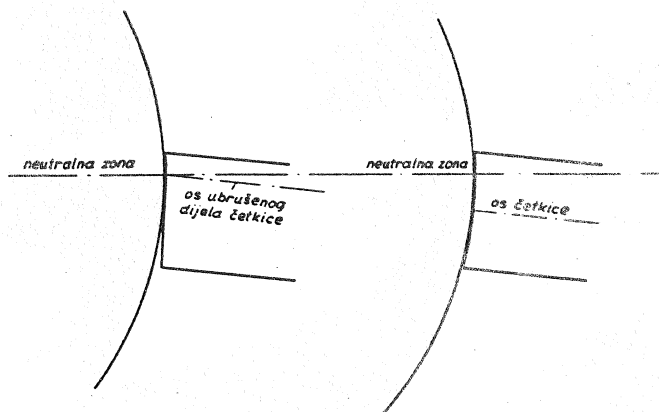
Sl. 5-15



Sl. 5-16

smjera vrtnje. Pomak četkica u smjeru vrtnje predstavlja pri obrnutom smjeru rotacije pomak nasuprot smjeru vrtnje, te djeluje na izgled karakteristika upravo suprotno. Ako se dakle karakteristike opterećenja snimljene za lijevi i desni smjer vrtnje potpuno podudaraju, to je siguran znak, da su četkice ispravno postavljene u neutralnu zonu.

Nipošto ne treba zaboraviti, da četkice moreju biti potpuno prilagodjene i ubrušene prije no što se pristupi određivanju neutralne zone. Čitava površina četkica mora biti jednako glatka i polirana. Ako ih postavimo u neutralnu zonu, a one su nalijegale na kolektor samo djelomično, bit će u neutralnoj zoni os ubrušenog dijela četkica, ali će se nakon izvjesnog vremena četkice potpuno ubrusiti, i njihova os više ne će ležati u neutralnoj zoni (sl. 5-17).



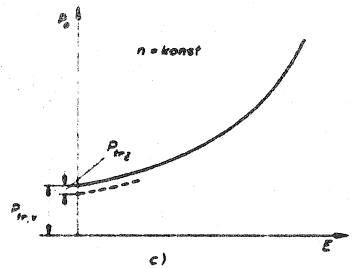
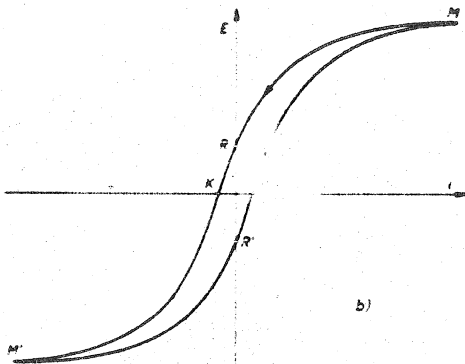
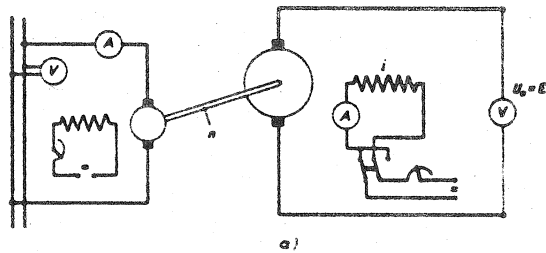
Sl. 5-17

5.2 Prazni hod i kratki spoj

Mjerenja u praznom hodu daju nam karakteristiku zasićenja, gubitke u praznom hodu, te podatke o obliku krivulje polja u rasporu i o valovitosti induciranog napona. Mjerenja u kratkom spoju nisu potrebna zbog određivanja gubitaka u namotu, jer ove određujemo kod istosmjernje struje mnogo lakše i tačnije iz mjerenih otpora. Često se ipak vrši pokus kratkog spoja u svrhu kontrole stabilnosti i komutacije.

5.2.1 Karakteristike praznog hoda. Prilike zasićenja vide se s karakteristike zasićenja (sl.5-18b), koja prikazuje inducivani napon E (koji je identičan s naponom U_0 na otvorenim stezaljkama) u ovisnosti o uzbuđnoj struji i , pri konstantnoj brzini vrtnje n . Shema mjerenja prikazana je na sl.5-18a. Stroj za vrijeme ispitivanja uzbuđujemo iz nezavisnog izvora. Struju uzbuđuje treba dići do maksimalne vrijednosti, tako da mjerenje počinje od tačke M . Kako bi dobili silaznu granu krivulje histereze $M - R$ potrebno je pri udešavanju daljnjih tačaka uzbuđnu struju uvijek samo smanjivati, a nikada podizati. Kod uzbuđne struje $i = 0$ dobivamo napon remanencije, koji odgovara tački R . Sada promijenimo polaritet napona na uzbuđnom namotu, i struju od tačke do tačke samo povećavamo. Na taj način snimimo uzlaznu granu krivulje histereze $R-K-M'$. Drugu stranu krivulje dobivamo simetričnim preslikavanjem obzirom na ishodište. Brzinu vrtnje treba za vrijeme mjerenja održavati konstantnom.

Utjecaj histereze na sl. 5-18a jako je karikiran, pa će petlja u stvari biti mnogo uža. Zato se često radi s jednom,



Sl. 5-18

srednjom krivuljom kao karakteristikom zasićenja.

U stvari uzbudna struja i neopterećenog stroja određuje njegov magnetski tok Φ , a inducirani napon je proporcionalan toku Φ i brzini vrtnje n :

$$E = k \cdot \Phi \cdot n \quad (1)$$

Ako je dakle pri određenoj uzbuli i izmjeren napon E' , a brzina vrtnje je bila n' , dobit ćemo napon E koji odgovara brzini n jednostavnim preračunavanjem:

$$E = E' \cdot \frac{n}{n'} \quad (2)$$

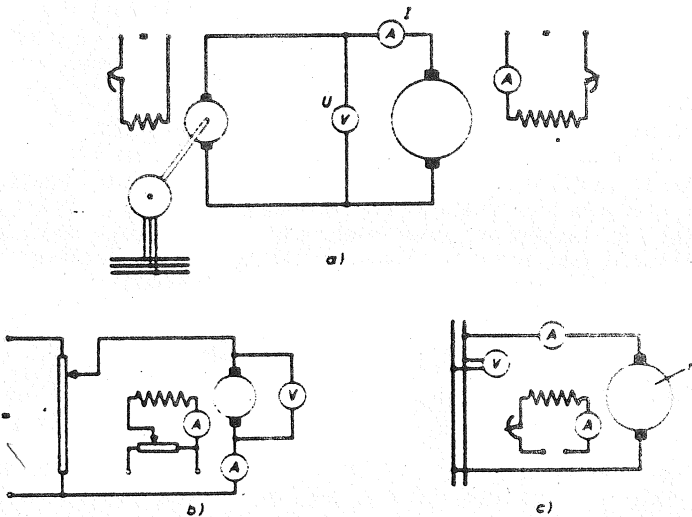
Ako smo za pogon upotrijebili baždaren istosmjerni stroj, kojemu su poznati gubici P_{gp} za svako pogonsko stanje, dovoljno je izmjeriti napon i struju pogonskog stroja da bi dobili gubitke ispitivanog stroja u praznom hodu:

$$P'_0 = UI - P_{gp} = P_{R_0} + P_{r,v} \quad (3)$$

Pri naponu $E = 0$ gubici u željezu otpadaju, pa dobivamo gubitke trenja i ventilacije. Još jedno mjerenje s podignutim četkicama daje gubitke $P_{tr,v}$ koji su smanjeni za iznos trenja četkica, tako da ove trenje možemo odrediti kao :

$$P_{tr} = P_{tr,v} - P'_{tr,v} \quad (4)$$

Gubitke unosimo u dijagram u ovisnosti o naponu E (sl.5-18c). Ova metoda naziva se "generatorskom", jer ispitivani stroj tjeramo mehanički.



Sl. 5-19

"Motorska" metoda ne zahtijeva mehanički pogon. Prema sl. 5-19a ispitivani stroj napajamo električki preko agregata, kojemu se napon daje po volji regulirati. Uzbudnu struju daje poseban izvor, te je možemo regulirati neovisno o naponu armature. Povišenjem napona U armature povisit će se brzina vrtnje n . Ako sada povisimo uzbudnu struju i do vrijednosti, kod koje će brzina vrtnje biti opet ona početna za koju snimamo karakteristiku, dobivamo par vrijednosti (U, i) za $n = \text{konst.}$ Inducirani napon će biti - uz pretpostavku pada napona $1 V$ po četkici:

$$E = U - 2 \quad (5)$$

pa možemo crtati karakteristiku zasićenja $E = f(i)$ uz $n = \text{konst.}$ Osobito je jednostavno snimanje gubitaka motorskim postupkom. Mjerenjem napona i struje dobivamo gubitke, koji su veći od gubitaka praznog hoda za gubitke prelaza na četkicama :

$$P_{tr} = \Delta U \cdot I = 2I \quad (6)$$

tako da gubici praznog hoda iznose :

$$P_0' = UI - P_{al} = (U-2) \cdot I \quad (7)$$

Snimanje motorskim postupkom u blizini uzbude $i = 0$ nije moguće, jer bi kod vrlo malih napona za pokrivanje gubitaka praznog hoda bila potrebna vrlo velika struja, koja bi oštetila četkice i kolektor, i kod koje više ne bi imali stanje praznog hoda, jer gubici u bakru armature i serijskih namota ne bi više bili zanemarljivo maleni.

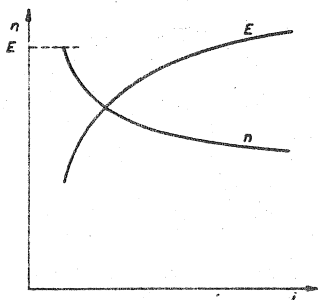
Kod malih strojeva može se primijeniti spoj prema sl.5-19b, gdje ne trebamo promjenljivi izvor napona, već i armaturu i uzbudu napajamo iz mreže konstantnog napona preko potenciometara.

I kod većih strojeva možemo raditi motorskim postupkom na mreži konstantnog napona prema sl. 5-19c. Umjesto direktnog snimanja karakteristike $E = f(i)$ uz $n = \text{konst.}$ snimamo u ovom slučaju karakteristiku $n = f(i)$ uz $E' = (U-2) = \text{konst.}$ Brzini n odgovara konstantni napon $E' = (U-2)$, dok bi kod konstantne brzine n , za koju želimo snimiti karakteristiku zasićenja, napon E koji uzbudi i iznosio :

$$E = (U-2) \cdot \frac{n}{n_0} \quad (8)$$

Snimljenu karakteristiku $n = f(i)$ uz $E = E' = \text{konst.}$ preračunamo dakle pomoću izraza (8) u karakteristiku $E = f(i)$ uz $n = n_0 = \text{konst.}$

Vrlo male uzbude dale bi velike brzine vrtnje n , koje bi mehanički ugrozile stroj. Praktički ne smijemo prekoračiti nazivnu brzinu vrtnje za više od 30 %, što bi značilo, da možemo snimiti karakteristike prema dolje samo do oko 75 % nazivnog napona (sl.5-20). Gubitke dobivamo i ovdje mjerenjem napona i struje prema izrazu (7). Pošto su gubici ovisni o brzini vrtnje i o magnetskom toku, tj. uzbudnoj struji, to mjerenja kod različitih brzina vrtnje ne će biti od interesa. Jedino ako je napon mreže jednak nazivnom naponu stroja, onda ćemo očitati gubitke za nazivni napon i nazivnu brzinu vrtnje.

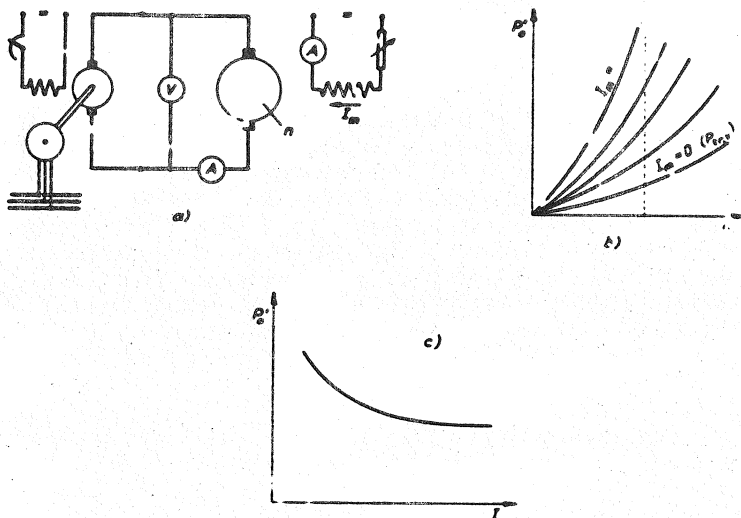


Sl.5-20

Kod serijskog motora takodjer nas zanima karakteristika zasićenja. Pošto je kod tog motora struja uzbude ujedno i struja opterećenja, to nije moguće snimiti prazni hod u pravom spoju. Zato odvojimo serijski uzbudni namot od armature, i napajamo ga iz posebnog izvora.

Karakteristiku zasićenja snimamo na isti način kao kod porednog stroja, motorskim ili generatorskim postupkom. Kao rezultat dobivamo napon praznog hoda E u ovisnosti o uzbudnoj struji I_m pri konstantnoj brzini vrtnje n_0 .

Kod određivanja gubitaka praznog hoda potrebno je uzeti u obzir, da se brzina serijskog stroja, za razliku od porednog, znatno mijenja u pogonu, a s brzinom se znatno mijenjaju i gubici u željezu, i gubici trenja i ventilacije. U općem slučaju, ako motor treba da radi i u promjenjivim naponskim uvjetima, treba snimiti gubitke P'_0 u ovisnosti od brzine vrtnje n za različite vrijednosti uzbudne struje I_m , pri opterećenoj armaturi. Mjerenje se vrši generatorskim ili motorskim postupkom (sl.5-21a), pri čemu se uzbuda drži konstantnom, a brzina se mijenja pogonskim strojem kod generatorskog rada, ili visinom napona narinutog na armaturu kod motorskog rada. Iz ovih karakteristika (sl.5-21b) mogu se odrediti



Sl. 5-21

gubici P'_0 za bilo koje pogonsko stanje.

Ako imamo snimljene i ostale karakteristike stroja, poznata nam je ovisnost $n = f(I)$. Međutim, magnetski tok Φ bit će zbog reakcije armature manji kad kroz armaturu također teče struja I kao i kroz uzбудni namot. Zbog toga vrijednost gubitaka P'_0 pri struji I i brzini n s dijagrama poput 5-21b ne ćemo očitati na krivulji $I_m = I$, već na krivulji one s ruže I'_m koja daje isti magnetski tok u praznom hodu, kao što ga daje struja I kod opterećenja. To možemo očitati s tzv. "unutarne karakteristike" (vidi 5.4.6). Dobivamo

dakle u ovisnosti o struji I gubitke P'_0 , koji odgovaraju stvarnom pogonskom stanju kod opterećenja tom strujom.

Na taj način odredjuju se kod serijskog stroja gubici praznog hoda pri stvarnoj brzini kod koje će opterećeni motor raditi, dok kod porednog stroja mala odstupanja brzine pri opterećenju zanemarujemo, pa mjerimo gubitke pri brzini praznog hoda.

5.2.2 Stabilnost samouzbude. Napon u praznom hodu generatora sa samouzbuđom određen je sjecištem pravca samouzbude, koji prikazuje ovisnost struje u uzbuđnom namotu o naponu na koji je uzbuđni krug priključen:

$$i = U/R \quad (1)$$

sa karakteristikom praznog hoda, koja prikazuje ovisnost napona U na stezaljkama stroja o uzbuđnoj struji i . Nagib pravca samouzbude određen je linearnim odnosom :

$$U/i = k \cdot \operatorname{tg} \alpha = R \quad (2)$$

tj. proporcionalan je otporu uzbuđnog kruga R . Na sl.5-22 bit će napon u praznom hodu za određeni otpor R uzbuđnog kruga određen tačkom A . Povećavamo li otpor R , napon će padati, dok ne dodjemo do tačke K , gdje će se napon naglo srušiti. Vrijednost otpora R_{kr} , koja tome odgovara, nazivamo kritičnim otporom uzbuđnog kruga. U području od 0 do K ne možemo napon regulirati. Ako je potrebno regulirati napon i do sasvim niskih vrijednosti, možemo si pomoći na taj način, da u polove umetnemo okvire od magnetskog materijala, koji će se ranije zasititi, i time skrenuti krivulju zasićenja u desno (sl.5-23, krivulja b). Drugi je način, da se čitava krivulja zasićenja pomakne u lijevo, što se postiže umetnima pločica od tvrdog magnetskog materijala u polove, koje kao permanentni magneti osiguravaju određeni magnetski tok i onda, kad je uzbuđna $i = 0$ (krivulja c na sl. 5-23). Vrlo dobra mogućnost regulacije se postiže dodavanjem istosmjernog napona izvana u uzbuđni krug ("umjetna remanencija"), prema sl.5-24.

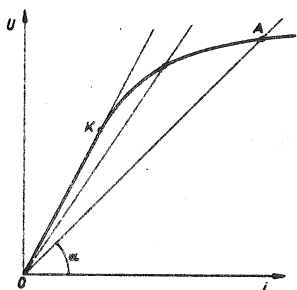
Sva ova razmatranja vrijede uz pretpostavku konstantne brzine vrtnje n . Ako se brzina vrtnje mijenja, mijenja se i karakteristika zasićenja, tako da je za jednu te istu uzbuđnu struju :

$$U = U' \cdot \frac{n}{n'} \quad (3)$$

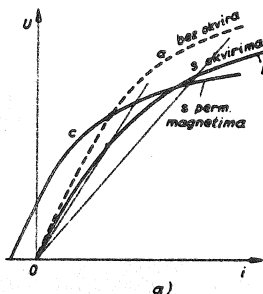
Kod snimanja brzine $n < n'$ čitava krivulja proporcionalno se snižuje, a sjecište sa pravcem samouzbude pada iz tačke A u tačku B (sl.5-25). Kod određene brzine, napokon, pravac samouzbude će tangirati krivulju, i stroj se pri toj brzini ne može više uzbuđiti. Ovu brzinu nazivamo kritičnom brzinom za

taj otpor samouzbudnog kruga.

Za praktička razmatranja nespretno je crtati novu krivulju zasićenja za svaku brzinu vrtnje. Lakše je povući novi pravac samouzbuđenja. Nacrtamo, dakle, krivulju zasićenja za određenu brzinu n' , pa za sve druge brzine umjesto ordinata krivulje $U = f(i)$ mijenjamo samo mjerilo na ordinatnoj osi.



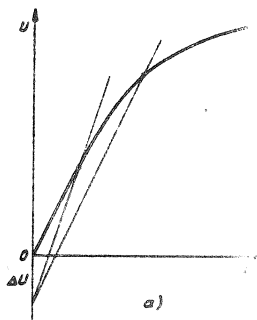
Sl.5-22



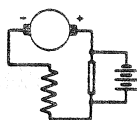
a)



b)



a)



b)

Sl.5-23

Sl.5-24

Ako je $\frac{n}{n'} = k$, onda će inducirani napon pri istoj uzbuđenoj struji biti

$$U = k \cdot U' \quad (4)$$

Sve ordinate mijenjaju se, dakle, proporcionalno. Krivulju $U = f(i)$ pri brzini n može predstavljati ista krivulja $U' = f(i)$, snimljena za brzinu n' , ako promijenimo mjerilo na ordinatnoj osi tako, da bude :

$$m_u = \frac{U}{y} = k \cdot \frac{U'}{y} = k m'_u \quad (V/mm) \quad (5)$$

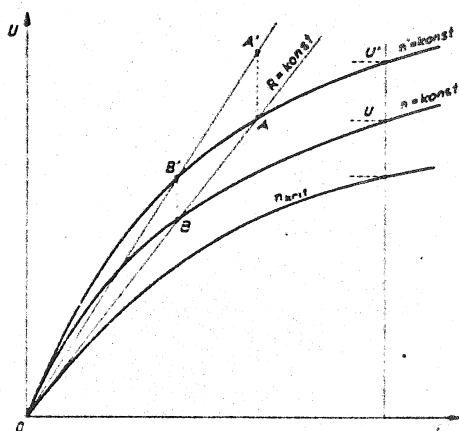
U tom novom mjerilu pravac samouzbuđenja bit će predstavljen novim pravcem, koji će za bilo koju uzbuđenu i umjesto ordinate

$y = \frac{iR}{m'_u}$ imati ordinatu :

$$y' = \frac{iR}{m_u} = \frac{iR}{k \cdot m'_u} = \frac{y}{k} \quad (6)$$

tj. manjoj brzini $n = kn'$ odgovarati će u omjeru k podignuti pravac samouzbuđenja. Tako će npr. na sl. 5-25 pravac samouzbu-

de. Tako će npr. na sl. 5-25 pravac samouzbuđe za brzinu n biti OA' , gdje je ordinata tačke A' povišena u omjeru $\frac{1}{k}$ prema ordinati tačke A koja odgovara brzini n' .

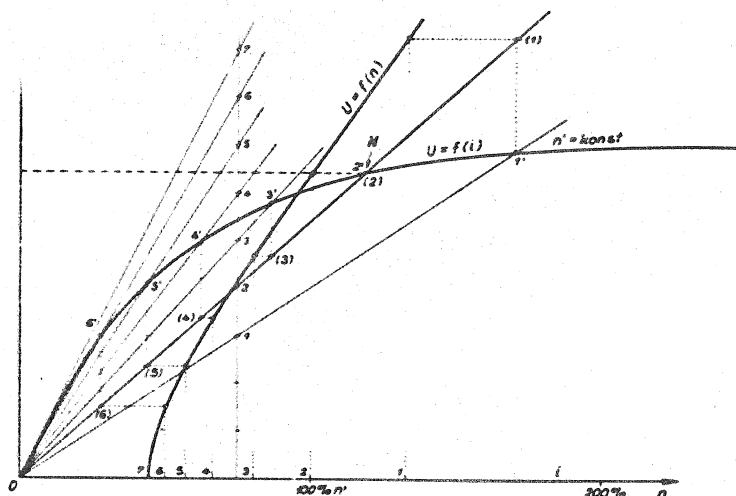


Sl.5-25

Karakteristiku pri brzini $n=kn'$ predstavlja sada ista krivulja $U'=f(i)$, pa će napon na stezaljkama biti određen sjecištem u tački B' , dakako u novom mjerilu m'_U . Ovo sjecište vratimo u prvobitno mjerilo m_U na taj način, što potražimo tačku B za istu uzbudu kao B' , ali na prvobitnom pravcu samouzbuđe OA . Kako se vidi, crtanje krivulja $U=f(i)$ za različite brzine n postalo je suvišno.

Konstrukcija karakteristike $U=f(n)$ na osnovu snimljene karakteristike

$U=f(i)$ pri konstantnoj brzini vrtnje n' i za konstantan otpor samouzbuđe, definiran radnom tačkom N kod brzine n' , vidi se na sl. 5-26.

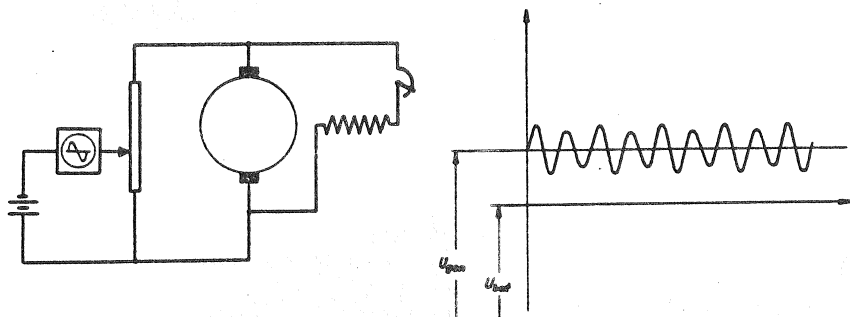


Sl. 5-26

Ako želimo odrediti samo kritičnu brzinu n_{kr} , dovoljno je povući tangentu na krivulju zasićenja, naći odsječak y_{kr} na vertikali na kojoj pravac samouzbuđe odsjeka y' , i računati :

$$n_{kr} = n' \cdot \frac{y'}{y_{kr}} \quad (7)$$

5.2.3 Valovitost napona. Zbog utora na površini rotora i diskontinuirane raspodjele vodiča po obodu rotora nastaju viši harmonički članovi superponirani istosmjernom naponu. Frekvencija je određena brzinom vrtnje i brojem utora. Slično nastaju viši harmonički uslijed promjenljivog prekrivanja četkica s kolektorskim lamelama. Jedno i drugo uzrokuje titranje napona oko istosmjerne srednje vrijednosti, koje nije velikog iznosa, ali katkada može smetati. Ako se radi o generatoru za rasvjetu, dovoljno je promatrati neko vrijeme sitnije štampani tekst rasvijetljen žaruljom, koja je priključena na ispitivani generator. U slučaju, da oko ne primjećuje titranje, valovitost napona nije pretjerana. No češće se radi o drugim smetnjama - smetnje komunikacijama, utjecaj na mjerne uređaje i instrumente i slično - koje traže ograničenje valovitosti napona. Mjerenje valovitosti provodimo tada oscilografskim snimanjem. Kako je iznos viših harmoničkih članova prema istosmjernoj komponenti vrlo malen, ne bi snimanje napona generatora pokazalo gotovo ništa. Zbog toga se uzima prema sl.5-27



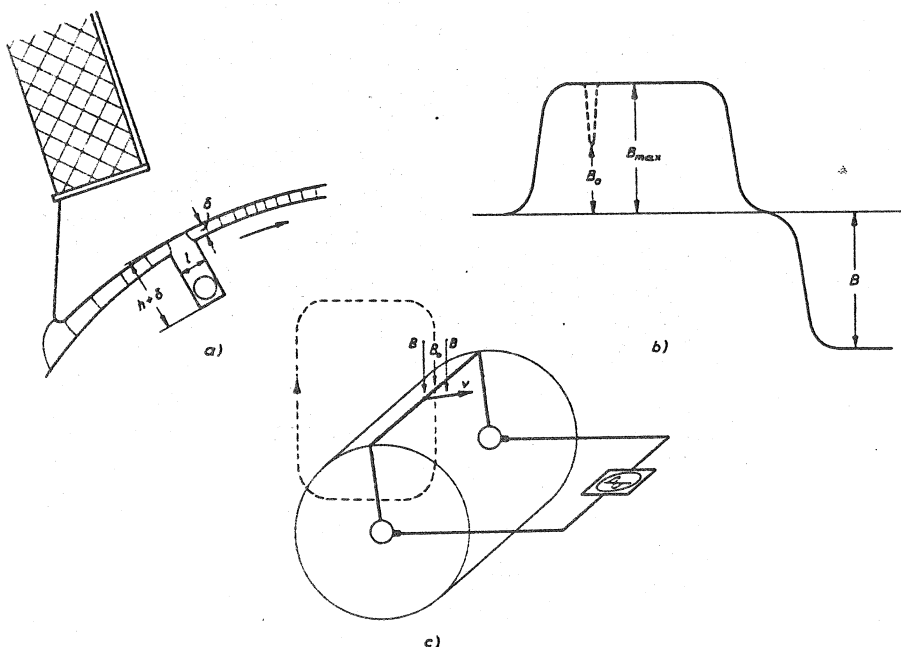
Sl. 5-27

jedan dio napona generatora preko potencijometra, usporedi se s naponom akumulatora, i mjeri se oscilografski samo razlika, koju možemo udesiti tako malom, da valovitost bude reda veličine istosmjerne komponente.

5.2.4 Krivulja polja u rasporu. Određivanje oblika krivulje

polja u rasporu u praznom hodu pokazuje nam, koliko se taj oblik podudara s predračunom, i kakovi su event. ispravci potrebni u obliku polnih nastavaka. Na isti način može se odrediti i oblik krivulje polja kod opterećenja, koji rezultira iz osnovne magnetske uzbude i reakcije armature.

Najbolje rezultate bi dobili oscilografiranjem napona na vodiču, koji je smješten u utor na obodu rotora, i čiji su krajevi izvedeni na klizne kolute, prema sl.5-28(a) i (c) .



Sl. 5-28

Ako rotor vrtimo jednolikom brzinom vrtnje, tako da vodič silne brzine v , bit će inducirani napon u vodiču :

$$e = B/v \quad (1)$$

Indukcija B smanjit će se doduše na iznos B_0 (sl.5-28b) , kad umjesto kroz raspor δ silnice prolaze kroz znatno veću dubinu $h + \delta$ do dna utora, pa bi napon rotacije bio :

$$e_{ret} = B_0/v \quad (2)$$

No istovremeno se, uslijed pomaka utora za širinu v . dt smanjuje tok ispred utora, a to je takodjer i tok obuhvaćen pet-

Izom vodič-klizni koluti-oscilograf za iznos :

$$\Delta\phi = (B - B_0) \cdot l \cdot v \cdot dt \quad (3)$$

Promjena toka inducira u krugu u kojemu vršimo mjerenje napon transformacije :

$$e_{tr} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{(B - B_0) \cdot l \cdot v \cdot dt}{dt} = (B - B_0) \cdot l \cdot v \quad (4)$$

Ukupno inducirani napon u vodiču biti će dakle :

$$e = e_{rot} + e_{tr} = B_0 \cdot l \cdot v + (B - B_0) \cdot l \cdot v = B l v \quad (5)$$

Drugim riječima, mjereni napon u ovisnosti o vremenu prikazivat će ujedno krivulju indukcije B po obodu rotora, i to stvarnu vrijednost indukcije, bez obzira na lokalnu deformaciju polja zbog utora u kojemu mjerimo. Ipak će se u snimljenom naponu pokazati vremenske pulzacije glavnog toka uslijed utora na rotoru. Kod potpuno simetričnih polova zgodnije bi bilo umjesto jednog vodiča uzeti dijametralni svitak. Kad bi ovaj imao w zavoja, bio bi napon :

$$e = 2w \cdot B l v \quad (6)$$

Odavle dobivamo mjerilo za indukciju B . Ako naime isti otklon y na oscilografu predstavlja napon $e = m_e \cdot y$, i indukciju $B = m_B \cdot y$, onda iz izraza (6) slijedi:

$$m_B (T/mm) = \frac{1}{2wlv} \cdot m_e \quad (7)$$

gdje je m_e (V/mm) naponska mjerna konstanta oscilografa, koju je lako baždariti.

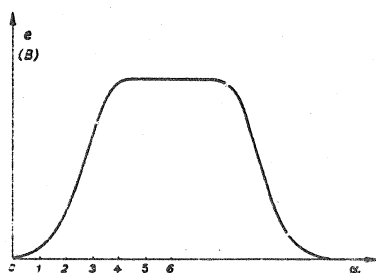
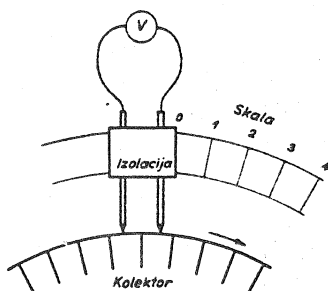
Postavljanje posebnog mjernog svitka i kliznih koluta predstavlja znatnu poteškoću, no često imamo na rotoru dijametralne svitke, koje možemo iskoristiti za mjerenje krivulje polja. Krajevi svakog svitka izvedeni su na susjedne lamela, ako je namot jednovojni, odnosno razmak je među njima 2,3... m lamela, ako je namot dvo-, tro-... m-vojni. Učvrstimo prema sl.5-29 dva grafitna šiljka između dviju pločica od izolacionog materijala tako, da razmak među njima odgovara razmaku izvoda jednog svitka na kolektor, i priključimo na njih voltmetar. Citavu napravu prislonimo uz skalu na kojoj možemo očitati položaj, šiljke prislonimo na kolektor, i mjerimo napon svitka za različite položaje na skali. Budući da se za određeni položaj šiljaka mjerenje vrši na svitcima koji su uvijek u jednom te istom položaju prema polovima, očitani napon za svaki položaj, odgovara indukciji na određenom mjestu u rasporu. Ako je namot petljasti, mjereni napon je napon jednog svitka,

pa vrijedi jednadžba (6). Ako je namot valoviti, mjerimo napon na p svitaka (p = broj pari polova), pa vrijedi:

$$e = 2wp \cdot B/v \quad (8)$$

$$m_B = \frac{1}{2wp/v} \cdot m_e \quad (9)$$

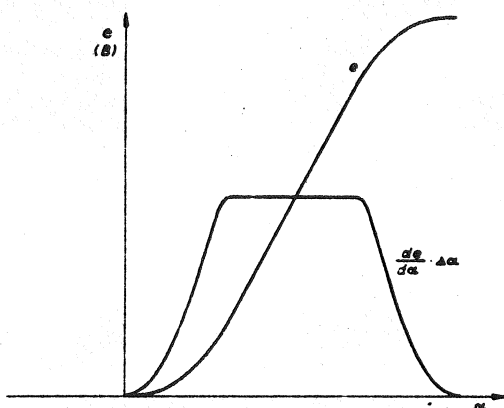
Ako umjesto stalnog razmaka mjernih šiljaka upotrebimo jedan šiljak fiksiran u početnom položaju, a drugi pomičemo po



Sl. 5-29

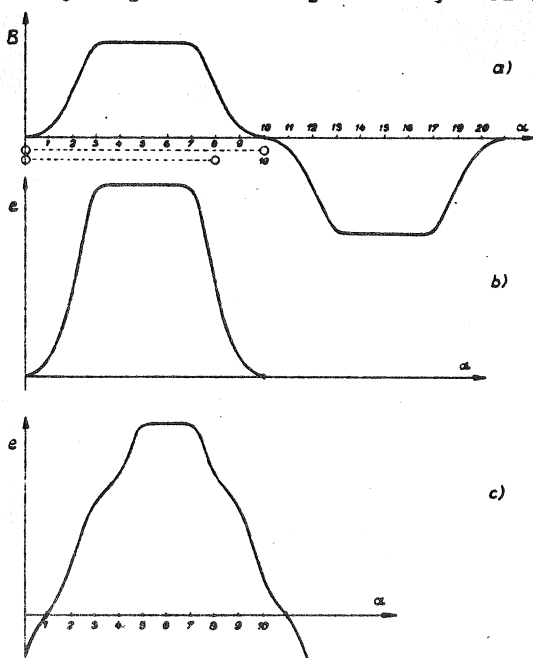
skali, pri čemu uzimamo uvijek pomak od m lamela za m -vojni namot, dobivamo krivulju napona uzduž kolektora (sl.5-30). Ova krivulja predstavlja svakom ordinatom zbroj napona svih svitaka, koji leže između početnog položaja na skali, i položaja za koji je napon nanesen. Napon pojedinog svitka u bilo kojem položaju, koji predstavlja indukciju u rasporu, dobivamo kao derivaciju snimljene krivulje u tački koja tom položaju odgovara, pomnožen s kutom $\Delta\alpha$ koja odgovara razmaku izvoda jednog svitka. Mjerilo dobivamo kao i ranije iz izraza (7) odnosno (9).

Svi ovi postupci dolaze u obzir samo ako su svitci dijametralni. Kako se vidi na sl.5-31a), u takovom slučaju krivulja



Sl. 5-30

napona predstavlja zaista krivulju indukcije u odredjenom mjerilu, jer jedna i druga strana svitka leže pod suprotnim polovima na mjestu jednake indukcije. Ako je korak različit od dijametralnog, obje strane svitka leže na mjestima različitih indukcija, pa krivulja napona više ne predstavlja krivulju polja (sl.5-31b).



Direktno mjerenje indukcije u rasporu može se provesti s pomoću bizmut-spirale, koja mijenja otpor za cca 5 % na svakih 0,1 T promjene indukcije. Otpor je ovisan i o temperaturi, a temperaturni koeficijent je opet ovisan o indukciji, pa su potrebne krivulje baždarenja za različite temperature, i kontrola temperature pri mjerenju. Osim toga, ovakova spirala vrlo je krhka. Iz svih tih razloga danas je mnogo zgodnije mjeriti s pomoću Hall-ovih sondi. Ove sonde koriste Hall-ov efekat, tj. činjenicu, da se u određenoj kombinaciji poluvodiča, kroz koju protječe struja I , i koja se nalazi u polju indukcije B , pojavljuje okomito na smjer struje I i indukcije B napon veličine :

$$U = K \cdot I \cdot B \quad (10)$$

gdje je K konstanta karakteristična za sondu. Napon U mjerimo u kompenzacionom spoju, ili instrumentom malog potroška. Ako održavamo struju I konstantnom, mjereni napon nam daje indukcija B u mjerilu :

$$m_B = \frac{1}{K \cdot I} \quad (T/V) \quad (11)$$

Postoje gotovi instrumenti sa skalom baždarenom u (T), a sonde su vrlo malih dimenzija, pa se mogu vršiti mjerenja u rasporu.

5.2.5 Korekcija raspora glavnih polova. Ako generator kod brzine n_1 treba da daje u praznom hodu napon U , ili ako motor pri naponu U treba da ide brzinom n_1 , pa se kod ispitivanja ispostavi, da smo dobili napon U' kod generatora, odnosno brzinu n' kod motora, to znači da glavni tok nije onolik, kolik bi trebao da bude. Ako stvarnu vrijednost toka označimo sa ϕ' , a vrijednost koja bi trebala da bude označimo sa ϕ , bit će za slučaj generatora:

$$\phi' : \phi = E' : E \quad (1)$$

a za slučaj motora:

$$\phi' : \phi = n_1 : n' \quad (2)$$

Tok koji treba udesiti da bi dobili pravi napon kod generatora iznosi :

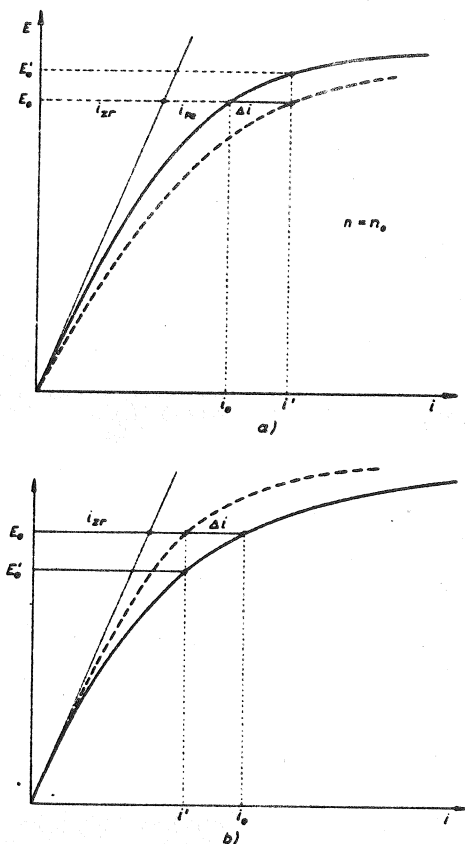
$$\phi = \frac{E}{E'} \cdot \phi' \quad (3)$$

a isto tako kod motora :

$$\phi = \frac{n'}{n_1} \cdot \phi' \quad (4)$$

To možemo postići promjenom uzbudne struje, pri čemu nema dalj-

njih problema. No često je potrebno, da uzbudne struje nekoliko strojeva budu iste, ili da se uzbudna struja održi na tačno određenoj vrijednosti, npr. zbog uređaja za automatsku regulaciju ili slično. U takovom slučaju potrebno je koristiti raspored glavnih polova, kako bi dobili traženi tok ϕ , uz nepromijenjenu uzбудnu struju i' . Da bi unaprijed proračunali potrebnu promjenu rasporeda, snimimo karakteristiku zasićenja kod bilo koje brzine vrtnje n_0 (sl.5-32).



Sl. 5-32

Ako se traži napon generatora U kod brzine n_1 , onda kod brzine n_0 tome odgovara napon (sl.5-32a):

$$E_0 = U \cdot \frac{n_0}{n_1} \quad (5)$$

Pošto imamo u stvari napon U' , kojemu odgovara :

$$E'_0 = U' \cdot \frac{n_0}{n} \quad (6)$$

postavlja se zadatak, da karakteristiku pomaknemo tako, da bi uz uzbuđnu struju i_0 , koja odgovara naponu E' dobili napon E_0 . Uzbuđnu struju i_0 , potrebnu za napon E_0 , treba dakle povećati za iznos :

$$\Delta i = i' - i_0 \quad (7)$$

povećanjem raspora. Kod napona E_0 otpao je na raspor cio uzbuđne struje i_{xr} , koji odsjeca tangenta na krivulju zasićenja u ishodištu (sl.5-32a). Novi raspor mora zaktijevati povećanu uzбудu za Δi , pa vrijedi:

$$\delta_{novi} = \delta_{stari} \cdot \frac{i_{xr} + \Delta i}{i_{xr}} \quad (8)$$

Ako je napon prenizak (sl.5-32b), veličina Δi prema (7) postaje negativna, pa je $\delta_{novi} < \delta_{stari}$.

Kod motora postavlja se zadatak, da treba brzinu n' promijeniti u n_1 bez promjene uzbuđne struje. Pri naponu U , i uz pad napona na četkicama od 2 V, ovim brzinama odgovara ju na karakteristici snimljenoj pri brzini n_0 tačke (sl.5-32a, b

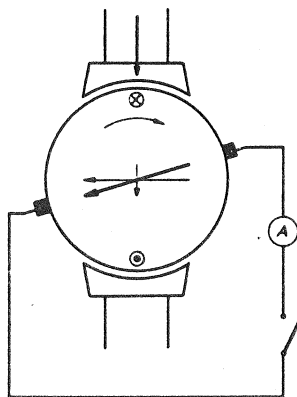
$$E'_0 = (U-2) \cdot \frac{n_0}{n'} \quad (9)$$

$$E_0 = (U-2) \cdot \frac{n_0}{n_1} \quad (10)$$

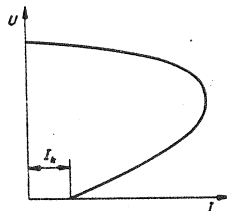
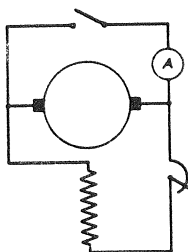
Daljnji postupak je isti kao što je opisano za slučaj generatora, a novi zračni raspor slijedi iz izraza (8). Ako je brzina n' bila preniska, potrebno je raspor povećati, a ako je bila previsoka, potrebno ga je smanjiti.

5.2.6 Kratki spoj. Pogon u kratkom spoju često se upotrebljava pri kontroli komutacije, kako bi mogli ispitivati stroj pri velikoj struji bez velikih snaga. Dok smo kod sinhronih i asinhronih strojeva iz pokusa kratkog spoja dobivali važne podatke o reaktancijama, gubicima, potznom momentu itd., kod istosmjernog stroja ne dobivamo u kratkom spoju nikakvih važnih konstanta i karakteristika. Ipak je potrebno provesti pokus kratkog spoja u samom početku ispitivanja, kako bi se osigurali od prevelikih struja, koje mogu uništiti stroj. Ako su naime četkice pomaknute van neutralne zone nasuprot smjeru vrtnje, pojavljuje se prema sl.5-33 reakcija armature s komponentom u smjeru glavnog polja. Dovoljan je napon razmencije, da uz-

budi u rotoru struju, koja stvara polje i pojačava se dalje sama. Prije no što bi stigli zaustaviti stroj, struja bi dosegla opasne vrijednosti. Zato treba predvidjeti sklopku u krugu armature i ampermetar. Stroj pokušavamo oprezno uzбудiti, i čim struja počne rasti, vraćamo regulator uzbude. Ako se struja odmah ne smanji, već nastavi rasti, smjesta izbacimo sklopku. Tek kad smo postigli posve stabilan rad, tj. kad možemo struju kratkog spoja po volji regulirati prema dolje do vrijednosti koja ne prelazi cca 10 % nazivne struje, smijemo pristupiti ispitivanjima komutacije u kratkom spoju ili sličnim mjerenjima. To isto vrijedi i za nezavisnu uzbudu, i za porednu uzbudu, jer je u ovom posljednjem slučaju napon na uzбудnom napotu u kratkom spoju praktički jednak nuli (sl.5-34), pa struju određuje samo napon remanencije.



Sl.5-33



Sl.5-34

Najsigurniji je postupak, da oslobodimo nosač četkica i zakrenemo četkice u smjeru vrtnje, pa ih onda za vrijeme rada u kratkom spoju polako i oprezno, uz promatranje struje, dovedemo u neutralnu zonu.

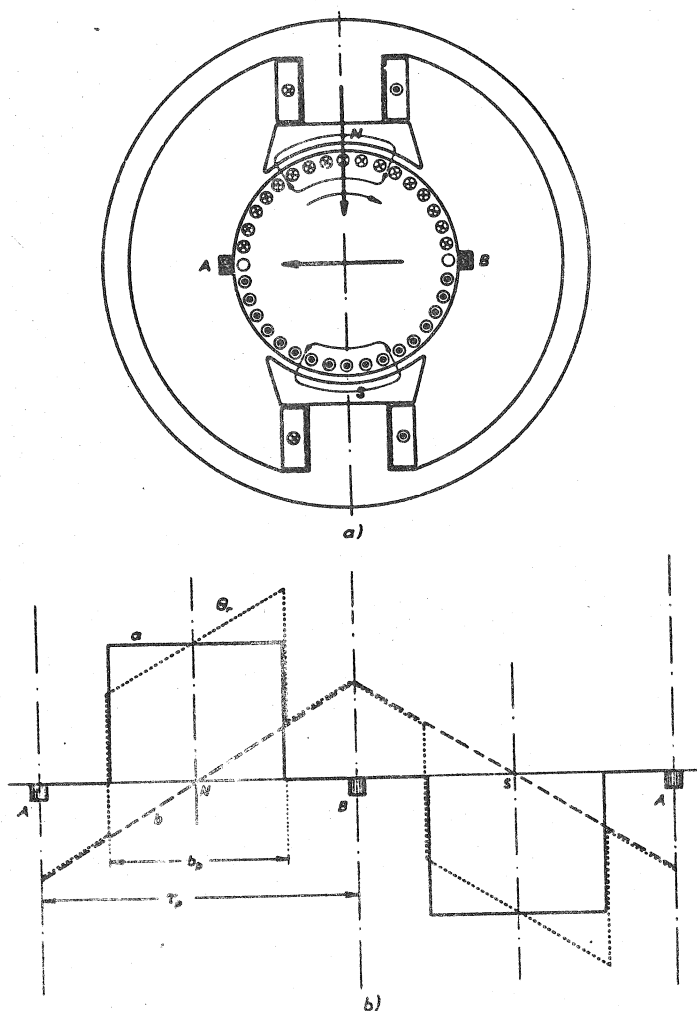
Ma da je konačan iznos kratkog spoja malen, ipak bi kratki spoj na stezaljkama već uzbuđenog stroja izazvao velik udarac struje, određene glavnim tokom prije kratkog spoja, koji bi mogao oštetiti stroj prije nego glavni tok u prelaznoj pojavi spadne na tok remanencije. Zato se uvijek kratko spaja neuzbuđen stroj.

5.3 Reakcija armature

Za razliku od sinhronog i asinhronog stroja, reakcija armature kod istosmjernog stroja zahtijeva određena predradnja,

kontrole i udešavanja, prije konačnog ispitivanja karakteristika opterećenja. Upravo zbog toga potrebno je poznavanje uzroka i posljedica reakcije armature, kako bi se korekcionni zahvati poduzeli na pravom mjestu i u pravom smislu.

5.3.1 Zasićenje u polovima. Os uzbude koncentrirane na glavnim polovima prema sl.5-35a, nalazi se u smjeru N-S. Rotor sa svojim jednoliko raspoređenim vodičima kroz koje teče stru-



Sl. 5-35

ja predstavlja svitak s osi B-A . Za razliku od uzbude glavnih polova, koje se može, uz zanemarenje magnetskog otpora u željezu polova u usporedbi s onim zračnog raspora, smatrati koncentriranom, uzbuda na rotoru je kontinuirano raspodijeljena po čitavom obodu. Ako razvijemo obod rotora (sl.5-35b), uzbuda glavnih polova bit će predstavljena linijom (a), a uzbuda reakcije armature linijom (b) . Rezultantna uzbuda Θ_r , s jedne strane i magnetski otpor zračnog raspora, zubi i polnog nastavka s druge strane određuju indukciju u rasporu. Sama reakcija armature uzbudila bi tok, koji bi se zatvarao kroz rotor, zračni raspor i polne nastavke, tj. ne bi prolazio kroz polne jezgre i jaram statora. Pri uzbudjenim glavnim polovima reakcija armature ne će utjecati na raspodjelu toka u polnim jezgrama i jarmu, ali će u zračnom rasporu, zubima rotora i polnim nastavcima izazvati zgušćavanje silnica u smjeru vrtnje, te razredjivanje silnica nasuprot smjeru vrtnje kod generatora, a obrnuto kod motora. Slika izgleda, kao da opterećeni rotor generatora "povlači" silnice za sobom, a da se rotor motora "otiskuje" od silnica. Ako strujni oblog rotora označimo sa A, a uzbudu jednog pola sa Θ_p , vrijedi:

$$A = \frac{\frac{I}{2a} \cdot z}{D \pi} \quad (1)$$

$$\Theta_r = \Theta_p \pm A \cdot x \quad (2)$$

$$\Theta_{r \max} = \Theta_p + A \cdot b_p / 2 \quad (3)$$

$$\Theta_{r \min} = \Theta_p - A \cdot b_p / 2 \quad (4)$$

gdje je :

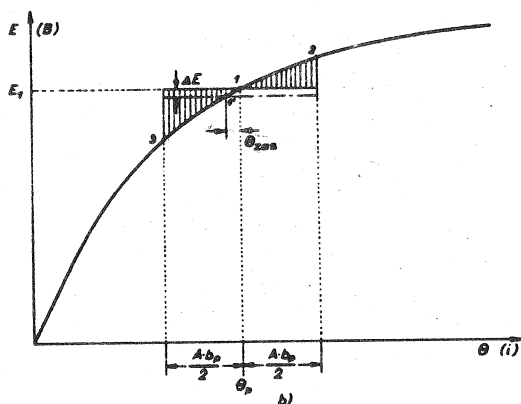
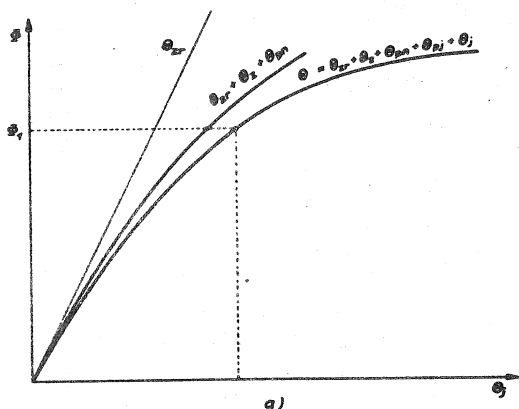
- I - ukupna struja armature,
- 2a- broj paralelnih grana armature
- z - ukupni broj vodiča armature
- D - promjer rotora

Vrijednosti $\Theta_{r \max}$, $\Theta_{r \min}$ odnose se na rubove polova, a u području četkica uzbuda će biti:

$$\Theta_c = A \cdot \tau_p / 2 \quad (5)$$

Kad bi htjeli tačno razmatrati utjecaj reakcije armature na indukciju, trebalo bi odvojiti od karakteristike $\phi = f(\theta)$ karakteristiku, koja umjesto ukupnog protjecanja θ prikazuje samo protjecanje za zračni raspor, zube rotora i polni nastavak $\phi = f(\theta_{zr} + \theta_z + \theta_{pn})$, prema sl.5-36a). Ako uzmemo u obzir, da je zračni raspor jednake širine ispod čitavog pola, onda veličina ϕ na ordinati predstavlja u određenom mjerilu i indukciju B, npr. u rasporu ispod sredine pola, a također i napon koji

se inducira u vodiču na tom mjestu kod konstantne brzine vrtnje. Pošto rastavljanje Θ na pojedine članove zahtijeva



Sl. 5-36

detaljan proračun magnetskog kruga, a krivulja $E = f(i)$ može se lako snimiti i stoji nam uvijek na raspolaganju, zanemarujemo obično mali dio protjecanja koji otpada na polnu jezgru i jarmove, i uzimamo kao da se amperzavojima reakcije armature u rasporu pod polovima suprotstavlja isti magnetski otpor, kao i uzbudi glavnih polova, tj. radimo s karakteristikom $\phi = f(\Theta)$ ili, što je isto, $E = f(\Theta)$ prema sl.5-36b. Ako uzbudi glavnih polova Θ_p odgovara napon E_1 , onda će se u vodiču ispod sredine pola inducirati napon e_1 , koji bi, da se inducira u svim vodičima ispod pola, dao ukupni napon E_1 . Pri tome su zanemarene sitne nepravilnosti u raspodjeli

indukcije na rubovima polova, tj. pretpostavljena je konstantna indukcija po čitavoj širini pola b_p .

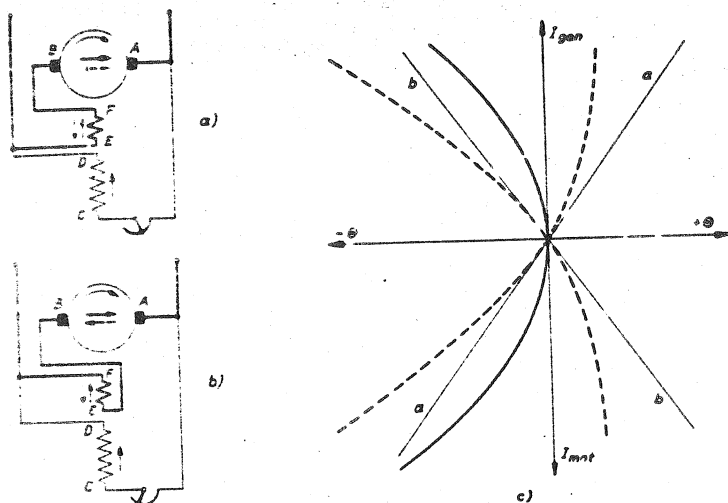
Uzbudi Θ_p potrebno je s jedne strane dodati, a s druge strane oduzeti protjecanje $A \cdot x$, da bi dobili uzbudu, koja određuje indukciju u rasporu i time napon po vodiču e_x u udaljenosti x od sredine pola. Naponu vodiča e_x odgovarao bi ukupni napon E_x . Pod rubovima pola dobili bi x protjecanje za $A \cdot b_p/2$ veće odnosno manje od Θ_p , a tome bi odgovarali naponi po vodiču e_2 odnosno e_3 . Pošto je ukupni napon zbroj napona svih vodiča, a ovi su proporcionalni ordinatama krivulje $E = f(\Theta)$ između tačaka 3 i 2, to je očito, da je ukupni napon predstavljen površinom ispod te krivulje između tih tačaka. Ta površina je očito manja od površine, koju bi dobili kad bi sve ordinate bile e_1 , i to za toliko, koliko je lijeva šrafirana površina veća od desne. To znači, da će sniženo protjecanje pod jednom polovinom pola u većoj mjeri smanjiti tok, nego što će ga povišeno protjecanje pod drugom polovinom pola povećati. Ako nadjemo srednju vrijednost svih ordinata između 3 i 2, dobit ćemo stvarno inducirani napon E_1 , koji je za ΔE manji od napona E_1 bez reakcije armature. Efekat je isti, kao da smo pri konstantnoj indukciji u rasporu smanjili uzbudu za iznos Θ_{zas} .

Strujni oblog A , a time i iznos $Ab_p/2$, proporcionalan je struji I . Uz uobičajene prilike zasićenja u stroju, analiza veličine Θ_{zas} u ovisnosti o struji I pokazuje, da se u području od $I = 0$ do $I = 1,25$. I_n može približno uzeti, da se Θ_{zas} mijenja proporcionalno s I_n^2 . Ako smo dakle odredili vrijednost $\Theta_{zas n}$, koja odgovara struji I_n , onda u gornjem intervalu možemo uzeti da je :

$$\Theta_{zas} = \Theta_{zas n} \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \quad (6)$$

Ovi "amperzavoji reakcije armature uslijed zasićenja" uvijek djeluju u smislu smanjenja uzbude. Kako se vidi na sl. 5-37, amperzavoji serijskog uzbudnog namota djelovat će u smislu pomaganja uzbude (dva desna kvadranta), ili slabljenja uzbude (dva lijeva kvadranta), prema tome, da li imamo spoj prema 5-37(a) ili (b), i da li je pogon generatorski ili motorski (dva gornja, odnosno dva donja kvadranta). Reakcija armature će preko zasićenja uvijek slabiti uzbudu, a osim toga uvijek će unositi nelinearnost u djelovanje serijskog uzbudnog namota. Ako promatramo zajedničko djelovanje serijske uzbude i reakcije armature Θ_{zas} (crtkane krivulje na sl. 5-37), očito je, da će krivulje uvijek biti zakrivljene u lijevo.

Eliminiranje Θ_{zas} moguće je samo postavljanjem kompenzacionog namota u polne nastavke, što dolazi u obzir kod velikih strojeva, i kod specijalnih strojeva.



Sl. 5-37

5.3.2 Pomak četkica. Reakcija armature daje protjecanje, koje je prikazano na sl.5-35b linijom b, i koje na mjestu, gdje se nalaze četkice, iznosi - računato za 1 pol :

$$\Theta_x = A \cdot \frac{\tau_p}{2} = A \cdot \frac{D\pi}{4p} \quad (1)$$

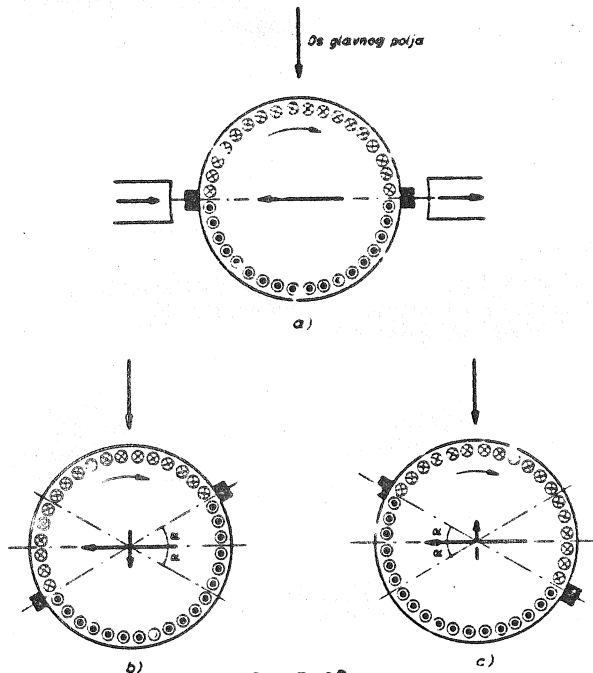
Ako se četkice nalaze tačno u neutralnoj zoni, os ovog protjecanja tačno je okomita na os glavnog polja (5-38a), i ono ne jača i ne slabi glavno polje, osim indirektno preko zasićenja polnih nastavaka, što je posebno razmotreno u 5.3.1, i obuhvaćeno članom Θ_{zas} . Ma da je raspor u području četkica velik, ipak će protjecanje Θ_x stvarati napon u svitcima, koji su kratko spojeni za vrijeme prolaza pripadnih lamela na kolektoru ispod četkica i time uzrokovati dodatne teškoće u komutaciji. Tu si pomožemo pomoćnim polovima. Ovi moraju dati suprotno protjecanje, koje će poništiti Θ_x i još pored toga stvoriti određeno magnetsko polje B_p u zoni komutacije, takovo, da inducira napon suprotan naponu samoindukcije, i time ubrzava komutaciju.

U slučaju da su četkice pomaknute iz neutralne zone, lako je vidjeti, da protjecanje iznad četkica ostaje isto, ali je dan pojas strujnog obloga, omeđen dvostrukim kutom α pomaka

četkica iz neutralne zone, daje amperzavoje, čija os se podudara s osi glavnog polja. Ovo protjecanje po jednom polu iznosi

$$\Theta_k = \frac{D}{2} \cdot \alpha \cdot A \quad (2)$$

Kut pomaka četkica α u lučnoj mjeri često se iskazuje pomakom



Sl. 5-38

četkica izraženim u broju lamela na kolektoru k , širini lamela b , i promjerom kolektora D_k tako, da kut α dobivamo kao :

$$\alpha = \frac{k b}{D_k \cdot \pi} \cdot 2\pi = \frac{2kb}{L_k} \quad (3)$$

Slika 5-38 a,b,c nacrtana je tako, da smjer struje u vodičima odgovara generatorskom pokretu za desni smjer vrtnje. Na slici (b) četkice su pomaknute nasuprot smjeru vrtnje, a protjecanje Θ_k potpomaže glavno polje. Na sl. (c) pomak četkica u smjeru vrtnje dao je protjecanje koje djeluje nasuprot glavnom polju. U motorskom radu uz isti smjer vrtnje struje teku u suprotnom smjeru, pa će očito smjer protjecanja biti takodjer obrnut. Ako sa (+) označimo protjecanje koje potpomaže glavno polje, onda se može za reakciju armature prikazati smisao djel.

vanja slijedećom tabelom:

T a b e l a 5.3-1

Predznak djelovanja reakcije armature	Č e t k i c e					
	u neutralnoj zoni		pomaknute u smjeru vrtnje		pomaknute nasuprot smjeru vrtnje	
	Gener.	Motor	Gener.	Motor	Gener.	Motor
θ_{zas}	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
θ_{α}	0	0	(-)	(+)	(+)	(-)

Kod generatora će slabljenje glavnog polja značiti smanjivanje induciranog napona, i obrnuto. Ako napon generatora pada s opterećenjem, zovemo takav generator stabilnim. Negativni utjecaj reakcije armature znači dakle povećanje stabilnosti generatora.

Kod motora slabljenje glavnog polja zahtijeva veću brzinu vrtnje, da bi se inducirao protunapon narinutom naponu mreže, dok jačanje glavnog polja dovodi do smanjenja brzine. Motor nazivamo stabilnim kad mu brzina pada s opterećenjem. Za povećanje stabilnosti motora potreban je dakle pozitivan predznak reakcije armature.

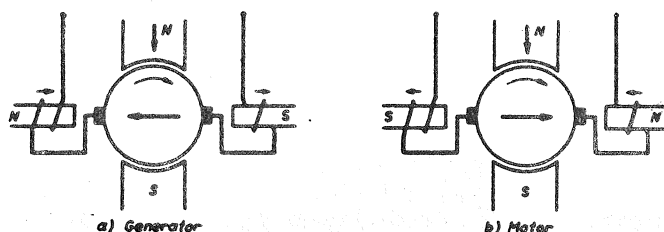
Tabela 5.3-1 može se dakle sažeti ovako :

- θ_{zas} čini generator stabilnijim, motor nestabilnijim;
- pomak četkica u smjeru vrtnje povećava stabilnost i generatora i motora;
- pomak četkica nasuprot smjeru vrtnje smanjuje stabilnost i generatora i motora.

Do pomaka četkica može doći i na taj način, da četkice koje nisu dobro ubrušene, naliježu prednjim ili stražnjim rubom. Time je neutralna zona pomaknuta nasuprot ili u smjeru vrtnje. Takodjer se može dogoditi, da kod postavljanja četkica u neutralnu zonu ove nisu bile dobro ubrušene. Kad se u pogonu ubruše, nalegnu čitavom površinom, i os namota se ne podudara više s neutralnom osi (vidi 5.1.5 i sl. 5-17).

5.3.3 Utjecaj pomoćnih polova. Sa slike 5-38(a) vidi se, da je za suzbijanje reakcije armature u području komutacije potreban polaritet pomoćnih polova takav, da iza glavnog pola u smjeru vrtnje slijedi pomoćni pol suprotnog polariteta, ako se radi o generatoru. Struju generatora tjera napon induciran od glavnog pola. Da bi tu struju što prije reverzirali, potreban je pomoćni pol suprotnog polariteta.

Kod motorskog pogona bit će struja obrnuta, jer je tjera napon mreže nasuprot induciranom naponu stroja. Obrnutoj reakciji armature odgovara i obrnuti polaritet pomoćnog pola, pa će u smjeru vrtnje iza glavnog pola slijediti istoimeni pomoćni pol. Inducirani napon pod glavnim polom protivi se struji koju tjera mreža. Želimo li struju reverzirati, potreban je dakle isti polaritet pomoćnog pola. Kako se vidi sa sl. 5-39a, b, kod prelaza s generatorskog na motorski rad nije potrebno nikakovo prespajanje namota pomoćnih polova, jer se s promjenom



Sl. 5-39

smjera struje promijeni i smjer reakcije armature, i polaritet pomoćnih polova.

Ako je djelovanje pomoćnih polova prejako, komutacija će se odvijati prebrzo, struja u svitku će prolaziti kroz vrijednost nula prije dolaska svitka pod sredinu četkice. Rezultat je isti, kao da su četkice pri normalnoj komutaciji pomaknute ususret svitku koji dolazi, tj. nasuprot smjeru vrtnje. Obrnuto, kod preslabih pomoćnih polova komutacija kasni, i rezultat je isti, kao da smo četkice pomakli u smjeru vrtnje. Odatle slijedi zaključak, da preslabi pomoćni polovi povećavaju stabilnost, a prejaki smanjuju stabilnost. To vrijedi kako za generator tako i za motor.

Reakcija armature raste linearno sa strujom opterećenja I . Iz jednačbi (5) i (1) u 5.3.1 slijedi:

$$\Theta_z = A \cdot \frac{\tau_p}{2} = \frac{I z}{\delta a p} = I \cdot w_a \quad (1)$$

gdje je sa w_a označen efektivni broj zavoja armature po polu. Uz broj zavoja na pomoćnom polu w_p bit će protjecanje koje daje indukciju B_p ispod pomoćnog pola :

$$\Theta_{pp} = I (w_p - w_a) \quad (2)$$

Napon samoindukcije u svitku koji komutira iznosi :

$$e_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (3)$$

U idealnom slučaju linearne komutacije promjena struje iznosi:

$$di = 2I \quad (4)$$

a vrijeme dt ovisi o brzini vrtnje:

$$dt = \frac{\text{konst}}{n} \quad (5)$$

tako da je :

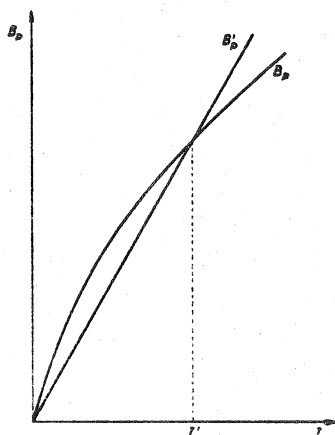
$$e_L = K' \cdot I \cdot n \quad (6)$$

Protunapon, koji induciraju pomoćni polovi, treba da poništi taj napon samoindukcije :

$$K'' \cdot B_p' \cdot n = K' \cdot I \cdot n \quad (7)$$

$$B_p' = K \cdot I \quad (8)$$

Brzina vrtnje n očitno ispada iz računa, a potrebno polje ispod pomoćnih polova linearne ovisi o struji opterećenja I . U stvari, put silnica pomoćnih polova kroz željezo uzrokuje zakrivljenost karakteristike $B_p = f(I)$. Na sl.5-40 prikazan



Sl. 5-40

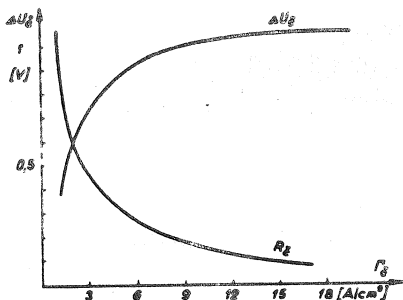
je pravac potrebne indukcije B_p' i krivulja stvarne indukcije B_p u ovisnosti o struji I . Oni se sijeku u jednoj tački, tj. pomoćni polovi mogu se idealno udesiti samo za jedno određeno opterećenje I' . Ispod tog opterećenja pomoćni polovi će biti prejak, iznad toga će biti preslabi. Osim posljedica po komutaciju, o kojima će biti govora u 5.5.2, treba dakle očekivati i smanjivanje stabilnosti kod nižih opterećenja, a povećanje stabilnosti kod preopterećenja zbog pojava zasićenja u pomoćnim polovima.

5.3.4 I - linije. Kod opterećenja istosmjernog stroja u otporima stroja i na četkicama dolazi do pada napona. Kod generatora bit će napon na stezaljkama U za taj pad napona manji od induciranog napona E , a kod motora obrnuto. Pad napona u otporu armature i otporima svih namota stroja kroz koje teče struja armature iznosi :

$$\Delta U_R = I \cdot R = I (R_a + R_s) \quad (1)$$

gdje je R_a - otpor armature, a R_s - zbroj otpora svih namota spojenih u seriju s armaturom. Pad napona na četkicama uzima

se kod grafitnih četkica redovito 1 V po četkici kod svih opterećenja, ma da je u stvari ovisan o veličini struje, kako se vidi sa sl.5-41. Kod punog opterećenja i preopterećenja može se s dovoljno tačnosti uzeti za obe četkice:



Sl. 5-41

$$\Delta U_g \approx 2 \quad (2)$$

Ako uzбудimo stroj pri konstantnoj brzini n_0 uzbudnom strujom i_0 , tako da u praznom hodu dobijemo napon U_0 , pa ako ga zatim opteretimo strujom I ,

padovi napona u struju iznose svega :

$$\Delta U_R + \Delta U_g = IR + 2 \quad (3)$$

a izmjereni napon na stezaljkama bit će U . Ako izmjerimo stvarnu razliku napona u praznom hodu i pri opterećenju, ova će biti općenito različita od padova napona prema (3).

$$\Delta U = U_0 - U \neq \Delta U_R + \Delta U_g \quad (4)$$

Ako stroj nije kompaundiran, ova razlika će biti veća od padova napona prema (3), a to znači, da se inducirani napon stroja zbog reakcije armature smanjio za iznos ΔE , tako da je :

$$\Delta U = IR + 2 + \Delta E \quad (5)$$

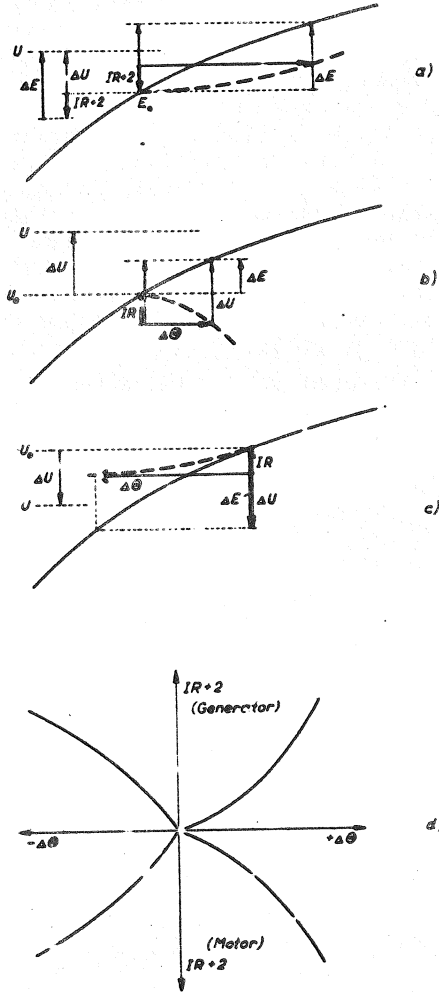
Ako je izmjereno U_0 i U te izračunato $IR + 2$, može se odrediti ΔE konstrukcijom prema sl.5-42. Sa slike možemo odmah očitati i iznos $\Delta \theta$ (u mjerilu uzbudne struje i , tj. kao struju pri broju zavoja upotrebljenog uzbudnog namota), za koji se smanjila uzbuđa uslijed reakcije armature. Ako ponovimo taj postupak za različite struje I , dobivamo različite vrijednosti $\Delta \theta$, nanese u ovisnosti o veličini $IR + 2$ (dakle o struji I). Ovu krivulju nazivamo I -linijom, a ona nam daje korisne podatke o ponašanju stroja pri opterećenju. Pad napona ΔU očitavamo direktno, kao vertikalnu udaljenost od I -linije do karakteristike praznog hoda. Budući da je sada inducirani napon

$$E = U_0 - \Delta E \quad (6)$$

to možemo očitati potrebno povećanje Δi uzbudne struje, da bi napon na stezaljkama ostao nepromijenjen, tj.

$$U = U_0 \quad (7)$$

inducirani napon se povećao (ΔE je negativno), a uzbuđa je povećana, tj. $\Delta \theta$ je pozitivno. Sl.5-43b prikazuje



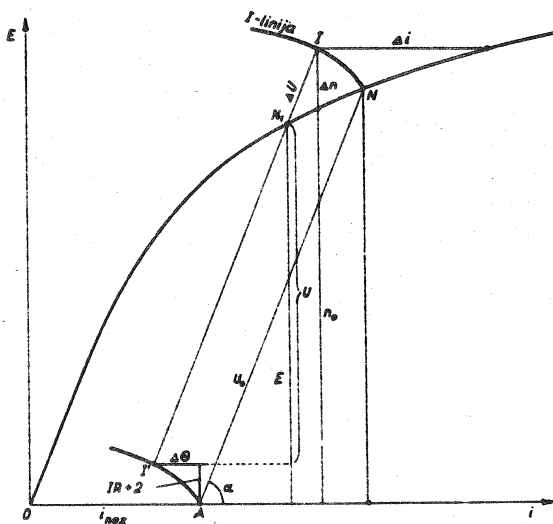
Sl. 5-43

slučaj motora s kompaundacijom. Veličinu $IR + 2$ nanosimo u suprotnom smjeru. Napon U treba povišati za ΔU , da bi brzina vrtnje ostala ista, tj. pad napona ΔU je negativan, a isto tako ΔE . Prirost uzbuđe $\Delta \theta$ je pozitivan. Sl.5-43c

prikazuje napokon slučaj motora s protukompaundacijom. Napon treba smanjiti, da bi brzina ostala ista, tj. ΔU je pozitivan. Prirast uzbuđe $\Delta \theta$ je negativan. Sl.5-43b prikazuje I-linije za različite slučajeve motorskog i generatorskog rada s kompaundacijom i protukompaundacijom.

Ako se tačka I-linije nalazi iznad karakteristike praznog hoda, pad napona ΔU je pozitivan (tj. napon generatora uz $n=\text{konst.}$ će se smanjiti, a napon motora moramo smanjiti da bi zadržali istu brzinu), prirast uzbuđe Δi da bi održali $U=\text{konst.}$ kod $n=\text{konst.}$ također je pozitivan, a prirast brzine Δn da bi zadržali $U=\text{konst.}$ kod $i=\text{konst.}$ također je pozitivan. Obrnuto, ako je tačka I-linije ispod karakteristike praznog hoda, ΔU , Δi i Δn su negativni. Kod generatora to znači, da će napon porasti kod opterećenja, da uzbuđu treba smanjiti, ako želimo zadržati isti napon kod nepromijenjene brzine, ili da treba brzinu smanjiti kod nepromijenjene uzbuđe. Kod motora to znači, da napon treba povišiti, ako želimo kod iste uzbuđe zadržati nepromijenjenu brzinu, ili treba uzbuđu smanjiti pri nepromijenjenom naponu. Ako napon i uzbuđa ostanu nepromijenjeni, brzina motora će pasti.

Na sličan način može se I-linija koristiti i za razmatranje ponašanja stroja sa samouzbuđom. Na sl.5-44 prikazan je najop-



Sl. 5-44

ćenitiji slučaj stroja s nezavisnom uzbuđom i_{nez} i samouzbuđom, koja u praznom hodu daje napon U_0 određen sjecištem N pravca samouzbuđe i karakteristike praznog hoda. Pri opterećenju strujom I smanji se osnovna uzbuđa za iznos $\Delta \theta$ a napon na stezaljkama manji je od inducirano napona za $IR + 2$, što je

prikazano I-linijom iz tačke A. Ako iz tačke I' ove linije povučemo pravac samouzbuđe, sjecište s karakteristikom praznog hoda određuje novi inducirani napon E, i novi napon na stezaljkama U. Povučemo li iz tačke praznog hoda N istu I-liniju, udaljenost između tačaka I'-I uvijek je ista, te predstavlja dužinu:

$$\overline{AN} = U_0 / \sin \alpha = k \cdot U_0 \quad (11)$$

tj. u određenom mjerilu napon praznog hoda. U tom istom mjerilu predstavlja dužina $\frac{I \cdot N_1}{I}$ napon U:

$$\overline{I'N_1} = k \cdot U \quad (12)$$

odnosno

$$\overline{IN_1} = k \cdot \Delta U \quad (13)$$

Potrebno je dakle samo nanijeti I-liniju iz tačke praznog hoda, i mjeriti padove napona kao udaljenosti do karakteristike praznog hoda, mjerene u smjeru pravca samouzbuđe, pri čemu je mjerilo takovo, da odsječak pravca samouzbuđe $\overline{AN}$ predstavlja napon praznog hoda U_0 . Veličine Δi i Δn određujemo na isti način kako je opisano ranije, a isto tako i predznaci su definirani kao ranije.

I-linija ne može poslužiti za dobivanje dovoljno tačnih karakteristika stroja, već te karakteristike radije snimamo direktno. No razmatranje ponašanja stroja preko I-linije omogućuje nam uvijek brzu i dobru kvalitativnu sliku o uplivu pojedinih faktora na karakteristike i o mogućnosti mijenjanja tih karakteristika gdje je to potrebno.

5.4 Karakteristike

Generatorski i motorski rad samo su dva pogonska stanja jednog te istog istosmjernog stroja. Ako stroj tjeramo tako da mu inducirani napon prekorači visinu narinutog napona na stezaljkama, struja će teći u smjeru inducirano napona, i stroj će raditi kao generator. Ako ga kočimo tako da inducirani napon padne ispod vrijednosti narinutog napona, struja će teći nasuprot smjeru inducirano napona, i stroj će raditi kao motor. Smjer vrtnje je ostao isti, a obrnuo se smjer struje armature, i smjer svih magnetskih polja koja stvara struja armature. Iznimku predstavlja jedino serijski stroj, gdje prelaz od generatora na motorski pogon zahtijeva zamjenu priključka uzbuđnog namota, kako bi smjer glavnog polja i uz promijenjeni smjer struje ostao isti. Karakteristične veličine, a to je napon na stezaljkama U, struja opterećenja I, uzbuđna struja i, brzina vrtnje n, snaga na osovini P_{mech} , moment na osovini M, električna snaga P_e , gubici P_g , efikasnost η , mogu se

prikazati za različita pogonska stanja generatorskog i motor-skog rada. Neke veličine možemo uvijek računski odrediti, bez direktnog mjerenja. Tako je npr. električka snaga uvijek :

$$P_{el} = U \cdot I \quad (1)$$

Gubitke P_g ne mjerimo direktno, već ih dobivamo zbrajanjem pojedinačnih gubitaka prema 5.6. Odatle slijedi mehanička snaga kao :

$$P_{meh} = UI \pm P_g \quad (2)$$

gdje predznak (+) vrijedi za generator, a (-) za motor. Korisnost je onda :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{meh}}{P_{el}} \quad (3)$$

za motor, odnosno :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{el}}{P_{meh}} \quad (4)$$

za generator. Zakretni moment dobivamo kao :

$$M = \frac{P_{meh}}{\omega} = \frac{P_{meh}}{n} \cdot \frac{60}{2\pi} \quad (5)$$

Iz ovih razmatranja se vidi, da je potrebno mjeriti veličine U , I , i , n , kako bi potpuno definirali pogonsko stanje, i izračunati ostale veličine. No i medju ovim veličinama mogu postojati zakonitosti, koje pojednostavnjuju razmatranje. Ako npr. generator radi gonjen pogonskim strojem konstatne brzine, biti će :

$$n = konst. \quad (6)$$

pa preostaje da se mjerenjima utvrdi samo veza izmedju veličina U , I , i . Obično generator radi na mrežu konstantnog napona, ili na otpore R , pa postoji daljnji uvjet :

$$U = konst. \quad (7)$$

ili uz konstantan otpor:

$$U = I \cdot R \quad (8)$$

tako da ostaje samo odnos dviju veličina, $I = f(i)$. Često razmatramo i slučaj konstantnog otpora R_m u uzbudnom krugu, gdje vrijedi uvjet :

$$i = \frac{U}{R_m} \quad (9)$$

Koje ćemo uslove pretpostaviti, koju veličinu odabrati kao parametar, a koju kao slobodnu varijablu, ovisi o namjeni stroja, pa to treba od slučaja do slučaja odlučiti.

Kod istosmjernog motora najčešće je ispunjen uslov (7),

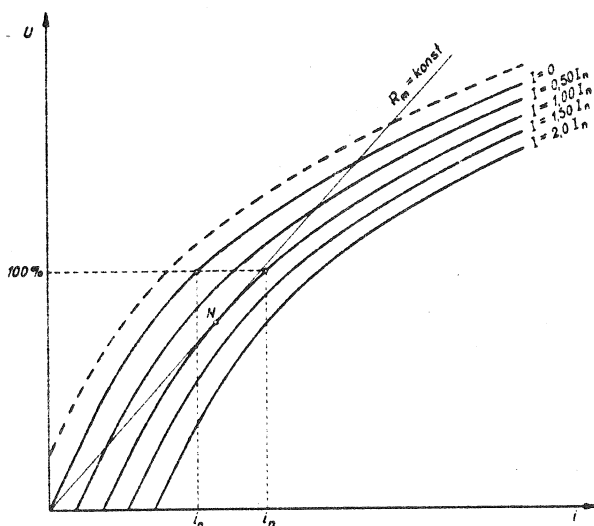
da je napon na stezaljkama konstantan. Međutim, kao i kod generatora, način snimanja karakteristika ovisi o namjeni, pa ga treba odabrati svaki puta u skladu s time.

5.4.1 Karakteristike zasićenja. U 5.2.1 opisano je snimanje karakteristike zasićenja neopterećenog stroja. Slične krivulje mogu se snimiti i za konstantne vrijednosti struje opterećenja, npr. za $I = 0,25.I_n$, $0,50.I_n$, $0,75.I_n$, I_n , $1,25.I_n$ ili slično. Pri tome je uslov :

$$n = konst \quad (1)$$

$$I = konst \quad (2)$$

Mjerimo $U = f(i)$ i nanosimo u dijagram po jednu krivulju za svaku vrijednost parametra I (sl.5-45). Za određeni napon U

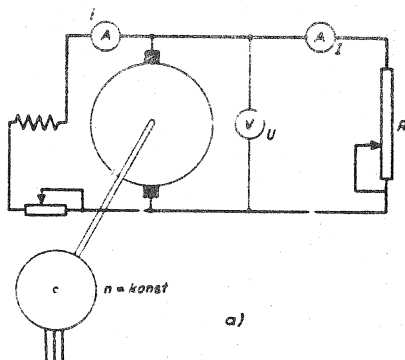


Sl. 5-45

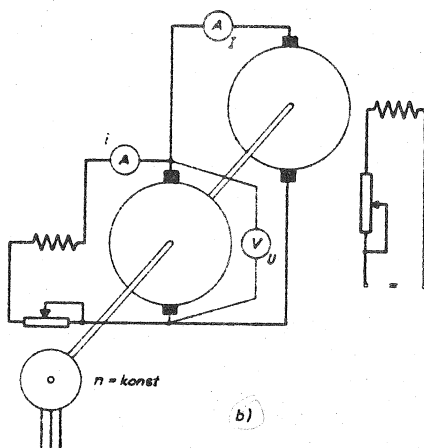
i struju opterećenja I može se očitati potrebna uzbudna struja i . Ako se radi o generatoru sa samouzбудom, onda je time određen i otpor u krugu samouzbuđbe :

$$R_m = \frac{U}{I} \quad (3)$$

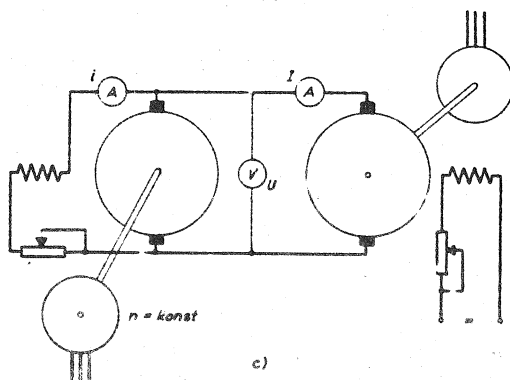
koji je predstavljen pravcem u dijagramu $U = f(i)$. Tamo gdje pravac samouzbuđbe tangira krivulju $I=konst$, otpor R_m predstavlja kritičnu vrijednost otpora $R_{m,krit}$ za tu struju opterećenja. Da bi se napće moglo postići tu struju I , mora



a)



b)



c)

biti :

$$R_m \leq R_{m \text{ krit}}(I) \quad (4)$$

Na sl.5-46 prikazan je postupak mjerenja. U uzbudnom krugu reguliramo i mjerimo struju i , na stezaljkama mjerimo napon U , a struju I održavamo konstantnom u slučaju (a) udešavanjem otpornika za opterećenje R (uz pogon konstantnom brzinom n), u slučaju (b) udešavanjem protunapona pomoćnog stroja na istoj osovini, uz zajednički pogon konstantnom brzinom n , ili u slučaju (c) pomoćnim strojem, koji nije mehanički vezan na istu osovinu, već ima vlastiti pogon.

Dakako da se mogu snimiti slične karakteristike i za motorski pogon (označene crtkano na sl.5-45), metodom pod (b) ili (c).

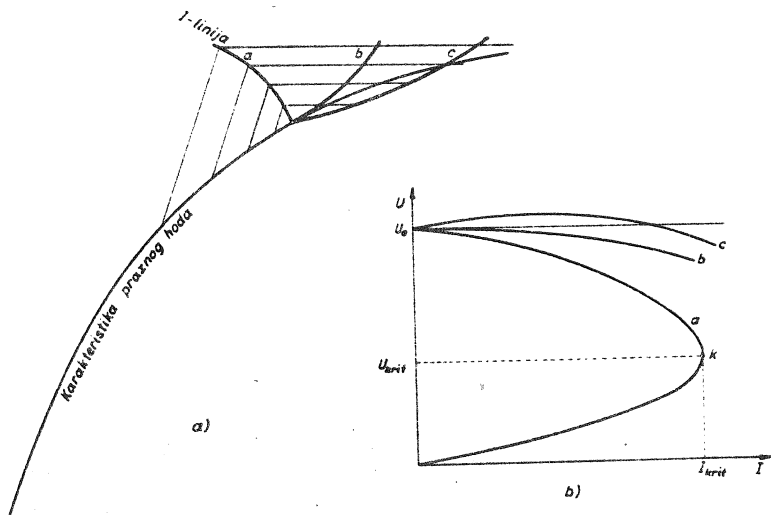
5.4.2 Vanjska i unutarnja karakteristika. Vanjska karakteristika prikazuje napon na stezaljkama U u ovisnosti o struji opterećenja I , pri čemu je :

$$n = \text{konst} \quad (1)$$

$$R_m = \text{konst} \quad (2)$$

Na sl. 5-47a prikazane su I-linije za slučaj samouzbuđbe bez kompaundacije (a), zatim s kompaundacijom (b) i s jakom kompaundacijom (c).

Na osnovu razmatranja iz 5.3.4 i sl.5-44 vidi se, koliko će se smanjiti napon U pri različitim opterećenjima, a krivulje $U = f(I)$ prikazane su na sl.5-47b. Svakoј struji kri-



vulje (a) odgovaraju dva sjecišta s karakteristikom praznog hoda, pa vanjska karakteristika ima dvije grane. Maksimalna struja I_{krit} i primarni napon U_{krit} definiraju kritični vanjski otpor :

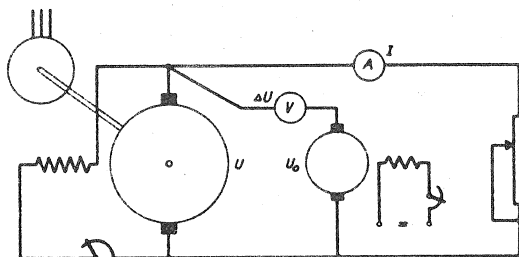
$$R_{krit} = \left(\frac{U}{I} \right)_{krit} \quad (3)$$

Ako je vanjski otpor :

$$R < R_{krit} \quad (4)$$

ta će se pri toj brzini vrtnje n i otporu uzbuđenog kruga napon i struja srušiti, i generator će raditi samo s malom strujom koja odgovara naponu remanencije.

Mjerenje možemo izvesti na bilo koji način prema sl.5-46, s time, da otpor u uzbuđenom krugu ne diramo, a udešavamo različite vrijednosti struje I , i mjerimo pripadne vrijednosti napona na stezaljkama U . Kako se obično radi o malim razlikama napona prema naponu praznog hoda U_0 , zgodno je izvršiti mjerenje prema sl.5-48. Mali agregat udešimo na napon praznog



Sl. 5-48

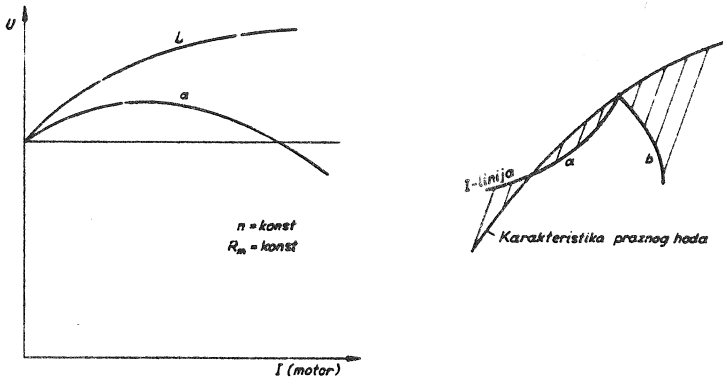
hoda U_0 , i povežemo jednom stezaljkom s ispitivanim strojem. Između druge dvije stezaljke možemo kod opterećivanja vrlo tačno mjeriti razliku napona ΔU .

Razlika napona ΔU pri nazivnoj struji, izražena u omjeru prema nazivnom naponu (koji treba da je uspostavljen pri nazivnoj struji) naziva se "regulacijom" napona generatora :

$$u = \frac{\Delta U}{U_0 - \Delta U} = \frac{\Delta U}{U_n} \quad (5)$$

Ako radimo s pomoćnim strojem, možemo snimiti vanjske karakteristike i za motorski pogon. One predstavljaju napon koji

treba dovesti motoru kod različitih opterećenja, da bi brzina vrtnje ostala nepromijenjena, uz otpor u uzbuđnom krugu netaknut. Kvalitativnim razmatranjem uz pomoć I-linije lako je vidjeti, da će zbog reakcije armature biti potrebno smanjiti napon kod većih opterećenja, osim ako je motor jako kompaundiran (sl.5-49).



Sl. 5-49

Katkada se upotrebljava i tzv. "unutarnja karakteristika", koja predstavlja inducirani napon E u ovisnosti o struji opterećenja. Ova se dobiva iz vanjske karakteristike, ako napon U kod generatora povećamo, a kod motora smanjimo za iznos $IR + 2$:

$$E = U \pm (IR + 2) \quad (6)$$

5.4.3 Karakteristike regulacije. Karakteristika regulacije prikazuje uzbuđnu struju i u ovisnosti o struji opterećenja I , uz konstantnu brzinu vrtnje n , i konstantan napon na stezaljkama U . Snimamo je kod generatora i kod motora u jednom od spojeva prema sl. 5-46, ali tako da kod generatora za svako novo udešavanje opterećenja (otpornikom ili protunaponom) korigiramo uzbuđnu struju, dok ne bude, uz pogon konstantnom brzinom $n = n_0$:

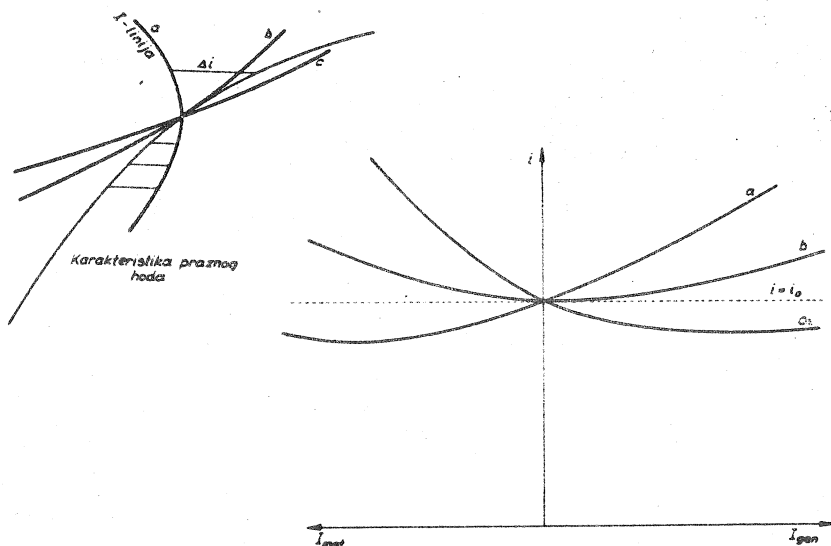
$$U = U_0 = \text{konst} \quad (1)$$

pa registriramo parove vrijednosti

$$i = f(I) \quad (2)$$

i unosimo ih u dijagram. Kod motora postupamo slično.

Na sl.5-50 prikazane su tri krivulje regulacije. Krivulja (a) odgovara stroju s dosta jakom reakcijom armature, zbog



Sl.5-50

koje je potrebno povećanje uzbuđne struje u generatorskom radu, dok je u motorskom radu još uvijek potrebno smanjiti uzbuđnu struju da bi brzina vrtnje ostala ista, kako se to može vidjeti s I-linije na istoj slici. Ako je generator jako kompaundiran, u motorskom radu djeluje taj isti namot kao protukompaundacija (krivulja b na sl.5-50). I generatorski i motorski rad zahtijevati će sada povećanje uzbuđne struje. Kod još jače kompaundacije generatora (krivulja c) potrebno je nešto smanjiti uzбудu kod generatora, ali je kod motora treba znatno povećati.

Povećanje uzbuđe i kod generatora da bi se održao konstantan napon znači, da bi uz $i = \text{konst}$ napon bio prenizak, tj. napon bi kod opterećenja pao. Prema 5.3.2 zovemo takav generator stabilnim. Obrnuto, kod motora povećanje uzbuđe pri opterećenju da bi održali $n = \text{konst}$ znači da bi uz $i = \text{konst}$ brzina bila previsoka. Brzina vrtnje je porasla s opterećenjem, a takav motor nazivamo nestabilnim. Osim već navedenih kriterija imamo dakle još jedan kriterij stabilnosti : ako uzbuđa raste s opterećenjem kod generatora, a pada s opterećenjem kod motora, onda je u tom području stroj stabilan. Još jednostavnije može se to definirati, ako uzmemo pozitivan predznak struje u generatorskom, a negativan u motorskom području, tj. ako je općenito struja definirana kao :

$$i = i_{\text{gen}}$$

$$I = -I_{mot} \quad (4)$$

U tom slučaju kriterij stabilnosti iz karakteristike regulacije glasi :

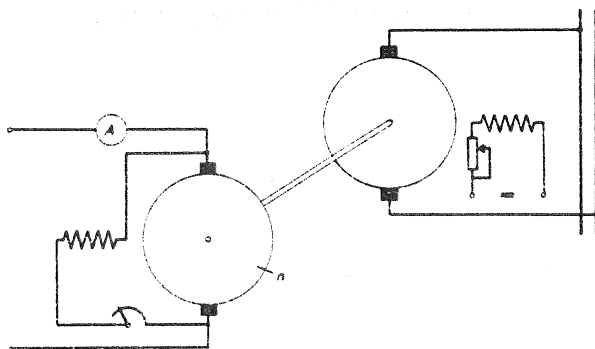
$$\frac{di}{dI} > 0 \quad (5)$$

Na sl.5-50 vidimo, da bi generator postao nestabilan tek kod jake kompaundacije (krivulja c) . Motor, međjutim, čak i kod kompaundacije pokazuje tendenciju da kod većih opterećenja postane nestabilan uslijed zakrivljenja I-linije, koja se savija u lijevo i ponovno približava krivulji praznog hoda.

5.4.4. Karakteristika brzine vrtnje. Kod motora koji normalno radi na mreži konstantnog napona, i kojemu uzbuđni krug ostaje pri opterećenju nepromijenjen, interesantna je karakteristika :

$$n = f(I) \quad (1)$$

uz $U = \text{konst}$, i $R = \text{konst}$. Prema sl.5-44 i ova karakteristika može se ocijeniti na osnovu I-linije, samo je neprilično, što se mjerilo za n od tačke do tačke mijenja. Direktno mjerenje može se provesti prema sl.5-51. Opterećenje motora

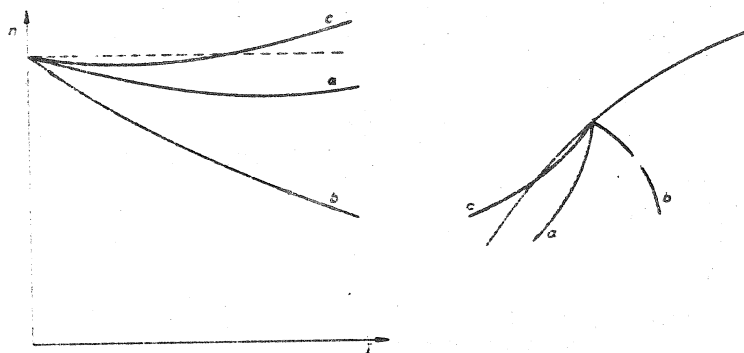


Sl. 5-51

provodimo istosmjernim strojem za opterećenje, pa čitamo struju I , i brzinu vrtnje n motora. Karakteristike su prikazane na sl.5-52. Reakcija armature čini motor nestabilnim kod većih opterećenja (krivulja a), što se daje korigirati dodatnom kompaundacijom (krivulja b). Protukompaundacija čini motor

nestabilnim (krivulja c).

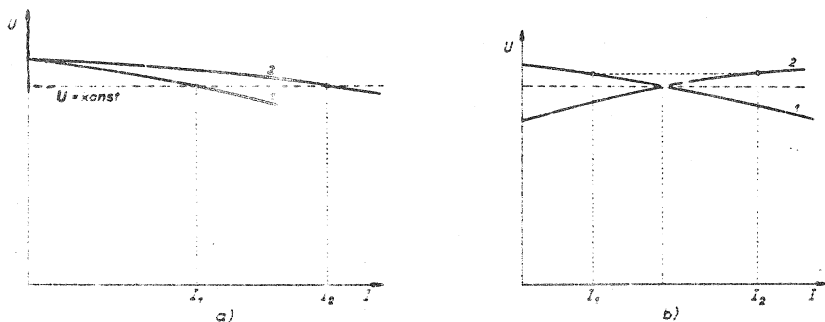
Karakteristike brzine vrtnje prikazuju se kaskada 1 kao



Sl.5-52

$n = f(M)$ ili $n = f(P_{\text{meh}})$, dakle u ovisnosti o momentu vrtnje ili snazi na osovini. Za mjerenje je najprikladnija varijabla struja I , a odavle se može izračunati M odnosno P_{meh} .

5.4.5 Paralelni rad. Paralelnim radom generatora nazivamo rad dvaju generatora povezanih na iste sabirnice. Pri tome je napon na stezaljkama obaju generatora jedan te isti. Ako vanjske karakteristike obaju generatora nisu jednake, struja opterećenja će se nejednako raspodijeliti na oba generatora (sl.5-53a). Opterećenja se mogu, doduše, izjednačiti korigiranjem uzbuđivanja jednog od strojeva, ali ako se opterećenje promijeni, nastat će opet nejednaka podjela. Osobito je nepovoljno,

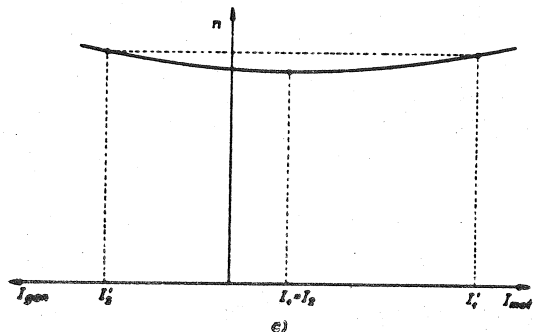
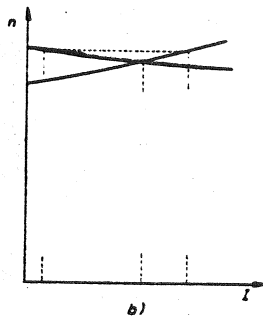
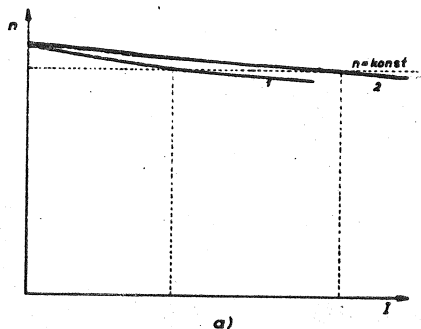


Sl. 5-53

ako jedan od generatora u paralelnom radu ima nestabilnu karakteristiku (sl.5-53b). Kod povećanog opterećenja ne samo da će se prirast opterećenja nejednako raspodijeliti, već će se "mekši" generator čak rasteretiti, a nestabilni generator će preuzeti dio njegovog tereta i čitav prirast. Pri tome može napon sabirnice porasti, pasti ili ostati nepromijenjen, prema tome, kakovi su nagibi obiju karakteristika.

Ako generatori nisu paralelno spojeni na stezaljkama, već na kraju voda, mogu njihove karakteristike biti nestabilne, a da im napon na kraju voda pada s opterećenjem. Zato u ovakovim slučajevima ne treba promatrati karakteristiku samog generatora, već generatora zajedno s vodom, prije nego sudimo o stabilnosti. Isto tako pogonski stroj, kojemu brzina vrtnje n nešto pada s opterećenjem, čini vanjku karakteristiku mekšom, pa to treba takodjer uzeti u obzir.

Kod paralelnog rada motora ovi su vezani mehanički i napajani iz iste mreže. Brzina vrtnje n mora im biti uvijek jednaka, ili vezana čvrstim odnosom. Kao i kod generatora, opterećenje će se nejednako raspodijeliti, ako karakteristike brzine vrtnje nisu jednake (sl.5-54a). Ako jedan od motora ima nestabilnu karakteristiku, on će težiti da preuzme veći dio optere-



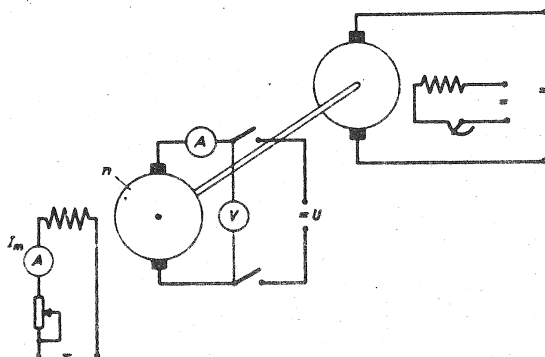
ćenja (sl.5-54b). Čak ako dva potpuno jednaka stroja s nestabilnim karakteristikama rade paralelno, može se dogoditi da isti ukupni teret umjesto s jednakim strujama $I_1 = I_2$ svladavaju s vrlo različitim strujama, pa čak tako da jedan radi kao motor s velikom strujom I_1' , i mehanički tjera drugi stroj, koji radi kao generator, također s velikom strujom I_2' . U ovakvom "povratnom radu" velik dio energije nepotrebno kruži kao mehanička snaga od motora generatoru, i kao električna snaga natrag od generatora motoru, te uzrokuje velike gubitke i pregrijavanje.

Nestabilna karakteristika onemogućuje rad motora i onda, kada sam tjera takav stroj, kojemu protumoment s povećanjem brzine vrtnje ne raste tako naglo kao moment motora. Dok je kod generatora katkada poželjan porast napona s opterećenjem - npr. za pokrivanje padova napona - kod motora nestabilna karakteristika nikad nije poželjna. Kako je izloženo u 5.3.2 i 5.3.3 potrebno je da četkice budu dobro ubrušene i ispravno postavljene u neutralnu zonu, da pomoćni polovi ne budu prejak, te često povrh toga da se karakteristika motora stabilizira dodatnim serijskim uzbuđnim zavojima, kompaundacijom. Veliki motori često zahtijevaju kompenzaciju reakcije armature, koja jedina može otkloniti djelovanje zasićenja u polnim nas-tavcima.

5.4.6 Karakteristike serijskog stroja. Kod serijskog motora postoji opasnost, da pobjegne na vrlo velike brzine vrtnje kod rasterećenja, jer istovremeno sa strujom opterećenja nestaje i uzbuda. Kako bi ispitivanje mogli provesti bez opasnosti, napajamo odvojeno serijski uzbuđni namot, a odvojeno armaturu, pa u toku ispitivanja udešavamo da obe struje budu jednake :

$$I_m = I \quad (1)$$

Pri tome možemo stroj tjerati kao generator ili kao motor, prema sl.5-55



Karakteristiku zasićenja neopterećenog stroja snimamo uz $n = \text{konst}$ najbolje tako, da stroj tjeramo kao generator s otvorenim stezaljkama, no možemo je snimiti i motorskim postupkom prema 5.2.1.

Umjesto karakteristike zasićenja pri opterećenju prema 5.4.1, gdje je svakoj struji opterećenja I odgovarala po jedna krivulja, ovdje od svake krivulje trebamo samo po jednu točku, tj. onu kod koje je $I = I_m$. Na taj način dobivamo krivulju, koja predstavlja ujedno i vanjsku karakteristiku uz $n_0 = \text{konst}$, jer je na apscisnoj osi veličina $I_m = I$:

$$U = f(I_m) = f(I) \quad (2)$$

Iz ove vanjske karakteristike lako je nacrtati unutarnju karakteristiku, ako računamo prema 5.4.2:

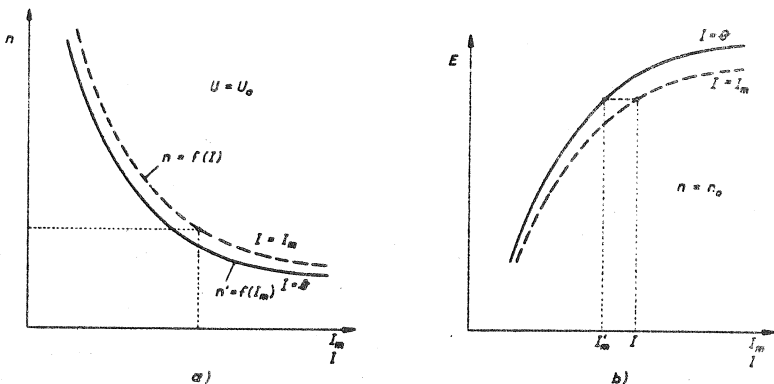
$$E = U \pm (IR + 2) \quad (3)$$

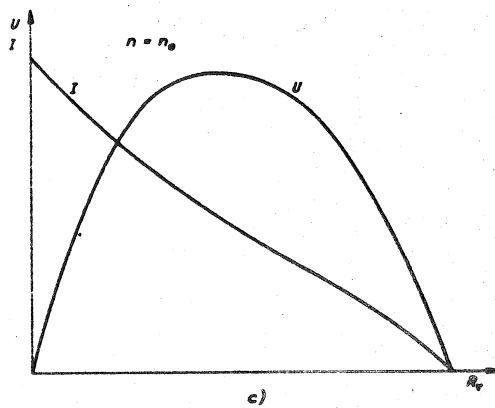
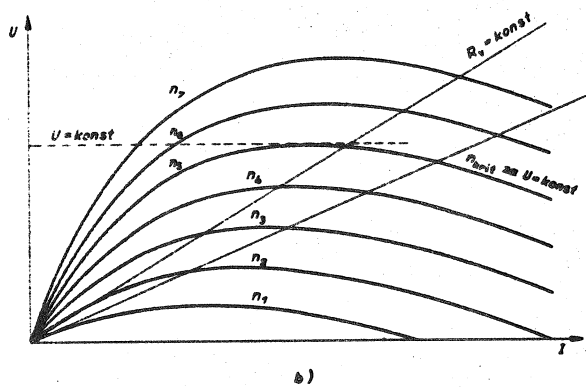
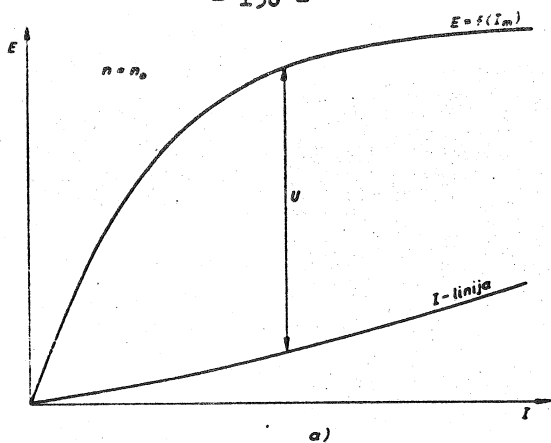
Tu istu karakteristiku možemo snimiti i motorskim postupkom, ako uz konstantan narinuti napon $U = U_0$ mjerimo prvo $n' = f(I_m)$ uz $I = 0$, a zatim $n = f(I_m)$ uz $I = I_m$, pri čemu su inducirani naponi:

$$E'_{(n_0)} = \frac{n_0}{n'} \cdot U_0 \quad (4)$$

$$E_{(n_0)} = \frac{n_0}{n} (U_0 - IR - 2) \quad (5)$$

Na sl.5-56(a) i (b) prikazane su karakteristike $n = f(I)$ uz $U = \text{konst}$, i $E = f(I_m)$ uz $n = \text{konst}$, za $I = 0$ i za $I = I_m$.





Karakteristika brzina vrtnje $n = f(I)$ najčešće je upotrebljavana karakteristika motora. Često se prikazuje i kao ovisnost $n = f(P_{\text{meh}})$ ili $n = f(M)$. Unutarnja karakteristika zajedno s karakteristikom praznog hoda pokazuje nam utjecaj reakcije armature : kod opterećenja strujom I magnetski tok će biti isti kao u praznom hodu pri uzbudu I'_m . Zelimoli npr. odrediti gubitke trenja i ventilacije i gubitke u željezu za stvarno pogonsko stanje kod opterećenja (vidi 5.2.1 i 5-21). onda s dijagrama prema sl.5-56a očitamo brzinu vrtnje n koja odgovara struji opterećenja I , a s dijagrama prema sl.5-56b nađemo uzbudnu struju I'_m pri $I = 0$, koja daje isti tok kao uzbudna struja $I_m = I'_m$ pri opterećenju. S dijagrama prema sl.5-21b očitamo onda gubitke u praznom hodu P'_0 za brzinu n i uzбудu I'_m .

Serijski generator rjeđe susrećemo, ali se ipak generatori li rad pojavljuje pri kočenju serijskog motora. Kako se vidi na sl.5-57a, pri $n = n_0$ dobivamo karakteristiku $U = f(I)$ pomoću I -linije, no možemo je direktno snimiti u generatorskom radu prema sl.5-55. Ako snimimo ovu karakteristiku pri različitim brzinama $n = \text{konst}$, dobivamo sliku 5-57b. Kočenje se može provoditi na mrežu konstantnog napona U do neke kritične brzine n_{krit} . Obično serijski generator radi na vanjski otpor R_v , koji se može predstaviti pravcem iz ishodišta u dijagramu $U = f(I)$. S rastućim otporom struja pada, a napon prvo raste, pa onda pada, dok kod određene vrijednosti otpora oboje ne padne na nulu (sl.5-57c). Ovakav dijagram može se nacrtati zasebno za pojedine vrijednosti brzine vrtnje.

5.4.7 Karakteristika momenta. Zakretni moment istosmjernog struja dobivamo iz mehaničke snage na osovinu i brzine vrtnje kao :

$$M_{os} = \frac{P_{\text{meh}}}{\omega} = \frac{P_{\text{meh}}}{n} \cdot \frac{60}{2\pi} \quad (1)$$

Ovaj moment na osovinu kod generatora je veći, a kod motora manji od razvijenog momenta u rasporu stroja za iznos momenta trenja i ventilacije, i momenta koji je potreban za pokrivanje gubitaka u željezu:

$$M_{os} = M + M_{\text{gub}} \quad (2)$$

$$M = M_{os} - M_{\text{gub}} \quad (\text{za generator}) \quad (3)$$

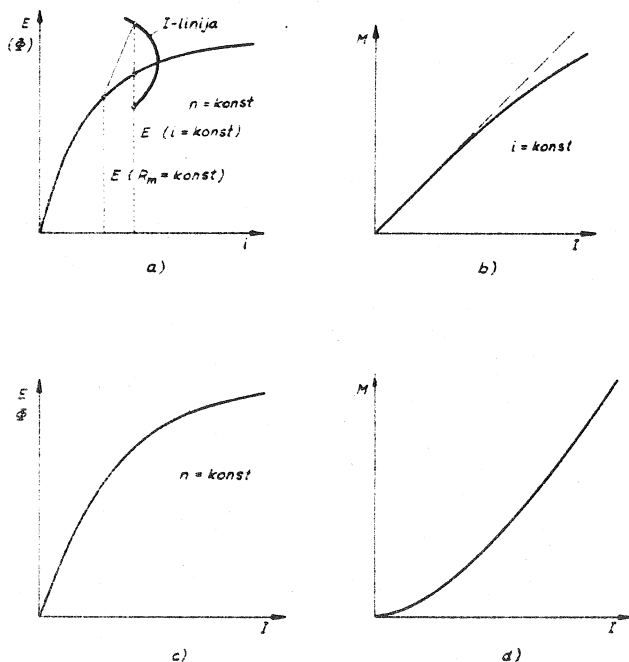
$$M = M_{os} + M_{\text{gub}} \quad (\text{za motor}) \quad (4)$$

Razvijeni moment M možemo izračunati iz snage koja se u magnetskom polju u rasporu pretvara iz mehaničke u električku, ili iz električke u mehaničku :

$$M = \frac{EI}{\omega} = \frac{E}{n} \cdot I \cdot \frac{60}{2\pi} = k \cdot \phi \cdot I \quad (5)$$

Korekcija zbog gubitaka M_{sub} relativno je mala, pa se često promatra karakteristika razvijenog momenta M umjesto momenta na osovini.

Uz konstantnu uzбудnu struju na prvi pogled se čini, da bi zakretni moment morao rasti linearno sa strujom. Zbog reakcije armature smanjivat će se tok ϕ s porastom struje opterećenja, kao što se to vidi na sl.5-58a, pa će moment biti niži od vrijednosti, koju bi dobili preračunavanjem proporcionalno struji I (sl.5-58b).



Sl. 5-58

Kod samouzbuđenog generatora protumoment će još padati ispod pravca koji bi vrijedio za $\phi = \text{konst}$, jer se inducirani napon još više smanjuje uz $R_m = \text{konst}$, nego uz $i = \text{konst}$ (sl.5-58a). Poredni motor na mreži konstantnog napona radi, dakako, uz $i = \text{konst}$.

Serijski motor povećava tok ϕ sa strujom opterećenja (sl.5-58c), pa će moment rasti po krivulji poput one na sl. 5-58 d.

Moment u ovisnosti o struji I lako je izračunati, ako kod različitih struja I izmjerimo napon U i brzinu vrtnje n .

Kod generatora bit će :

$$E = U + IR + 2 \quad (6)$$

a kod motora :

$$E = U - IR - 2 \quad (7)$$

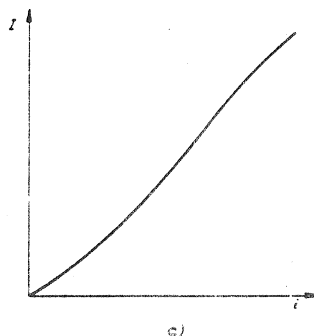
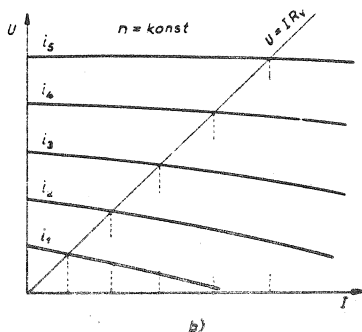
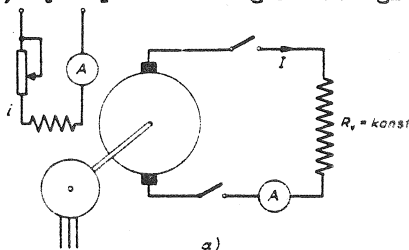
pa se iz podataka E , n , I može odrediti moment prema izrazu (5) .

Poteškoća nastaje kod poteznog momenta, gdje je brzina $n = 0$ i inducirani napon $E = 0$, tako da je njihov kvocijent u izrazu (5) neodređen. Ako se sjetimo, da taj kvocijent predstavlja u odredjenom mjerilu tck ϕ , onda ga možemo lako odrediti pri bilo kojoj brzini n_0 , kod koje je inducirani napon E_0 . Potrebno je samo da uzbudna struja i struja opterećenja, tj. reakcija armature, budu iste, pa vrijedi :

$$\frac{E}{n} = \frac{E_0}{n_0} = k \cdot \phi \quad (8)$$

Za odredjivanje momenta motora dok miruje možemo se dakle poslužiti bilo kojim parom vrijednosti E_0 , n_0 pri vrtnji, uz istu uzбудu i istu struju opterećenja.

5.4.8 Karakteristika uzбудnika. Kod uzbudnika brzina vrtnje je konstantna, a isto tako konstantan je vanjski otpor na koji uzбудnik radi, tj. otpor uzbudnog namota glavnog stroja ,



npr. sinhronog generatora, na koji je uzбудnik direktno priključen (sl.5-59a). Regulacija struje I vrši se u uzbudnom krugu uzbudnika, promjenom struje i . Karakteristika koja je bitna za određivanje podataka za regulaciju bit će prema tome :

$$I = f(i), \quad R_v = \text{konst}, \quad n = \text{konst}$$

Budući da je napon na stezaljkama proporcionalan struji :

$$U = I \cdot R_v \quad (1)$$

može se gornja karakteristika dobit iz vanjskih karakteristika $U = f(I)$, snimljenih pri različitim uzbudnim strujama i (vidi 5.4.2). Grupa takvih krivulja prikazana je na slici 5-59b. Ako unesemo pravac vanjskog otpora $U = I \cdot R_v$, možemo na sjecištima s pripadnim krivuljama $i = \text{konst}$ odrediti struju uzbudnika I , koja odgovara uzbudnoj struji i , i konstruirati karakteristiku prema sl.5-59c.

Najjednostavnije je direktno mjerenje karakteristike prema sl.5-59a. Kao opterećenje, umjesto glavnog uzbudnog namota, koji ima vrlo velik induktivitet, povoljnije je upotrebiti nadomjesni otpornik bez induktiviteta, kako bi u slučaju nestabilnog ponašanja ili drugih smetnji mogli lakše prekinuti strujni krug.

5.4.9 Dinamičke karakteristike. Sve do sada opisane karakteristike prikazuju međusobnu ovisnost dviju karakterističnih veličina stroja u stacionarnom stanju. Istosmjerni strojevi mnogo se upotrebljavaju za regulacione procese, pa je često važno poznavati dinamičke karakteristike, tj. ponašanje za vrijeme prelaznih pojava. Karakteristične veličine snimamo oscilografom ili brzim registracionim instrumentom kao funkcije vremena.

Prelaz na novo pogonsko stanje redovito se ne može izvršiti odjednom. Ako novo pogonsko stanje zahtijeva drugačije magnetske tokove, promjena tih tokova inducira napone i struje, pa je prijelaz otegnut zbog induktiviteta u strujnim krugovima. Slično, ako se mora promijeniti brzina stroja, ta promjena zahtijeva ubrzanje kroz određeno vrijeme, tj. zamašne mase otežu prelaznu pojavu.

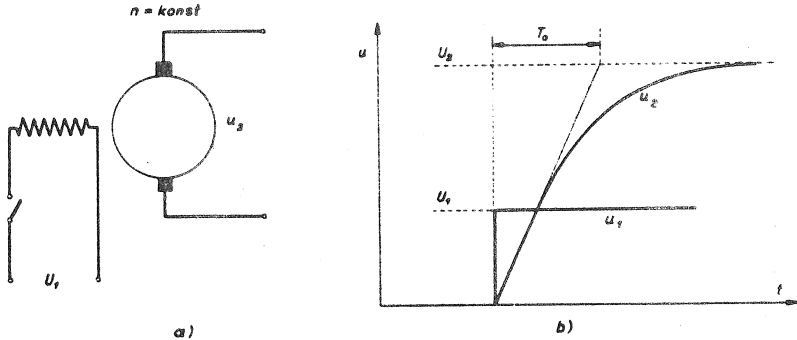
Ako npr. na uzbudni namot generatora, koji se vrti konstantnom brzinom, narinemo napon U_1 (sl.5-60), napon na stezaljkama će rasti po eksponencijalnom zakonu :

$$u = k \cdot \phi = k_1 \cdot i_1 = k_2 \cdot \frac{U_1}{R_v} (1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (1)$$

jer po tom zakonu raste primarna struja i_1 i tok ϕ .
Vremenska konstanta :

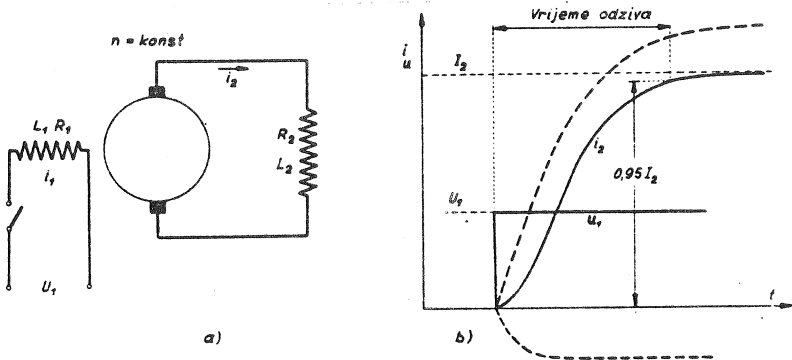
$$T_0 = \frac{L}{R} \quad (2)$$

karakterizira ovu prelaznu pojavu (sl.5-60b), a možemo je očitati sa snimljene dinamičke karakteristike $u_2 = f(t)$.



Sl. 5-60

Razmotrimo li struju i_2 (sl.5-61) kod naglo narinutog napona na uzbudni krug otpora R_1 i induktiviteta L_1 , bit će, uz otpor i induktivitet glavnog kruga R_2 i L_2 ,



Sl. 5-61

u transformiranom području:

$$\frac{U_2}{p} = i_1 (R_1 + pL_1) \quad (3)$$

$$u_2 = k \cdot \phi = k_1 i_1 = k_1 \frac{U_1}{p} \cdot \frac{1}{R_1 + pL_1} \quad (4)$$

$$i_2 = \frac{u_2}{R_2 + pL_2} = k_1 \cdot \frac{U_1}{p} \cdot \frac{1}{(R_1 + pL_1)(R_2 + pL_2)} \quad (5)$$

što daje u originalnom području, uz $T_1 = \frac{L_1}{R_1}$ i $T_2 = \frac{L_2}{R_2}$:

$$i_2 = \frac{k_1 U_1}{R_1 R_2 (T_1 - T_2)} \left[T_1 (1 - e^{-\frac{t}{T_1}}) - T_2 (1 - e^{-\frac{t}{T_2}}) \right] \quad (6)$$

Karakteristika koja prikazuje promatranu izlaznu veličinu (u ovom slučaju i_2) u ovisnosti o vremenu naziva se prelažnom funkcijom. Ovdje prelazna funkcija nije više jednostavan eksponencijalni izraz, pa se ne može govoriti o vremenskoj konstanti prelazne funkcije. Umjesto toga može se definirati "vrijeme odziva" kao vrijeme potrebno da bi izlazna veličina dosegla 95 % svoje konačne vrijednosti, računajući od časa kad je naglo priključena ulazna veličina. Kod jednostavne eksponencijalne funkcije vrijeme odziva će očito biti :

$$T_{odz} = T_0 \cdot \ln \frac{1}{0,05} \cong 3 T_0 \quad (7)$$

Kod uzбудnika često se govori o "brzini uzbuđe", koja slijedi iz dinamičke karakteristike napona na stezaljkama kad naglo kratko spojimo regulacioni otpornik, kako je opisano u 3.5.1 (sl.3-59).

Kod motora promatramo brzinu vrtnje kao izlaznu veličinu kod promjena različitih ulaznih veličina, no isto tako možemo snimati i dinamičku karakteristiku struje. Brzinu vrtnje obično snimamo pomoću tahogeneratora, kojemu je napon proporcionalan brzini vrtnje. Ako npr. promatramo zalet motora u Leonard-agregatu prema sl.5-62, bit će napon generatora u_2 određen izrazom (4). Struja i_2 ovisiti će o razlici napona u_2 i induciranog protunapona motora e_2 :

$$i_2 = \frac{u_2 - e_2}{R_2 + pL_2} \quad (8)$$

Protunapon ovisi, uz konstantan tok ϕ_2 , o brzini vrtnje :

$$e_2 = k_2 \cdot n \quad (9)$$

Moment koji ubrzava motor proporcionalan je struji i_2 :

$$M = L \cdot i \quad (10)$$

a u drugu ruku ubrzanje motora proporcionalno je momentu :

$$\frac{mD^2}{4} \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{mD^2}{4} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot \frac{dn}{dt} = M = k_s \cdot \phi_2 \cdot i_2 \quad (11)$$

Napišimo to u transformiranom području, i uvrstimo (4), (8) i (9), pa izlazi:

$$\frac{mD^2}{4} \cdot \frac{2\pi}{60} \cdot p \cdot n = k_s \cdot \phi_2 \cdot \frac{1}{R_2 + pL_2} \cdot (k_1 \cdot \frac{U_1}{p} \cdot \frac{1}{R_1 + pL_1} - k_2 n) \quad (12)$$

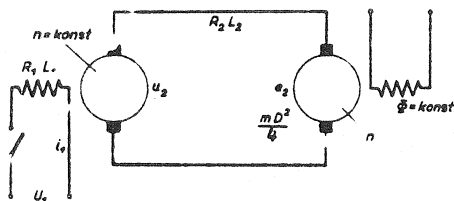
ili ako skupimo konstante i označimo ih sa K , K_0 , K_1 i K_2

$$n = K \cdot \frac{U_1}{p} \cdot \frac{1}{p^2 + K_2 p^2 + K_1 p + K_0} \quad (13)$$

Izlazi dakle u nazivniku jednačba trećeg reda. Rješenje u originalnom području glasi:

$$n = A(1 - E^{-p_1 t}) + B(1 - E^{-p_2 t}) + C(1 - E^{-p_3 t}) \quad (14)$$

gdje koeficijenti A , B , C mogu biti pozitivni ili negativni realni brojevi, a p_1 , p_2 i p_3 su porijetni nazivnika u izrazu (13). Ako su ti koeficijenti pozitivni realni brojevi, prelazna pojava će proteći aperioidički. Ako su brojevi kompleksni (realni član će ovdje uvijek biti pozitivan), doći će do prigušenog titranja prije nego što se uspostavi stacionarno stanje. Ovakva komplicirana prelazna funkcija može se vrlo lako



Sl. 5-62

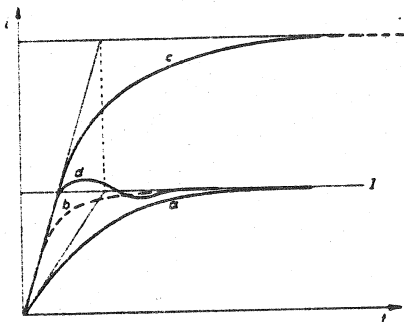
smisliti. No često smo prisiljeni, pri projektiranju regulacionih uređaja, računati ukupnu prelaznu funkciju iz konstanta pojedinih strojeva i strujnih krugova. Ako u gornjem slučaju izmjerimo otpor i vremensku konstantu uzbuđenog i glavnog strujnog kruga, zatim odnos uzbuđne struje i napona generatora u stacionarnom stanju, te struje i momenta motora, i brzine i napona motora, uz poznato m^2 motora imamo sve elemente da proračunamo prelaznu funkciju.

Očito je, da će vrijeme odziva biti to kraće, što su manje pojedine vremenske konstante. Pojedine magnetske tokove ne možemo smanjiti, ali možemo povećati otpore i povišiti napone, kako bi uz veće otpore postigli iste struje. Gubici energije će biti manji, ako bez umjetno povećanog otpora narinemo znat

no povećani napon, pa djelovanjem automatskog regulatora taj napon smanjimo, čim je izlazna veličina dovoljno porasla. Na sl. 5-63 struja bi npr. rasla po krivulji (a). Porast bi ubrzali povećanjem otpora (ali i napona) po krivulji (b). Povećanjem napona bez povećanja otpora dobili bi krivulju (c), ali bi sada bilo nepotrebno, da automatski regulator na vrijeme intervenira, i zadrži struju na traženoj konačnoj vrijednosti I (krivulja d). Izvor napona mora dakle imati dovoljno visok "plafon" za postizavanje brzine regulacije. Zbog toga su i uzbudnici redovito vrlo obilno dimenzionirani u pogledu napona. Najveću nepriliku kod postizavanja što kraćih vremenskih konstanti predstavljaju vrtložne struje u željezu magnetskog kruga. One predstavljaju sekundarni kratko spojeni krug vrlo malog otpora, koji obuhvaća isti tok ϕ . Vremenska konstanta mu je velika, a kako je izvedeno u 2.4.2, vremenska konstanta uzbuđenog namota povećava se za vremensku konstantu sekundarnog namota, ako oba obuhvaćaju isti tok :

$$T_k \cong T_1 + T_2 \quad (15)$$

Koliko god smanjili T_1 , ne možemo time utjecati na T_2 , pa i ukupna vremenska konstanta T ostaje velika. Zbog toga se kod strojeva za regulacione svrhe magnetski krug izvodi lamelirano.



5-63

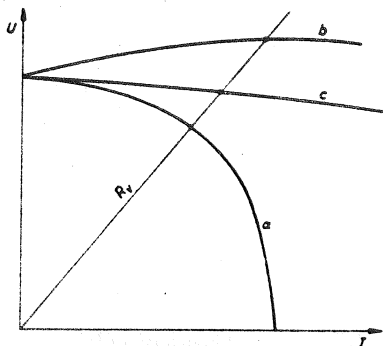
Utjecaj magnetske tromosti uzrokovati će sasvim drugačije odnose između veličina snimljenih dinamički, nego što su odnosi u stacionarnom pogonu. Ako je npr. motor protukompaundiran tako da brzina vrtnje ostaje kod opterećenja konstantna, kod naglog opterećenja tok se ne će naglo smanjiti, unatoč amperzavojima serijskog namota, već će vrtložne struje

održati konstantan tok, dok ne iščezne vremenskom konstantom vrtložnih struja T_2 . Povećano opterećenje traži u prvom času manji inducirani protunapon, kako bi struja mogla porasti, pa će uz nepromijenjeni tok brzina vrtnje naglo pasti, i tek se postepeno vratiti na stacionarnu vrijednost. Slično će i kod porednog motora udarac opterećenja tek nakon nekog vremena dovesti do slabljenja toka uslijed reakcije armature, a u međuvremenu će se brzina vrtnje smanjiti za relativni iznos :

$$\frac{\Delta n}{n} = \frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta I \cdot R}{E} \quad (16)$$

jer je tok ostao konstantan. Posve slično kod generatora kompaunda ili protukompaundacija ne će odmah djelovati kod udaraca opterećenja, već će napon u prvi mah pasti za iznos IR . Ako npr. naglo priključimo vanjski otpor R_v na generator s karakte-

ristikom (a) (sl.5-64), prvo će se napon uspostaviti u sjecištu pravca R_v s karakteristikom (c), pa će tek postepeno pasti na karakteristiku (a). U slučaju kompaundacije isto tako će tek postepeno prijeći s karakteristike (c) na oru (b). Pogotovo će



Sl.5-64

tromo reagirati na promjene opterećenja serijski namoti, koji su premošteni shuntovima čisto radnog otpora u svrhu adjustiranja.

5.4.10 Preopteretivost. Prema IEC preporukama svaki istosmjerni generator mora biti sposoban da izdrži kroz 15 sekundi opterećenje strujom 50 % iznad nazivne, uz napon što bli-

ži nazivnome. Nije nužno da se napon tačno održi. Isto tako svaki istosmjerni motor mora biti sposoban da izdrži kroz 15 sekundi opterećenje momentom 50 % većim od nazivnog uz nazivni napon mreže. Ova preopteretivost mora se demonstrirati pokusom.

5.5 Komutacija

Problemi i teškoće u vezi s komutacijom predstavljaju najslabiju stranu kolektorskih strojeva. Pri ispitivanju je potrebno provjeriti ispravnost komutacije, a vrlo često je zadatak ispitne stanice da dotjera stroj u pogledu komutacije. Loša komutacija očituje se u znatnom iskrenju kod opterećenja ili kod manjih preopterećenja. U koliko iskrenje ne ostavlja štetnih posljedica na kolektoru, a ne da se otkloniti normalnim sredstvima, može se komutacija smatrati prihvatljivom. No jake iskre, pogotovo povezane s pucketanjem ili protegnute na znatniji dio kolektora, sigurno će dovesti do trajnog oštećenja kolektora, koje će samo još pogoršati i onako lošu komutaciju. Čak i kad ne bi bilo opasnosti od kružne vatre na kolektoru, koja može značiti potpun kratki spoj i uništiti kolektor, bit će potrebno brušenje kolektora u kratkim vremenskim razmacima, a to znači istrošenje. Ne treba, međutim, tamnu sjajnu boju kolektora u pogonu smatrati oštećenjem ili je čistiti. Tamna politura štiti kolektor od trošenja. U slučaju loše komutacije treba ispitati sve mehaničke i električke okolnosti, koje bi tome mogle biti uzrok i poduzeti mjere da ih otklonimo. Kod osobito teških zahtjeva na stroj katkada je nemoguće potpuno izbjeći iskrenje. U tom slučaju smatrati ćemo, u smislu pro-

pisa, komutacija ispravnom, ako kolektor umetio iskrenju ostaje sposoban za pogon. Ispitivanje komutacije treba izvršiti pri nazivnoj brzini vrtnje i pri nazivnoj struji, te pri struji preopterećenja koju u pogonu predviđamo. Kod manjih strojeva ispitujemo pri punom naponu, a kod velikih strojeva u kratkom spoju. Propisano je, da se komutacija ispituje na toplom stroju, nakon pokusa zagrijavanja.

5.5.1 Mehaničke greške. Mnogobrojne mehaničke greške dovode do loše komutacije i oštećenja kolektora, što dalje pogoršava komutaciju. Često je teško razlučiti uzroke od posljedica i otkloniti izvornu grešku.

Vibracije četkica mogu potjecati od različitih uzroka. Neokrugli kolektor, pogotovo ako brzina vrtnje leži u blizini frekvencije titrajnog sistema, koji predstavlja masa četkice s perom, dovodi do pomicanja četkica u kutiji držača, koje se može i izmjeriti, ako ticalo indikatora prislonimo radijalno na četkicu, a kolektor polako okrećemo. Često se može osjetiti vibracije i prislanjenjem prsta na četkicu neuzbudjenog stroja koji se vrti.

Slične smetnje mogu potjecati i od prevelike zračnosti u istrošenim ležajima, uslijed koje se osovinu, "valja" u ležaju, i os kolektora putuje po kružnoj putanji.

Hrapavost kolektora zbog nedovoljne ubrušenosti ili loše komutacije takodjer može dovesti do neugodnih vibracija četkica. Slične vibracije uslijed trenja četkica na kolektoru mogu se pojaviti i na dobro ubrušenom kolektoru, osobito ako četkice ne vode struju. One su osobito jake kad dodje do rezonancije, a to je katkada slučaj kod određene istrošenosti, uslijed koje je masa četkica smanjena, ili kod nesretnog izbora držača i četkica. Ovakove vibracije mogu čak dovesti i do lomova četkica ili priključaka.

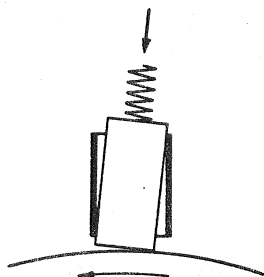
Titranje svornika držača takodjer uzrokuje vibracije četkica. Bez obzira na izvor vibracija, posljedica je ta, da se pritisak četkica mijenja, i kvaliteta komutacije pogoršava. Često se na kolektoru i na četkici nalaze svjetlije i tamnije pruge. U najgorem slučaju dolazi čak do odsakivanja četkica od kolektora, što stvara luk i dovodi do pocrnjenja kolektora po čitavom obodu ili u pravilnim razmacima.

Osobito će biti oštra zacrnjenja kolektora, ako tinjac na pojedinim mjestima strši između lamela, pa četkica odsakuje. Tinjac treba u tom slučaju dobro istrugati u dubini od cca 0,5 do 1 mm.

Česta greška na držačima je neparalelni položaj, bilo da je svornik držača priklonjen kolektoru ili od njega, bilo da nije paralelan s rubom lamele kolektora. To možemo provjeriti

tako, da dovedemo rub lamele do ruba četkica istog svornika, odnosno da mjerimo udaljenost oba kraja svornika od kolektora.

Pretijesna ili prelabava kutija držača dovodi do zastoja četkice, bilo da se zaglavi u pretijesnoj kutiji (pogotovo ako se pregrijava!), bilo da se nagne i uklješti u preobilnoj kutiji (sl.5-65).



SL.5-65

Preveliki ili premali pritisak četkice štetno djeluje na komutaciju. Povećano trenje i preveliko trošenje stvara ugljenu prašinu među lamelama i zagrijava četkice, a premali pritisak povećava prelazni otpor. Potrebni pritisak ovisi o kvaliteti četkica, i obično se kreće od $150 - 250 \text{ g/cm}^2$. Propisani pritisak, ukoliko nije konstrukcija držača takova, da se ne može ni udešavati ni promijeniti u pogonu, kontroliramo pernom vagom, kojom povlačimo četku tako dugo, dok traku papira izmedju četkice i kolektora ne uzmognemo lako izvući. Prema potrebi pritisak uskladimo s podacima proizvođača.

Korak četkica može takodjer biti pogrešan, bilo zbog greške pri izradi nosača četkica, bilo zbog sušenja izolacije, kojom su učvršćeni svornici ili sličnog. Kontrolu vršimo tako, da oko kolektora ovijemo traku papira, tako da četkice leže na njoj, i oštrom olovkom zacrtamo svagdje prednji rub četkice na papiru. Razlike izmedju koraka ne bi trebale prekoračiti širinu izolacije izmedju kolektorskih lamela.

5.5.2 Električke greške. Od električkih uzroka loše komutacije treba razmotriti utjecaj pomoćnih polova, smetnje u vezi s četkicama i greške na namotu.

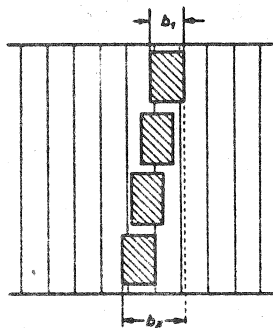
Provjeravanje ispravnog smisla namatanja i ispravnog spoja pomoćnih polova razmatrano je u 5.1.2 i 5.1.4. Ako je polaritet pomoćnih polova ispravan, može se ipak dogoditi, da je djelovanje pomoćnih polova prejako ili preslabo, pa da je komutacija uslijed toga loša. Izmedju pomoćnih polova i jarma statora podmetnuti su ulošci od limova, dijelom od magnetskog, a dijelom od nemagnetskog materijala. Uz uvijek isti ukupni broj podložnih limova bit će pol jednako udaljen od rotora, pa će i raspodjela silnica biti ista. Ako zamijenimo nemagnetske limove magnetskim, biti će magnetski otpor manji, tj. smanjili smo put silnica kroz "zrak", i obratno, stavljanjem većeg broja nemagnetskih limova na račun magnetskih povećali smo "zračni raspor". Na taj način može se pojačati ili oslabiti djelovanje pomoćnih polova, te postići dobra komutacija. O ovom udešavanju

pomoćnih polova bit će detaljnije govora u 5.5.5.

Položaj četkica van neutralne zone dovodi do komutacije u području gdje nema utjecaja pomoćnih polova, ili čak pod utjecajem polja glavnih polova. Prije udešavanja pomoćnih polova bezuvjetno treba postaviti četkice u neutralnu zonu prema 5.1.5. Ukoliko četkice nisu pri tome bile dobro ubruse, nakon što se u pogonu ubruse, njihova os više ne će biti u neutralnoj zoni, pa se komutacija može pokvariti (vidi sl.5-17).

Kvaliteta četkice često bitno utječe na komutaciju. Kod teže komutacije potrebno je izvršiti pokuse s različitim kvalitetama, da bi se odredila najprikladnija, i onda se pridržavati iste vrste kod kasnijih zamjena u pogonu. Osobito je važno, da ne budu u radu na istom stroju nejednake četkice. Zato nije dopušteno mijenjati pojedine četkice, već treba kod zamjene izmijeniti sve. Ako to nije moguće, onda treba u najmanju ruku sve četkice (+) - polariteta uzeti od jedne vrste, a (-) - polariteta od druge vrste. Nejednake četkice u paralelnom radu uzrokuju nejednaku raspodjelu struja, a veća struja dovodi do povišenog zagrijavanja, i time do još većeg opterećenja jače zagrijane četkice, uslijed negativnog temperaturnog koeficijenta ugljena.

Lošu komutaciju katkada možemo popraviti povećanjem prekrivanja četkica tako da četkice istog svornika tangencijalno razmaknemo po obođu (sl.5-66). Time produžujemo komutaciju i smanjujemo napon samoindukcije. Ovo razmicanje ne smije biti preveliko, jer kod prevelikog prekrivanja prijeti opasnost, da svitak u toku komutacije dospje van područja djelovanja pomoćnog pola, ili čak u područje glavnog pola.



Sl.5-66

Od defekata namota treba spomenuti spoj među zavojima, ili dvostruki spoj s masom, što daje isti efekt. Posljedica je jako iskrenje i brzo pocrnjivanje lamela, a vrlo brzo strada i namot. Sličan je efekt i spoja među lamelama. Ovaj se može lako otkloniti, ako je uzrokovan prašinom od četkica koja je dospjela među lamele. Otkrivanje ovakvih kvarova opisano je u 5.1.1.

Loš spoj namota na lamelu često nastaje uslijed lošeg lemljenja, pucanja lemljenog spoja, ili pucanja

zastavica, koje vežu štapove namota s lamelama kolektora (vidi 5.1.1). Lamela na kojima se struja zbog tog kvara prekida, brzo pocrne. Ako prekid nije potpun, defektno mjesto je mnogo teže pronaći, pa je često potrebno nanovo lemiti sve spojeve.

Slična poteškoća nastaje i kod neispravnih ekvipotencijalnih veza, koje kod neizbježivih magnetskih nesimetrija izazivaju zatvaranje struja izjednačenja preko četkica. Obično dolazi do pocrnjivanja lamela u razmaku polnog koraka po obodu. Ako pregled ništa ne otkrije, treba sve spojeve lemiti nanovo.

Bandaže od magnetskog materijala na rotoru mogu u tolikoj mjeri povećati samoinduktivitet svitaka, da se ne može postići dobra komutacija. Malim permanentnim magnetom lako je ustanoviti magnetskošću bandažu, pa ih je u takvom slučaju potrebno zamijeniti nemagnetskim materijalom.

5.5.3 Krivulja napona četkice. Struja u svitku, koji je kratko spojen za vrijeme komutacije, mora se promijeniti od vrijednosti $+I_{gr}$ na vrijednost $-I_{gr}$, gdje je I_{gr} struja grane armature. Za to je na raspolaganju vrijeme:

$$T = K \cdot \frac{b}{v} = K \cdot T_1 \quad (1)$$

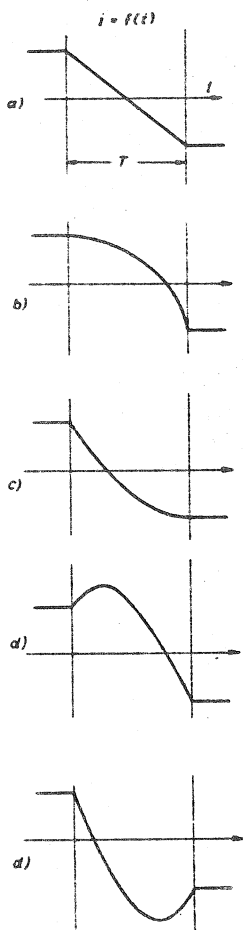
gdje je :

$$T_1 = \frac{b}{v} \quad (2)$$

vrijeme prolaza jedne lamele širine b pri obodnoj brzini v uz čvrstu tačku četkice, a $K = b_c/b$ = prekrivanje četkice, tj. omjer širine četkice prema koraku lamela. Kako će izgledati krivulja struje i u svitku koji komutira, to ovisi o otporu svitka, četkice i prijelaza, o induktivitetu svitka i o polju u komutacionoj zoni. Ako odaberemo pet karakterističnih slučajeva, možemo komutaciju obzirom na struju i označiti prema sl.5-67 jednim od slijedećih naziva: a) linearna komutacija, b) podkomutacija, c) nadkomutacija, d) jaka podkomutacija, i e) jaka nadkomutacije. Idealan je slučaj linearne komutacije. U slučaju podkomutacije promjena struje nešto je zavučena zbog induktiviteta, a u slučaju nadkomutacije djelovanje pomoćnih polova forsira bržu promjena struje od linearne. Obrnuto spojeni pomoćni polovi dovode do jake podkomutacije, a mnogo prejak pomoćni polovi do jake nadkomutacije.

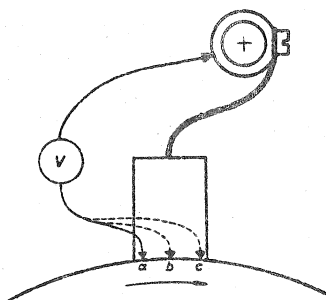
Uočavanjem pomoćnih polova možemo utjecati na krivulju komutacije $i = f(t)$, pa je zato interesantno odrediti karakter te krivulje mjerenjem. Oscilografsko snimanje zahtijevalo bi izvod krajeva svitka na klizne kolute, što obično nije provedivo. Pože se, međutim, dosta pouzdano zaključiti, o kojemu od navedenih slučajeva komutacije se radi, ako mjerimo "krivulju napona četkice" prema sl.5-68. Voltmetrom za istosmjerni napon 1,5 do 2 V mjerimo pad napona od svornika držača do površine kolektora, i to radimo u tački (a) kraj prednjeg ruba četkice, (b) kraj sredine četkice, i (c) kraj

stražnjeg ruba četkice. Tačke (a), (b), (c) slijede jedna za drugom uvijek u smjeru vrtnje. Pri tome na (+) svornik stavljamo kod generatora (-) - pol voltmetra, a kod motora (+) - pol ; na (-) - svornik obratno. Dobivene 3 vrijednosti napona nanesemo iznad širine četkice kao apscise. Karakter dobivene krivulje ukazuje na karakter krivulje komutacije, što pokazuje slijedeće razmatranje.



Sl. 5-67

Označimo prema sl. 5-69 svitke redom sa A, B, C ..., tako da je svitak



Sl. 5-68

A izveden na lamela 0 - 1, svitak B na 1 - 2, C na 2 - 3 itd. Ako označimo ukupnu struju četkice sa I , onda je struja u svitcima prije komutacije $\frac{I}{2}$, a poslije komutacije $-\frac{I}{2}$. Struja svake lamelice može se prikazati kao

$$\begin{aligned} i_1 &= i_B - i_A \\ i_2 &= i_C - i_B \\ i_3 &= i_D - i_C \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3)$$

U času kad prednji rub lamela 1 dodje do ruba (a) četkice, počinje komutacija svitka A. Komutacija svitka B počinje za vrijeme T_1 kasnije, itd., a trajanje komutacije svakog svitka je T - vidi (1) i (2).

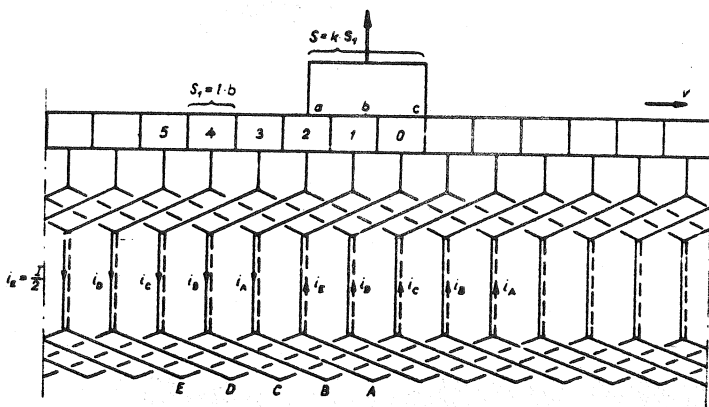
Ako razmotrimo, kako se mijenja gustoća struje na lameli 1 dok prolazi ispod četkice, znati ćemo i što se dalje događa,

jer se ista slika ponavlja i kod prolaza lamela 2, 3 itd. Pretpostavimo da se struja lamele jednako raspodijeli po presjeku, pa možemo gustoću struje računati kao :

$$\Gamma(t) = \frac{i_q(t)}{S(t)} \quad (4)$$

gdje $S(t)$ predstavlja dodirnu površinu između lamele 1 i četkice u ovisnosti o vremenu.

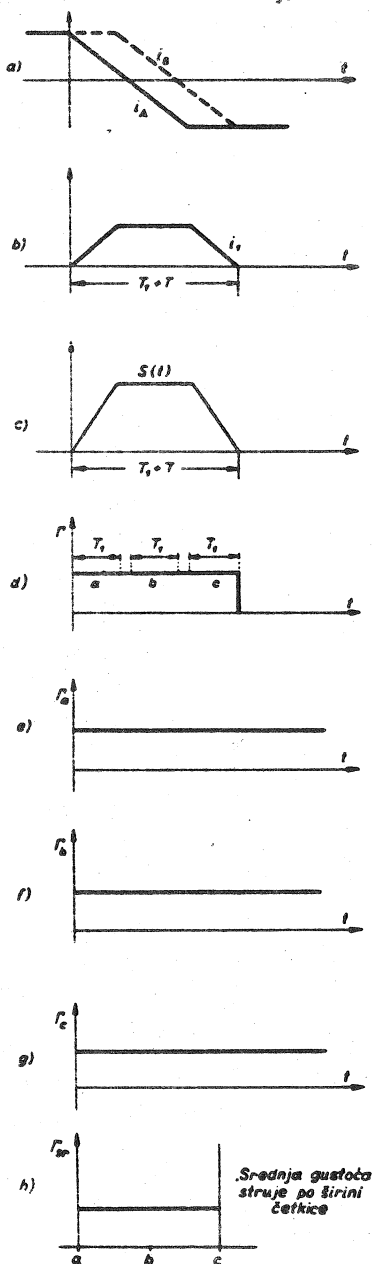
Razmotrimo prvo slučaj linearne komutacije prema sl.5-70.



Sl. 5-69

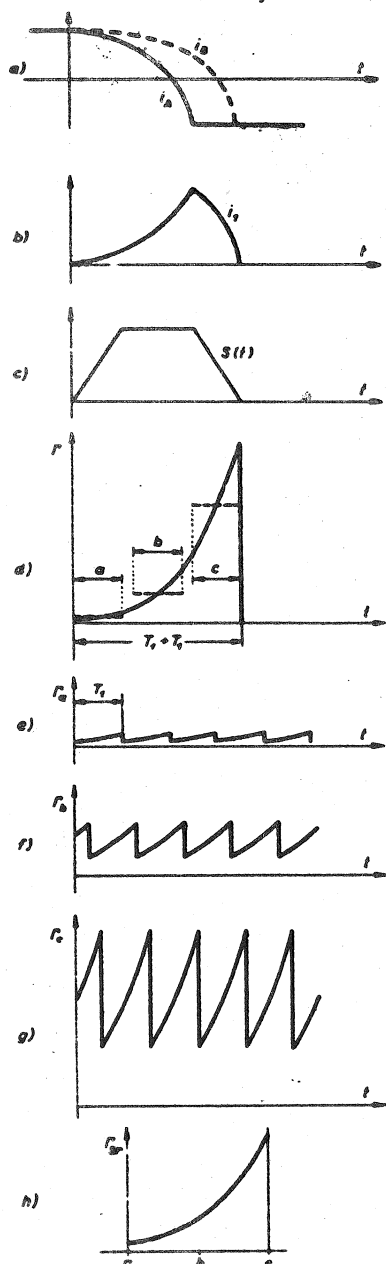
Struje svitaka i_A i i_B vide se na sl. (a). Slika (b) prikazuje struju lamele 1 prema izrazu (3). Dodirna površina $S(t)$ prikazana je na slici (c), a iz toga slijedi gustoća struje $\Gamma(t)$ na slici (d). Prislavimo li grafitni šiljak s priključkom voltmetra na kolektor uz prednji rub četkice, na instrument će djelovati kroz vrijeme T_1 napon koji ovisi o gustoći struje na lameli 1, a zatim isto takav napon na lameli 2, 3 itd. Napon je ovisan o gustoći struje, koja se periodički ponavlja u intervalu T_1 . Gustoća struje pod prednjim rubom četkica Γ_a predstavlja periodičko ponavljanje odsječaka krivulje $\Gamma(t)$ označenog sa a na slici (d), a isto tako pod sredinom četkice Γ_b predstavlja ponavljanje odsječaka b, odnosno pod krajem četkice Γ_c odsječaka c. Sve tri vrijednosti u slučaju linearne komutacije ne razlikuju se, gustoća struje je na svakom mjestu i u svako vrijeme ista, što je upravo i prednost linearne komutacije. Pad napona nije strogo linearno proporcionalan gustoći struje, ali većoj gustoći odgovara i veći pad napona i obratno. Ako se gustoća u nekoj tački periodički mijenja, možemo u prvoj aproksimaciji uzeti, da je pad napona - uz stanovito izobličenje - proporcionalan

Linearna komutacija



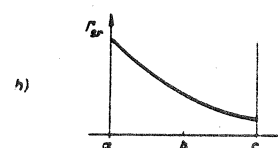
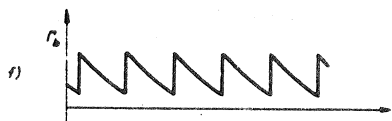
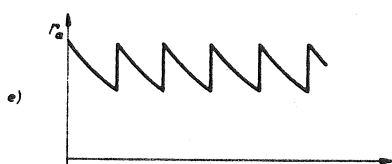
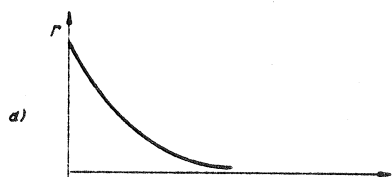
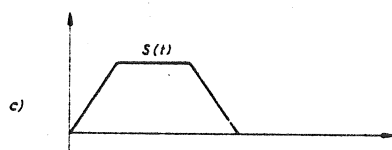
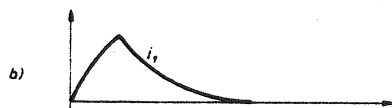
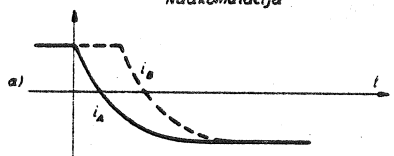
Sl. 5-70

Podkomutacija

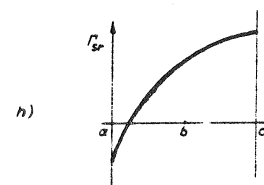
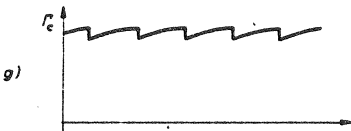
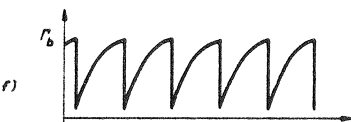
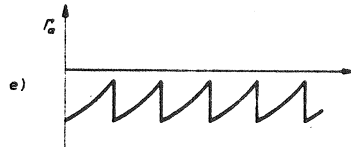
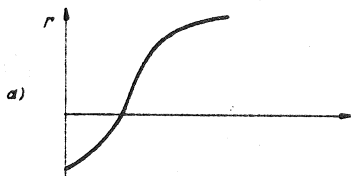
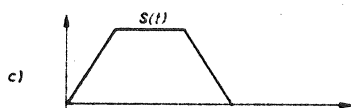
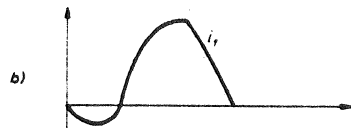
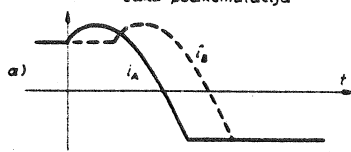


Sl. 5-71

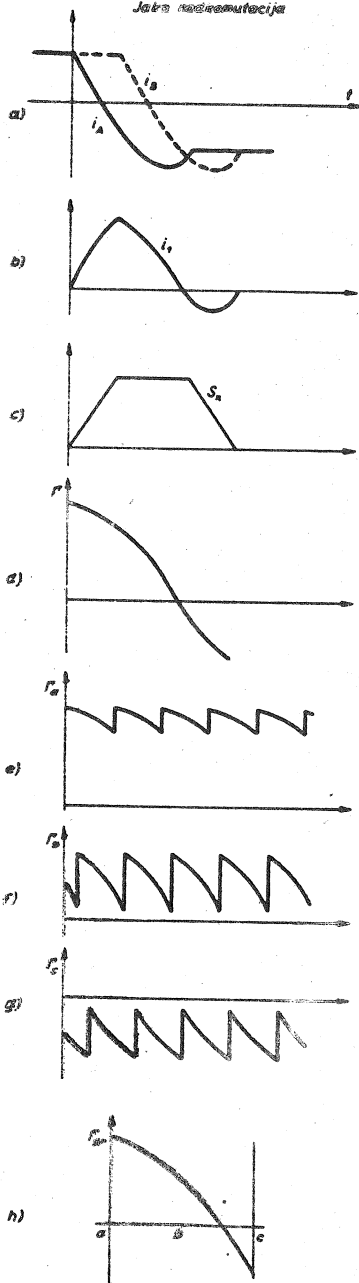
Nadkomutacija



Jaka podkomutacija



Jake nadkomutacija



srednjoj vrijednosti gustoće. Srednja vrijednost gustoće I_{sr} prema slici (h) također je ista za sve tačke a, b, c, pa će i pad napona biti isti.

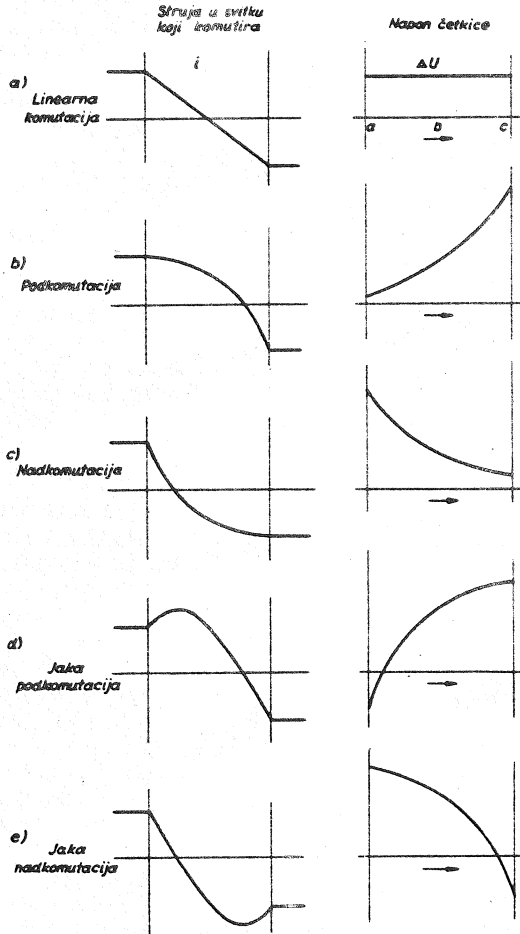
Drugačije je kod podkomutacije prema sl. 5-71 (a) do (h). Struja i_a ne mijenja se ovdje po istom zakonu kao dodirna površina $S(t)$. Usljed toga gustoća nije konstantna, već se mijenja prema slici (d). Na slikama (e), (f), (g) vide se gustoće I_a , I_b i I_c , koje predstavljaju periodičko ponavljanje odsječaka krivulje $i(t)$ u intervalima označenima a, b, c. Srednje vrijednosti krivulja I_a , I_b i I_c nanesene iznad tačaka po širini četkice daju sliku (h). Gustoća I_{sr} mijenja se po širini četkice po uzlaznoj krivulji, pa će se i pad napona na četkici mijenjati po uzlaznoj krivulji. Gustoća struje znatno je veća pod stražnjim rubom četkice, pa može lako doći do iskrenja.

Sl.5-72 predstavlja slučaj nadkomutacije. Isti postupak proveden je na sl. (a) do (h), i dobivena je silazna karakteristika srednje gustoće struje. Karakteristika napona četkice biti će također silazna. Ovaj slučaj je povoljan, jer će nadkomutacija kod preopterećenja - zbog slabijeg djelovanja pomoćnih polova - prijeći u linearnu, ali još uvijek ne u podkomutaciju.

Sl. 5-73 za slučaj jake podkomutacije i sl.5-74 za slučaj jake nadkomutacije pokazuju čak obrnuti smjer struje pod prednjim odnosno pod stražnjim rubom četkice, a velike gustoće struje na suprotnom rubu. Oba ova slučaja su nepovoljna, i treba ih bezuvjetno korigirati.

Sl.5-74

Na sl.5-75 donesen je napokon pregled rezultata, iz kojeg se vidi, da je najpovoljnija lagano padajuća ili horizontalna



Sl. 5-75

krivulja napona četkice, jer želimo postići laganu nadkomutaciju ili linearnu komutaciju.

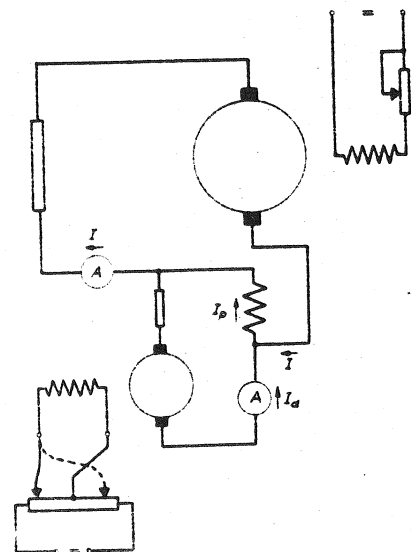
5.5.4 Odredjivanje crnog pojasa. Djelovanje pomoćnih polova može se pojačati ili oslabiti dodavanjem ili oduzimanjem struje u njihovom namotu prema sl.5-76. Paralelno s namotom pomoćnih polova priključimo mali pomoćni agregat niskog napona. Uzbuđu

tog agregata napajamo iz posebnog izvora tako, da je možemo po volji regulirati od nule u jednom i u drugom smjeru. Na taj način možemo udesiti bilo koju dodatnu struju I_d u namotu pomoćnih polova, pozitivnu ili negativnu, koju čitamo na ampermetru. Ako je struja opterećenja ispitivanog generatora I , onda u namotu pomoćnih polova teče :

$$I_p = I + I_d \quad (1)$$

gdje struji I_d treba pripisati pozitivan predznak, ako ona povećava ukupnu struju u namotu pomoćnih polova. To ćemo provjeriti tako, da mjerimo pad napona na tom namotu, koji se mora povećavati kad povećavamo struju I_d .

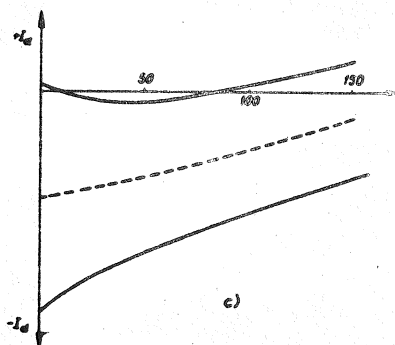
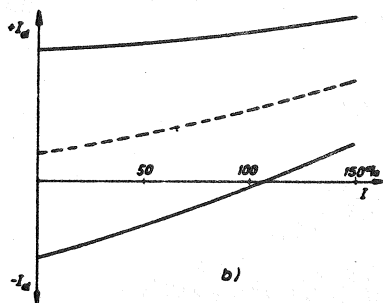
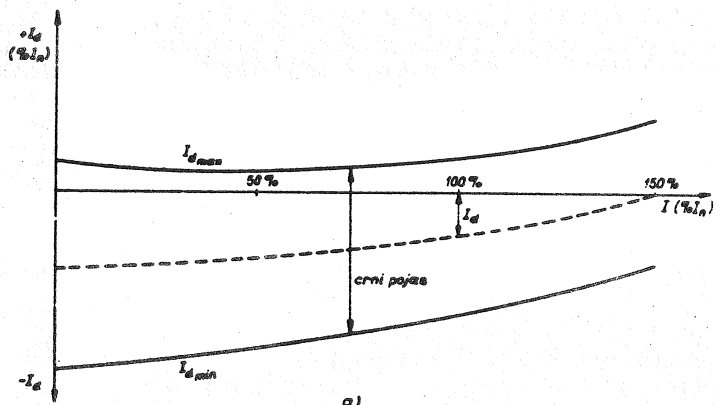
Uz konstantnu struju opterećenja I pri nazivnom naponu i nazivnoj brzini vrtnje povećavamo dodatnu struju I_d tako dugo, dok se na četkicama ne pojave prve iskre. Za-



Sl. 5-76

bilježimo vrijednost struje $I_{d \max}$, pa je zatim smanjujemo i po potrebi reverziramo, te povećavamo u suprotnom smjeru, dok kod vrijednosti $I_{d \min}$ ne zapazimo i opet prve iskre. Zatim ponovimo čitav postupak pri drugoj struji opterećenja. Obično uzimamo 0, 50%, 100% i 150% nazivne struje. Vrijednosti $I_{d \max}$ i $I_{d \min}$, izražene u postocima nazivne struje, nanesemo u dijagram u ovisnosti o struji opterećenja I , pa dobivamo dijagram prema sl. 5-77a. Krivulje $I_{d \max}$ i $I_{d \min}$ ograničuju tzv. "crni pojas" unutar kojega nema iskrenja na četkicama. Odstupanje srednje linije crnog pojasa $I_{d \text{sr}}$ od apscisne osi pokazuje, koliko je djelovanje pomoćnih polova preslabo (na pozitivnoj strani) ili prejako (na negativnoj strani). S porastom struje djelovanje pomoćnih polova postaje relativno slabije, a komutacija osjetljivija. Zato crni pojas pokazuje uzlazni karakter, a suzuje se.

Na sl. 5-77a prikazan je slučaj nešto malo prejakih pomoćnih polova, koji u čitavom području opterećenja i kod 50 % preopterećenja osiguravaju dobru komutaciju. Sl. 5-77b prikazuje podkomutaciju, gdje već kod punog opterećenja, a pogotovo kod preopterećenja počinje iskrenje. Sl. 5-77c prikazuje nadkomutaciju, sa smetnjama kod djelomičnog opterećenja.



Sl. 5-77

5.5.5 Udešavanje pomoćnih polova. Zamjena podložaka pomoćnih polova zahtijeva mnogo vremena, pa je poželjno, da se unaprijed odredi potrebno povećanje ili smanjenje zračnog raspora, kako bi jednim zahvatom, bez ponavljanja, udesili pravu vrijednost. Podlogu za to daje mjerenje one dodatne struje I_d prema slici 5-76, koja daje dobru komutaciju, bilo da to kontroliramo smanjem krivulje napona četkice prema 5.5.3, bilo da snimimo čitav "crni pojas" prema 5.5.4. Srednja linija crnog pojasa treba da leži što bliže uz apscisnu os, pogotovo u području oko punog opterećenja, a da pri tome apscisna os nigdje ne izlazi van crnog pojasa. Kao dodatnu struju I_{d1} , koja daje dobru komutaciju, uzimamo odstupanje srednje linije crnog pojasa od

apscisne osi pri 100 % nazivne struje.

Veličinu novog raspora ispod pomoćnog pola - u koji ubrajamo stvarni raspor prema rotoru, i zbroj debljina svih nemagnet-skih podložaka prema jarmu - dobivamo slijedećim razmatranjem. Polje pomoćnog pola određuje razlika amperzavoja pomoćnog pola i amperzavoja armature, tj. vrijedi prema izrazu (2) u 5.3.3:

$$\Theta_{pp} = I(W_p - W_a) \quad (1)$$

Za vrijeme ispitivanja postigli smo dobru komutaciju pri protje-canju:

$$\Theta'_{pp} = I_p W_p - I_a W_a = (I + I_d) W_p - I_a W_a \quad (2)$$

Bez dodatne struje protjecanje će biti određeno izrazom (1). Raspor pomoćnog pola treba dakle promijeniti tako, da protje-canje Θ_{pp} prema (1) pri novom raspору δ_{novi} dade istu indukciju, kao protjecanje Θ'_{pp} prema (2) za vrijeme ispi-tivanja pri starom raspору δ_{stari} . Gotovo svi amperzavoji troše se pri tome na raspor, tako da željezo možemo zanemariti, pa slijedi :

$$B_p = B'_p \quad (3)$$

$$\frac{\Theta_{pp}}{\delta_{novi}} = \frac{\Theta'_{pp}}{\delta_{stari}} \quad (4)$$

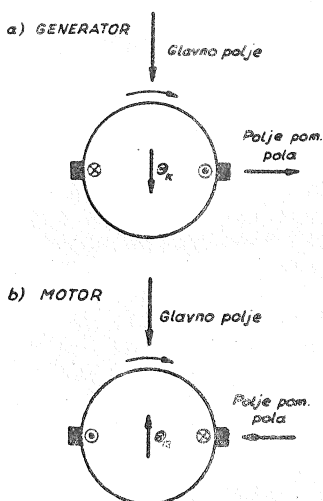
$$\delta_{novi} = \delta_{stari} \frac{\Theta_{pp}}{\Theta'_{pp}} = \delta_{stari} \frac{1}{1 + \frac{I_d}{I} \cdot \frac{k}{k-1}} \quad (5)$$

gdje izraz $k = \frac{W_p}{W_a}$ predstavlja relativnu kompenzaciju reakci-je armature u komutacionoj zoni. Ova vrijednost se normalno kreće oko 1,33, što bi dalo za svakih 1 % dodatne struje potrebno smanjenje raspora za oko 4 %, ako je dodatna struja pozitivna, a povećanje raspora za oko 4 %, ako je dodatna struja negativna.

5.5.6 Komutacija kod prelaznih pojava. Komutacija, koja je pot-puno u redu pri stacionarnom pogonskom stanju uz bilo koje opte-rećenje od nule do 50 % preopterećenja, može ipak zakazati kod pogona sa čestim prelaznim pojavama, bilo da se mijenja optere-ćenje, bilo da vršimo regulaciju poljem ili narimutim naponom na armaturi.

Kod promjene glavnog polja napon na četkicama mijenjati će se proporcionalno toku ϕ . Međutim, čitav tok prolazi kroz svitke koji se upravo nalaze u komutacionoj zoni, i promjene toka induciraju u tim svitcima napone proporcionalne sa $d\phi/dt$. Uslijed toga zatvaraju se preko četkica, koje u tom času kratko spajaju svitke, dodatne struje.

Razmotrimo li djelovanje pomoćnih polova na svitak koji komutira, dobivamo sl.5-78, iz koje se vidi, da struje koje indu-



cira rotacija u polju pomoćnog pola potpomažu glavno polje kod generatora, a slabe ga kod motora. Struje, koje izaziva promjena glavnog toka, bit će uvijek takove, da se toj promjeni protive. Ako dakle polje generatora povećamo, napon u kratkospojnom svitku pomagati će napon samoindukcije, pomoćni polovi će biti preslabi, dobiti ćemo podkomutaciju, a kod smanjivanja polja dobiti ćemo nadkomutaciju. Obratno kod motora : porast glavnog polja potpomaže pomoćne polove, smanjivanje ih slabi. Shema utjecaja regulacije poljem biti će dakle :

Sl.5-78

T a b e l a 5.5-1

	Generator	Motor
Porast toka ϕ	podkomutacija	nadkomutacija
Smanjenje toka ϕ	nadkomutacija	podkomutacija

Druga smetnja kod prelaznih pojava može nastati zbog vremenske konstante pomoćnih polova. Polja pomoćnih polova trebalo bi se mijenjati proporcionalno struji opterećenja. No ako se ova naglo promijeni, tok ne će slijediti promjenu istom brzinom, jer se tome protive vrtložne struje, koje promjena toka inducira u željezu pomoćnih polova (vidi (15) u 5.4.9). Tok pomoćnih polova ne slijedi odmah struju, osobito ako pomoćni polovi nisu

lamelirani. U prvom času kod promjene opterećenja biti će pomoćni polovi preslabi, ako smo opterećenje povećali, a prejaki, ako smo ga smanjili. Kod povećanja tereta dobit ćemo dakle podkomutaciju, a kod smanjenja nadkomutaciju, bez obzira da li se radi o generatorskom ili o motorskom pogonu.

Za poboljšanje komutacije kod prelaznih pojava ne može se mnogo učiniti na već izvedenom stroju, ali se može ograničiti brzinu regulacije i udarce opterećenja tako, da komutacija zadovolji. Pri tome ne smeta, ako dolazi do kratkotrajnih iskrenja, jer se u periodima rada između prelaznih pojava kolektor i četkice obično potpuno zagladi, pa nema trajnih oštećenja.

5.6. Gubici i zagrijavanje.

Kod istosmjernih motora brzina vrtnje može biti promjenljiva, bilo da stroj ima serijsku karakteristiku, bilo da u pogonu reguliramo brzinu vrtnje. Isto tako napon istosmjernog generatora često u pogonu mijenjamo u širokim granicama. Određivanje gubitaka, korisnosti i zagrijavanja vezano je uz režim rada kojemu je stroj namijenjen. Zbog jednostavnosti zadržavamo kod porednih strojeva relativno mali pad brzine, pa dajemo podatke pri svim opterećenjima za nazivnu brzinu. Kod serijskih strojeva i kod porednih strojeva s jakim djelovanjem serijskih namota uzimamo u obzir stvarnu karakteristiku brzine vrtnje.

Mjerenje zagrijavanja treba provesti tako, da se reproducira stvarni proces opterećenja za koji je motor predviđen.

5.6.1 Podjela gubitaka. Gubitke istosmjernog stroja u smislu IEC preporuka dijelimo u 4 osnovne grupe (vidi sl.5-79) :

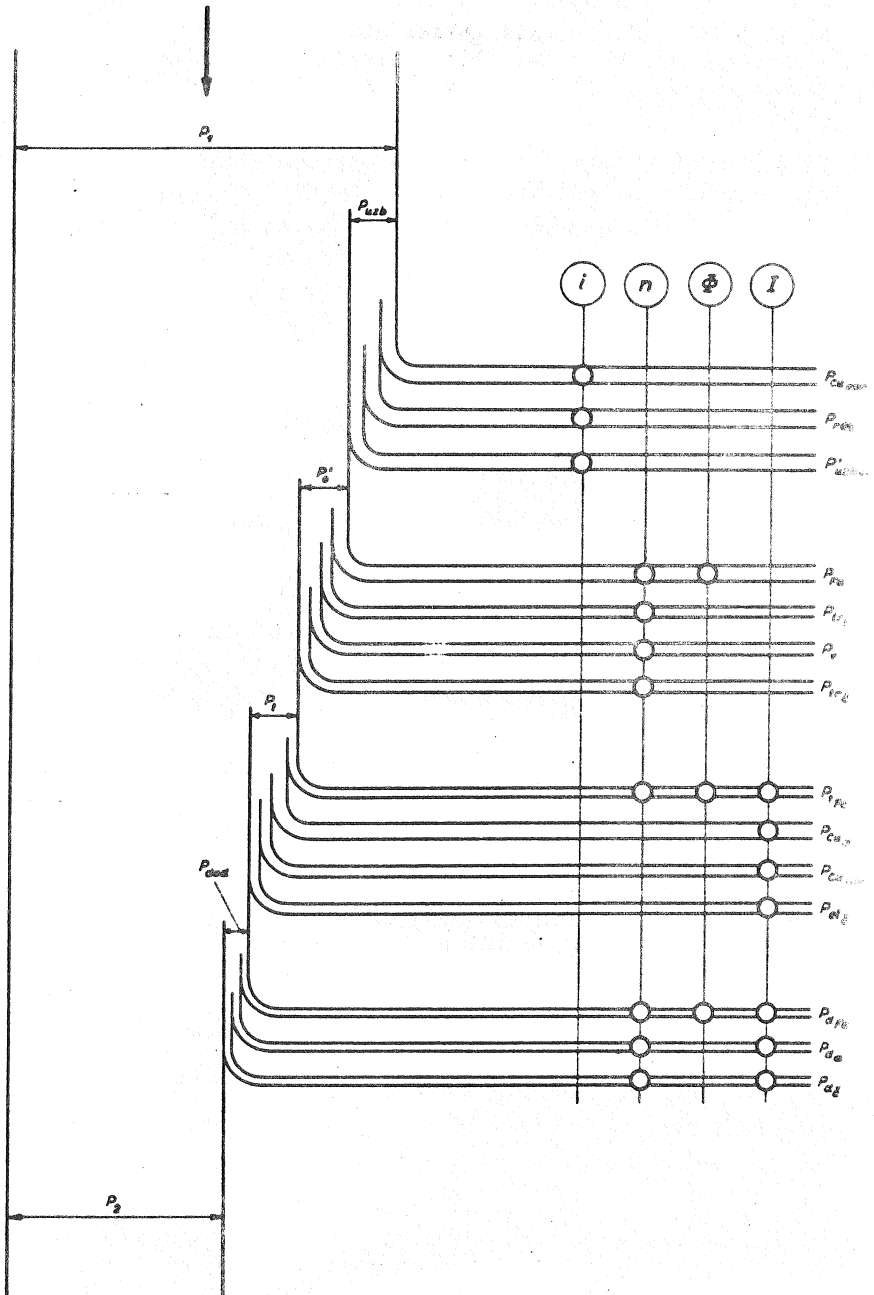
- 1 Uzbudni gubici P_{uzb}
- 2 Uži gubici praznog hoda P'_0
- 3 Teretni gubici P_t
- 4 Dodatni gubici P_{dod}

Bilo da se radi o motoru, bilo o generatoru, ulazna snaga i izlazna snaga razlikovati će se za zbroj tih gubitaka :

$$P_2 = P_1 - P_g \quad (1)$$

Kod generatora je ulazna snaga P_1 mehanička snaga na osovinu, a izlazna snaga je električka snaga, dok je kod motora obrnuto. Gubici su prema gore izloženom :

$$P_g = P_{uzb} + P'_0 + P_t + P_{dod} \quad (2)$$



Na sl.5-79 vidi se koji gubici ulaze u sastav gornjih grupa, a označeno je, također, koji parametri utječu na veličinu pojedinih vrsta gubitaka. U vezi s time treba spomenuti slijedeće :

Ad.1 : Uzbudni gubici obuhvaćaju gubitke u bakru samouzbuđenog ili nezavisno uzbuđenog porednog namota $P_{Cu\ per} = I^2 \cdot R_m$, zatim gubitke u otporima u uzbuđenom krugu $P_{reg} = I^2 \cdot R_{reg}$, te gubitke uzbuđnika $P'_{uzbuđnika}$, ukoliko je taj njevan s iste osovine i služi za uzbuđenje samo te jedinice. U ove gubitke nisu uključeni gubici trenja i ventilacije uzbuđnika, koje mjerimo zajedno s gubicima trenja i ventilacije čitave grupe. Vrijedi dakle :

$$P'_{uzbuđnika} = P_{uzbuđnika} - P_{tr, v\ uzbuđ} \quad (3)$$

dok su ukupni uzbuđni gubici :

$$P_{uzb} = P_{Cu\ per} + P_{reg} + P'_{uzbuđnika} \quad (4)$$

Budući da će pogon uzbuđnika s iste osovine doći u obzir samo u slučajevima gdje je $n = konst$, biti će uzbuđna struja i jedini parametar, o kojemu ovise uzbuđni gubici.

Ad.2 : Uži gubici praznog hodaastoje se od gubitaka u željezu u praznom hodu P_{Fe} , gubitaka trenja u ležajima $P_{tr, l}$, gubitaka trenja zraka i ventilacije P_v , i gubitaka trenja četkica na kolektoru $P_{tr\ z}$:

$$P'_0 = P_{Fe} + P_{tr, l} + P_v + P_{tr\ z} \quad (5)$$

Gubici trenja i ventilacije obuhvaćaju i istovrsne gubitke eventualnog uzbuđnika na istoj osovinu. Svi ovi gubici ovise o brzini vrtnje n , a gubici u željezu osim toga još o veličini magnetskog toka ϕ .

Ad.3 : Teretni gubici obuhvaćaju razliku gubitaka u željezu pri opterećenju naprama onima u praznom hodu P_{Fe} , zatim gubitke strujne topline u namotu armature $P_{Cu\ a} = I_a^2 \cdot R_a$, i u svim namotima kroz koje teče struja opterećenja $P_{Cu\ ser} = I^2 \cdot R_{ser}$, te električke gubitke uslijed kontaktnog otpora na četkicama $P_{el\ z} = \Delta U \cdot I$. Sve ove gubitke, u slučaju grananja struje na serijske i poredne grane, treba računati sa strujom koja u pojedinom namotu stvarno teče. Otpor treba izmjeriti istosmjernom strujom i preračunati na temperaturu $75^\circ C$. Pad napona na četkicama treba uzeti 2 V kod ugljenih četkica, a 0,6 V kod metalnografitnih četkica, za četkice oba polariteta zajedno. Teretni gubici su prema tome :

$$P_0 = P_{Fe} + P_{Cu} + P_{st} + P_{el} \quad (5)$$

Svi ovi gubici ovise isključivo o struji I , osim razlike gubitaka u željezu, koja ovisi i o toku ϕ i o brzini vrtnje n .

Ad.4 : Dodatni gubici obuhvaćaju gubitke $P_{d Fe}$ koji nastaju u magnetskom krugu i željeznim dijelovima kod opterećenja, a nisu obuhvaćeni u $P_{t Fe}$, zatim gubitke u vodičima P_{da} , koji nisu sadržani u računski odredjenim gubicima na osnovu mjerenja otpora istosmjernom strujom, te dodatne gubitke u četkicama uslijed komutacije $P_{d \delta}$:

$$P_{dod} = P_{d Fe} + P_{da} + P_{d \delta} \quad (7)$$

Ovi dodatni gubici ovise o frekvenciji i veličini struja u vodičima, tj. o n i o I . Osim toga dodatni gubici u željezu ovise i o zasićenju, dakle o toku ϕ .

5.6.2 Odredjivanje gubitaka. Uzbudne gubitke odredjujemo mjerenjem otpora porednog uzbudnog kruga, zajedno s predotporima i otporom regulatora, i uzbudne struje. Dobivamo :

$$P_{Cu por} + P_{reg} = i^2 \cdot \Sigma R \quad (1)$$

U slučaju uzбудnika tjeranog s iste osovine, potrebno je uključiti i gubitke uzbudnika, izuzev trenje i ventilaciju, dakle :

$$P'_{uzbudnika} = (P_{xzb} + P_{Fe} + P_t + P_{dod})_{uzbudnika} \quad (2)$$

Ove gubitke možemo odrediti pojedinačno, kao što će biti dalje opisano, ili iz dva pokusa zaustavljanja, jedan s neuzbudjenim agregatom, a drugi s uzbudnikom opterećenim nazivnom strujom na vanjski otpor. Na taj način možemo odvojiti gubitke trenja i ventilacije od ostalih gubitaka.

Uže gubitke praznog hoda mjerimo u praznom hodu, kako je opisano u 5.2.1. Ako smo ih izmjerili za nekoliko vrijednosti $n = konst$ u ovisnosti o naponu E (tj. o toku ϕ), možemo interpolacijom dobiti gubitke P'_0 za svako pogonsko stanje. Pri opterećenju je samo potrebno odrediti inducirani napon :

$$E = U + IR + 2 \quad \text{za generator, odn.} \quad (3)$$

$$E = U - IR - 2 \quad \text{za motor} \quad (4)$$

pa možemo za taj E i brzinu vrtnje n očitati gubitke P'_0 , koji sada obuhvaćaju i promjenu gubitaka u željezu zbog opterećenja $P_{t Fe}$. Očito je da ta promjena može biti pozitivna ili negativna. Određivanje gubitaka trenja i ventilacije, te

gubitaka trenja četkica obično nije potrebno, ali se može provesti mjerenjem s podignutim i spuštenim četkicama, te mjerenjem kod 2 različite brzine vrtnje (vidi 3.9.4), uz neuzbuđjen stroj, bilo pogonom s baždarenim strojem, bilo metodom zaustavljanja.

Jedan dio teretnih gubitaka P_t , P_g , već je obuhvaćen očitavanjem gubitaka praznog hoda za inducirani napon E umjesto za napon na stezaljkama U . Gubitke u otporu armature računamo iz otpora R_a mjerene istosmjernom strujom i struje armature I_a :

$$P_{cu a} = I_a^2 \cdot R_a \quad (5)$$

gdje R_a treba uzeti kod temperature 75°C , a struju I_a dobivamo iz ukupne struje I i struje samouzbuđbe I_p kao:

$$I_a = I + I_p \quad \text{za generator} \quad (6)$$

$$I_a = I - I_p \quad \text{za motor} \quad (7)$$

U ostalim serijskim namotima - kompenzacioni namot, pomoćni polovi i kompeundacija - računamo na sličan način, vodeći računa o tome, na kojemu se mjestu odvaja struja za paralelnu granu:

$$P_{cu ser} = I_{ser}^2 \cdot R_{ser} = \Delta U_{ser} \cdot I_{ser} \quad (8)$$

Pad napona ΔU_{ser} na serijskim namotima možemo lako izmjeriti u pogonu pri opterećenju. Električke gubitke na četkicama računamo kao:

$$P_{et c} = 2 \cdot I_a \quad \text{kod ugljenih} \quad (9)$$

$$P_{et c} = 0,6 \cdot I_a \quad \text{kod metalno-grafitnih četkica} \quad (10)$$

Dodatne gubitke, koji predstavljaju razliku između stvarnih ukupnih gubitaka i sume do sada nabrojenih pojedinačnih gubitaka, vrlo je teško mjeriti. Preporuke IEC, kao i svi nacionalni propisi, predviđaju zato, da ih se uzme u račun određenjem postotkom predane snage P_2 . Preporuke IEC predviđaju 1 % snage P_2 kod nekompensiranog stroja, a 0,5 % kod kompenziranog stroja. Ovi gubici mijenjaju se proporcionalno sa I^2 . Kao snagu P_2 za određivanje dodatnih gubitaka treba uzeti predanu snagu pri maksimalnoj nazivnoj struji i maksimalnom nazivnom naponu, ako je brzina vrtnje konstantna. Ako se brzina regulira narinutim naponom, onda treba za svaku brzinu računati s odgovarajućim naponom. Ako se regulacija vrši poljem, snagu P_2 treba uzeti za maksimalni napon i maksimalnu struju. Tako određeni dodatni gubici vrijede za najmanju brzinu, a za veće br-

zine treba ih pomnožiti faktorom k_n kako slijedi :

T a b e l a 5.6-1

$n/n_{\min}$	1,5	2	3	4
k_n	1,4	1,7	2,7	3,2

Tačnije mjerenje dodatnih gubitaka može se provesti samo mjerenjem primljene i predane snage, ili u povratnom radu, ili kalorimetrički (vidi 4.5.3 6) . O povratnom radu bit će govora u 5.6.5 .

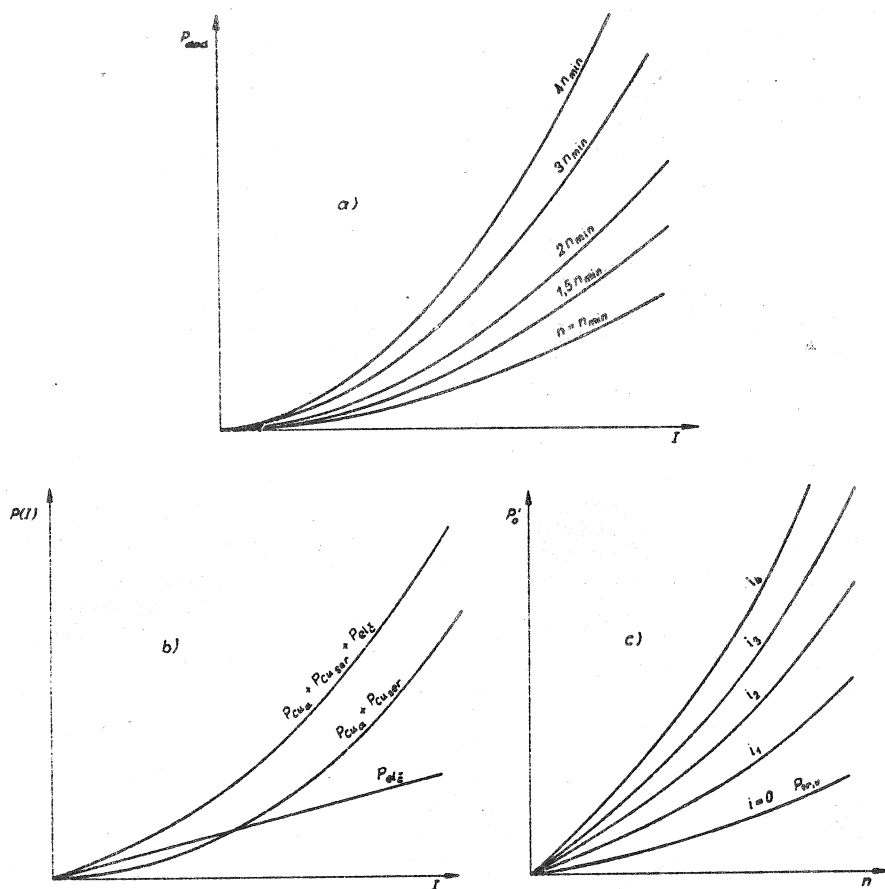
5.6.3 Baždarenje istosmjernog stroja. Vrlo često se postavlja zadatak baždarenja istosmjernog stroja, tj. određivanja i prikazivanja gubitaka na takav način, da za svako pogonsko stanje možemo odmah ustanoviti ukupne gubitke. Uzbudu u takvim slučajevima uvijek napajamo iz posebnog izvora, pa nije potrebno baždarenjem obuhvatiti uzbudne gubitke. Ako dodatne gubitke računamo kako je gore navedeno, bit će npr. za nekompenzirani generator :

$$\begin{aligned}
 P_{\text{dod}} &= 0,01 \cdot U_{\max} \cdot I_{\max} \cdot k_n \cdot \left(\frac{I}{I_{\max}} \right)^2 = \\
 &= 0,01 \cdot \frac{U_{\max}}{I_{\max}} \cdot k_n \cdot I^2 = R_{\text{dod}} \cdot k_n \cdot I^2 \quad (1)
 \end{aligned}$$

Kod motora treba R_{dod} pomnožiti još s korisnošću η , koja smije biti grubo ocijenjena. Rezultat se može prikazati u dijagramu u ovisnosti o struji I , s brzinom vrtnje n kao parametrom (sl.5-80a).

Gubitke ovisne samo o struji I , tj. gubitke u bakru armature $I^2 R_a$ i serijski spojenih namota $I^2 R_{\text{ser}}$, te gubitke uslijed prelaznog otpora na četkicama $\Delta U_{\text{c}} \cdot I$, unosimo u poseban dijagram (sl.5-80b). Treći dijagram (sl.5-80c) predstavlja gubitke ovisne o brzini vrtnje n i o toku ϕ , tj. P_{ϕ} . Snimamo ih tako, da uz konstantnu uzbudnu struju promjenom narinutog napona u praznom hodu variramo brzinu vrtnje, i mjerimo snagu koju uzima stroj kao motor. Dobivamo krivulje $P_{\phi} = f(n)$ sa I kao parametrom. Izostavljena je pri tome korekcija $P_{\text{t re}}$, koja ovisi i o struji I . Ako želimo i to uzeti u obzir, treba gubitke P_{ϕ} očitati s krivulje $i = \text{konst}$

koja odgovara induciranom naponu E prema (3) i (4) u 5.6.2, umjesto stvarne uzbudne struje s kojom radimo. U tu svrhu mo-



Sl. 5-80

ramo raspolagati i snimljenom karakteristikom zasićenja. U većini slučajeva - osim kod strojeva za vrlo niski napon - ta korekcija nije potrebna. Isto tako se i dodatni gubici, koji su vrlo mali, često predstavljaju jednostavnim povećanjem otpora armature za R_{dod} , zanemarujući utjecaj promjene brzine vrtnje. Tada se određivanje gubitaka svodi na očitavanje vrijednosti $P(I)$ i P_0 , koje odgovaraju pogonskom stanju, tj. struji I , brzini vrtnje n i uzbudnoj struji i , pa su gubici koji predstavljaju razliku dovedene snage i predane snage, isključivši uzbudne gubitke, jednaki :

$$P_2' = P(I) + P_0'$$

Ako postupamo tačnije, očitamo prvo vrijednosti I , n , i , zatim sa krivulje zasićenja nadjemo vrijednost i' koja odgovara induciranom naponu E pri brzini n , pa s dijagrama (a), (b) i (c) očitamo :

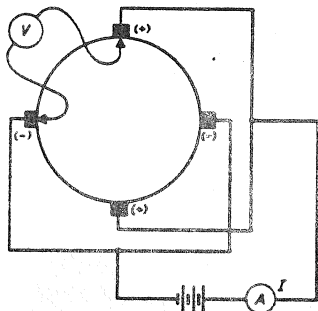
$$P_g' = P_a(I, n) + P_b(I) + P_c(i', n) \quad (13)$$

Time su gubici za svako pogonsko stanje određeni.

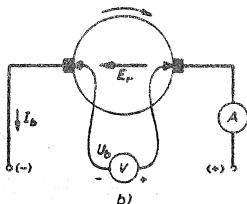
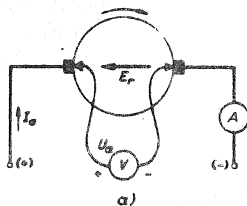
5.6.4 Mjerenje otpora armature. Otpor armature treba nam za izračunavanje gubitaka strujne topline u armaturi. To znači, da otpor armature treba mjeriti u pogonskom spoju, upravo onako, kako se on suprotstavlja narinutom naponu na četkicama stroja, ali bez prelaznog otpora od četkice do kolektora. Kod višepolnog stroja mjerimo dakle otpor U-I metodom prema sl. 5-81 kao :

$$R_a = \frac{U}{I} \quad (1)$$

gdje je U pad napona izmjeren direktno na kolektoru, a ne na četkicama, a I ukupna struja koju vanjski izvor šalje u armaturu. Stroj pri tome miruje, kako ne bi ušao u mjerenje inducirani napon remanencije. Uslijed različitog prekrivanja četkica i kolektorskih lamela, može doći do malih odstupanja otpora R_a prema položaju rotora, osobito ako je malo lamela na kolektoru. U tom slučaju treba snimiti nekoliko vrijednosti



Sl. 5-81



Sl. 5-82

pomičući rotor unutar intervala širine jedne kolektorske lamela. Kao srednju vrijednost otpora R_a treba onda uzeti sredinu svih rezultata.

Srednju vrijednost otpora dobivamo odmah, ako mjerimo na ne-uzbudjenom stroju koji rotira. Pad napona treba mjeriti grafit-

nim šiljcima, koji klizu po kolektoru ispod sredina četkica. Pošto pri rotaciji u armaturi tijeluje napon remanencije E_r , potrebno je izvršiti dva mjerenja s obrnutim polaritetom izvan narinute struje, prema sl. 5-82. U slučaju (a) će vrijediti:

$$U_a = I_a \cdot R_a + E_r \quad (2)$$

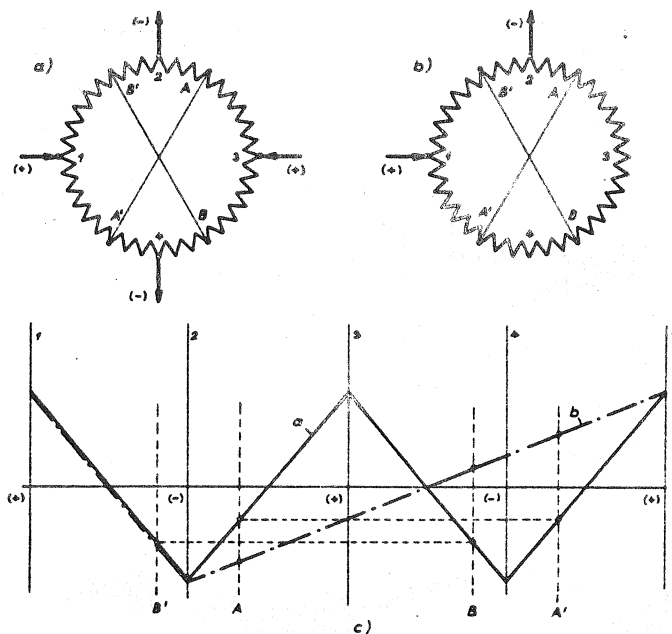
a u slučaju (b) :

$$U_b = I_b \cdot R_a - E_r \quad (3)$$

Zbrojimo li obe jednadžbe, napon remanencije ispada iz računa, pa imamo otpor armature :

$$R_a = \frac{U_a + U_b}{I_a + I_b} \quad (4)$$

Kod mjerenja otpora u svrhu kontrole zagrijavanja namota može se, u načelu, mjeriti otpor između bilo koje dvije lamele, koje treba označiti, a bitno je samo to, da se u toplom i hladnom stanju mjeri otpor između istih lamela, i da ih se dovede u isti položaj prema četkicama, ako ove leže na kolektoru. Čitav namot zagrijava se jednako, pa nije važno koju kombinaciju otpora pojedinih svitaka smo mjerili, samo je važno da usporedimo istu kombinaciju na hladnom i toplom stroju. Međutim, kod strojeva s ekvipotencijalnim vezama treba postupiti vrlo oprezno. Na sl.5-83 prikazana je shematska slika namota 4-polinog stroja. Ekvipotencijalne veze spajaju mjesta istog potencijala, npr. A-A' ili B-B'. Ako pri mjerenju otpora armaturu napajamo u pogonskom spoju (sl.5-83a), tj. uz paralelno spojene sve (+) - četkice, odnosno sve (-) - četkice, raspodjela napona na namotu bit će predočena linijom (a) na sl.5-83c. Tačke A i A' bit će na istom potencijalu, isto tako i B i B' itd, pa kroz ekvipotencijalne veze ne će teći struja. To znači, da bi ih mogli i ukoniti, a da se na mjerenju ne bi ništa promijenilo. Drugačije je, ako armaturu napajamo nesimetrično, npr. samo na 2 četkice prema sl. 5-83b. Raspodjela napona prikazana je na sl. 5-83c linijom (b), pretpostavljajući da su ekvipotencijalne veze otvorene. Na njihovim krajevima A-A' ili B-B' potencijali su sada posve različiti. Ako dakle zamislimo zatvorene ekvipotencijalne veze, u njima mora teći struja, i njihov otpor će utjecati na ukupno izmjereni otpor. U pogonu se ekvipotencijalne veze ne zagrijevaju kao namot armature, pa se iz tako izmjerene kombinacije otpora ne može mnogo zaključiti. Želimo li dakle odrediti zagrijanje namota s ekvipotencijalnim vezama, potrebno je napajati namot preko svih četkica. Pad napona mjeri se onda između dvije označene lamele, koje postavimo što dalje od četkica, i to u jednak položaj pri mjerenju na toplom stroju kao i na hladnom stroju.



Sl. 5-83

5.6.5 Korisnost η . Korisnost η određuje se za nazivni pogon tj. pri nazivnom naponu, nazivnoj struji i nazivnoj brzini vrtnje. Općenito vrijedi :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

gdje je P_2 = predana snaga, a P_1 = dovedena snaga. Kod generatora pristupačnija je mjerenju predana snaga $P_2 = UI$, a kod motora $P_1 = UI$. Zato korisnost računamo kod generatora :

$$\eta = \frac{R_2}{R_2 + R_g} = 1 - \frac{R_g}{R_2 + R_g} \quad (2)$$

a kod motora :

$$\eta = \frac{R_1 - R_g}{R_1} = 1 - \frac{R_g}{R_1} \quad (3)$$

kako je već bilo izloženo u 3.9.1 .

Električnu snagu $U \cdot I$ mjerimo direktno, a gubitke P_g bilo odredimo u povratnom radu (vidi 5.6.6), bilo ih odredimo kao sumu pojedinačnih gubitaka prema 5.6.2 .

Vrlo česte istosmjerni stroj radi uz konstantan napon i konstantnu brzinu vrtnje, te uz konstantnu porednu uzбудu :

$$U = \text{konst}, \quad n = \text{konst}, \quad i = \text{konst}$$

U tom su slučaju uzбудni gubici i uži gubici praznog hoda konstantni. Teretni gubici sastoje se od dva člana, od kojih jedan raste proporcionalno sa I , a drugi sa I^2 . Ukupne gubitke možemo dakle pisati u obliku :

$$P_g = K_0 + K_1 \cdot I + K_2 \cdot I^2 \quad (4)$$

Električna snaga raste proporcionalno sa strujom I . Kod motora to je primljena snaga, pa će korisnost biti :

$$\eta = 1 - \frac{K_0 + K_1 I + K_2 I^2}{UI} \quad (5)$$

Ako taj izraz deriviramo po struji I , i izjednačimo derivaciju s nulom, dobivamo uvjet za maksimalnu korisnost η :

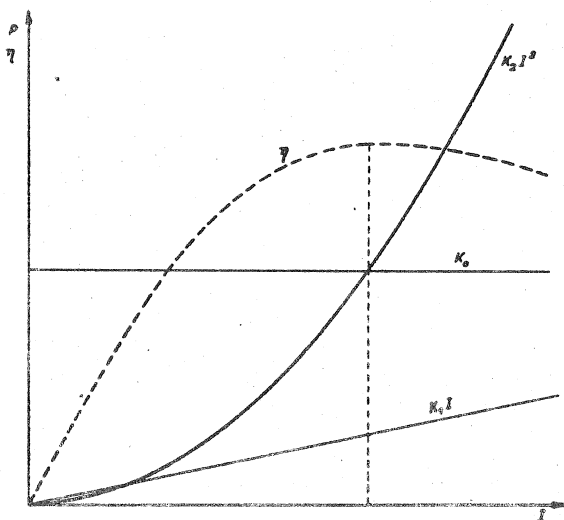
$$\frac{K_0}{I^2} - K_2 = 0 \quad (6)$$

$$K_2 \cdot I^2 = 0$$

Kod generatora praktičnije je uzeti recipročnu vrijednost :

$$\frac{1}{\eta} = \frac{P_2 + P_g}{P_2} = 1 + \frac{P_g}{P_2} = 1 + \frac{K_0 + K_1 I + K_2 I^2}{UI} \quad (7)$$

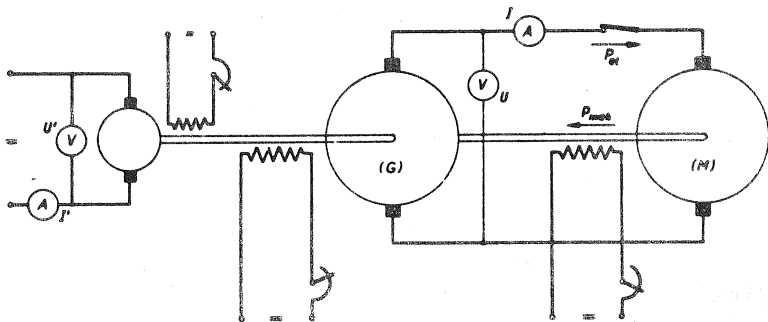
pa umjesto maksimuma η potražiti minimum izraza za $\frac{1}{\eta}$. Pošto je promjenljivi član, izuzev predznak, identičan s onim kod



motora prema (5), očito je da će uvjet za $\frac{1}{\eta} - \min$, tj. za $\eta = \max$ biti jednak kod generatora i motora, tj. prema izrazu (6). Vrijednost $K_2 I^2$ predstavlja gubitke koji su proporcionalni s I^2 , a vrijednost K_0 predstavlja konstantne gubitke. Optimalna korisnost nastupit će kod onog opterećenja, kod kojeg gubici koji rastu s I^2 budu jednaki konstantnim gubicima (sl.5-84). Gubici prelaza na četkicama ne utječu na optimalno opterećenje, ma da utječu na visinu optimalne korisnosti η .

5.6.6 Metode opterećenja. Metode opterećenja izložene u 4.4.3 do 4.4.6 mogu se primijeniti i na istosmjerni stroj. Ako raspoložemo s dva jednaka stroja, što će u serijskoj fabricaciji uvijek biti slučaj, možemo ih mehanički i električki povezati i opteretiti u povratnom radu. To omogućuje mjerenje zagrijanja stroja pri punom opterećenju, a također i približno određivanje gubitaka i korisnosti η .

U spoju prema sl.5-85 (Blondel-ova metoda) mali baždareni pomoćni stroj tjera oba stroja na istoj osovini. Motor (M) prima snagu P_{el} , i daje snagu na osovini koja je manja za



Sl. 5-85

iznos gubitaka motora :

$$P_{meh} = P_{el} - P_{gM} \quad (1)$$

Generator daje snagu P_{el} , a za pogon mu je potrebna mehanička snaga veća za iznos gubitaka generatora. Ovu mehaničku snagu pokriva dijelom motor (M), a dijelom pomoćni motor, koji daje mehaničku snagu P'_{meh} :

$$P_{meh} + P'_{meh} = P_{el} + P_{gG} \quad (2)$$

Mehanička snaga pomoćnog motora jednaka je prema tome :

$$P'_{meh} = P_g + P_{gM} \quad (3)$$

tj. ukupnim gubicima obaju strojeva u povratnom radu, u koje nisu uračunati uzbudni gubici, jer ih pokrивamo iz posebnog izvora. Mehaničku snagu pomoćnog stroja dobivamo iz mjerene električke snage, i gubitaka koje očitamo s krivulja baždarenja :

$$P'_{meh} = U \cdot I' = P'_g \quad (4)$$

Oba stroja u povratnom radu treba uzбудiti tako, da teče nazivna struja I_n . No kad bi udesili nazivni napon, onda bi gubici u željezu stroja koji ispituјemo - npr. generatora - odgovarali nazivnom pogonu, ali bi se inducirani napon drugog stroja razlikovao za dvostruki pad napona, pa bi i gubici u željezu bili različiti. Ako želimo da izmјereni gubici odgovaraju dvostrukim gubicima generatora u nazivnom pogonu, treba udesiti srednju vrijednost induciranih napona E_g i E_M jednaku induciranom naponu generatora u nazivnom pogonu :

$$\frac{E_g + E_M}{2} = U_n + IR + 2 \quad (5)$$

Budući da je :

$$E_g = U + IR_a + 2 \quad (6)$$

$$E_M = U - IR_a - 2 \quad (7)$$

slijedi napon koji treba udesiti na stezaljkama :

$$U = \frac{E_g + E_M}{2} = U_n + IR_a + 2 \quad (8)$$

Ako pak želimo izmјeriti gubitke u motorskom pogonu, onda iz jednakog razmatranja slijedi da treba udesiti napon :

$$U = \frac{E_g + E_M}{2} = U_n - IR_a - 2 \quad (9)$$

Uz ovakove uslove dobivamo za generatorski odnosno motorski rad :

$$P'_o + R_t + P_{dod} \cong \frac{1}{2} \cdot P'_{meh} \quad (10)$$

Tome treba još dodati uzbudne gubitke, koje je lako izračunati za nazivno pogonsko stanje, pa možemo odrediti korisnost η .

U spoју prema sl. 5-86 (Kapp-ova metoda) gubitke obaju strojeva pokriva električka mreža (ili treći stroj) na koju su električki priključeni. Vrijedi dakle :

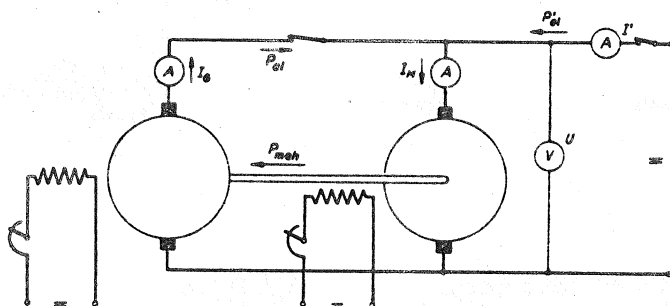
$$UI' = P_g + P_{gM} \quad (11)$$

Da bi gubici odgovarali nazivnom pogonskom stanju generatora, treba udesiti napon prema (8), a struje tako da bude srednja vrijednost jednaka nazivnoj struji :

$$\frac{I_G + I_M}{2} = I_n \quad (12)$$

Gubitke za nazivno pogonsko stanje motora dobivamo mjerenjem uz napon U prema (9). Uzbudne gubitke i ovdje računamo odvojeno.

Ako upotrebljavamo povratni rad da bi ispitati zagrijavanje bilo u generatorskom, bilo u motorskom radu, onda nije potrebno da srednja vrijednost gubitaka obaju strojeva odgovara genera-



Sl. 5-86

torskom ili motorskom pogonskom stanju. Dovoljno je stroj koji ispitujemo - generator ili motor - opteretiti nazivnom strujom, i udesiti na stezaljkama nazivni napon, sve, naravno, pri nazivnoj brzini vrtnje.

5.6.7 Zagrijavanje. Zagrijavanje pojedinih namota može se kod istosmjernih strojeva mjeriti iz povećanja otpora. Kontrola otpora svih namota statora može se vršiti bez prekidanja pogona. Namot armature zahtijeva obustavljanje pogona i mjerenje otpora, ili mjerenje termometrom, pri čemu se dopuštена zagrijavanja za obe metode razlikuju, i vide iz tabele 3.8.1. U pogledu zagrijavanja vrijedi inače ono što je izloženo u poglavlju 3.8.

5.7. Tolerancije

Prema IEC preporukama za istosmjerne strojeve važe tolerancije prema tabeli 5.6-2

T a b e l a 5.6-2

Garantirana vrijednost	Dopušteno odstupanje
1. Korisnost -metodom pojedinačnih gubitaka - metodom ulazne i izlazne snage	- 10 % od $(1-\eta)$ - 15 % od $(1-\eta)$ ali najmanje 0,7 %
2. Ukupni gubici	+ 10 %
3. Brzina porednih istosmjernih motora kod punog opterećenja, u toplom stanju	$0,67 \leq P < 2,5$ $\frac{P}{1000 \text{ o/min}}$ $\pm 10 \%$ $2,5 \leq P < 10$ " $\pm 7,5 \%$ $10 \leq P$ " $\pm 5 \%$
4. Brzina serijskih istosmjernih motora kod punog opterećenja, u toplom stanju	$0,67 \leq P < 2,5$ " $\pm 15 \%$ $2,5 \leq P < 10$ " $\pm 10 \%$ $10 \leq P$ " $\pm 7,5 \%$
5. Regulacija napona porednog generatora prema (5) u 5.4.2	$\pm 20 \%$ garantirane vrijednosti
6. Regulacija napona kompaundnog generatora	$\pm 20 \%$ garantirane regulacije, ali bar 2 % nazivnog napona, i to za najveće odstupanje od linearno interpolirane vrijednosti između garantiranog napona u praznom hodu i pri punom teretu
7. Varijacija brzine porednog ili kompaundnog motora od praznog hoda do punog opterećenja	$\pm 20 \%$ garantirane varijacije, ali bar $\pm 0,2 \%$ nazivne brzine

I d i o

S a d r Ź a j

strana

I dio

1. Uvod	1
1.1 Predmet i svrha ispitivanja	1
1.2 Pravila, propisi i standardi	2
1.3 Organizacija ispitivanja	3
1.4 Tačnost mjerenja i izbor instrumenata	4
1.5 Grafičko prikazivanje	9
2. Ispitivanje transformatora	11
2.1 Program ispitivanja	11
2.2 Propisi za transformatore	12
2.3 Ispitivanja u toku fabrikacije	12
2.3.1 Ispitivanje jezgre bez namota	
2.3.2 Ispitivanje svitaka	
2.3.3 Ispitivanje namotane jezgre	
2.3.4 Ispitivanje ulja	
2.4. Mjerenje otpora namota	19
2.4.1 Utjecaj predotpora	
2.4.2 Utjecaj kratkog spoja drugih namota	
2.4.3 Utjecaj spoja transformatora	
2.4.4 Utjecaj rasipanja	
2.4.5 Provedba mjerenja	
2.5 Mjerenje prijenosnog omjera	32
2.5.1 Prijenosni omjer i struja izjednačenja	
2.5.2 Tačnost mjerenja	
2.5.3 Utjecaj napona mjerenja	
2.5.4 Utjecaj nesimetrije tokova kod trofaznih transformatora	
2.5.5 Voltmetarska metoda	
2.5.6 Metoda standardnog transformatora	
2.5.7 Potenciometarska metoda	
2.5.8 Uredjaj za mjerenje prijenosnog omjera	

2.6	Mjerenje grupe spoja	44
2.6.1	Kontrola pri mjerenju prijenosnog omjera	
2.6.2	Kontrola grupe spoja voltmetrom	
2.6.3	Mjerenje uz upotrebu mjernog transformatora	
2.6.4	Kontrola medjutransformatora	
2.7	Mjerenja u praznom hodu	49
2.7.1	Mjerenje snage u praznom hodu	
2.7.2	Utjecaj nesimetrija	
2.7.3	Utjecaj nesinusnog napona	
2.8	Mjerenja u kratkom spoju	68
2.8.1	Provedba uobičajenih mjerenja	
2.8.2	Impedancija transformatora	
2.8.3	Gubici uzrokovani strujom opterećenja	
2.8.4	Preračunavanje na toplo stanje	
2.8.5	Mjerenje nulreaktancije	
2.8.6	Transformator u štednom spoju	
2.8.7	Otpornost protiv kratkog spoja	
2.9	Mjerenje zagrijavanja	80
2.9.1	Opterećenje u umjetnim spojevima	
2.9.2	Opterećenje u povratnom radu	
2.9.3	Opterećenje u kratkom spoju	
2.9.4	Mjerenje temperatura	
2.9.5	Odredjivanje toplog otpora ekstrapolacijom	
2.9.6	Odredjivanje konačnog zagrijanja	
2.9.7	Mjerenje zagrijanja u pogonu	
2.10	Ispitivanje izolacije	94
2.10.1	Ispitivanje stranim naponom	
2.10.2	Ispitivanje udarnim naponom	
2.10.3	Ispitivanje induciranim naponom	
2.10.4	Ispitivanje provodnika	
2.10.5	Ponevljena ispitivanja	
2.11	Ostala ispitivanja	106
2.12	Tolerancije	108

II dio

II dio

strana

3. Ispitivanje sinhronog stroja	1
3.1 Ispitivanje u toku fabrikacije	1
3.1.1 Ulazna kontrola	
3.1.2 Ispitivanje statorskog paketa.	
3.1.3 Ispitivanje izolacije svitla	
3.1.4 Princip statičkog i dinamičkog balansiranja	
3.1.5 Specijalni slučajevi balansiranja	
3.1.6 Mjerenje vibracija.	
3.1.7 Balansiranje bez posebnih uredjaja	
3.1.8 Dopuštena veličina vibracija	
3.1.9 Balansiranje u više ravnina	
3.1.10 Pokus vitlanja	
3.2 Puštanje u pogon	15
3.2.1 Sušenje namota	
3.2.2 Kontrola stanja izolacije	
3.2.3 Naponski pokusi	
3.2.4 Pripreme za puštanje u pogon	
3.2.5 Kontrola uzбудnika	
3.2.6 Kontrola regulatora napona.	
3.2.7 Ispitivanje sinhronizacionog uredjaja	
3.2.8 Ležajne struje	
3.3 Ispitivanje u praznom hodu	27
3.3.1 Karakteristika praznog hoda	
3.3.2 Oblik krivulje napona	
3.3.3 Gubici u praznom hodu	
3.3.4 Generatorski postupak	
3.3.5 Motorski postupak	
3.4 Kratki spoj i reaktancije	33
3.4.1 Jednofazni "idealni" kratki spoj	
3.4.2 Istosmjerna komponenta	
3.4.3 Trofazni kratki spoj	
3.4.4 Utjecaj prigušnog namota	
3.4.5 Utjecaj radnog otpora	
3.4.6 Reaktancije	
3.4.7 Reduciranje veličina na uzdužne i poprečne komponente	

- 3.4.8 Magnetski tokovi i naponske strana
jednadžbe
- 3.4.9 Uvjeti udarnog kratkog spoja
- 3.4.10 Struje i reaktancije
- 3.4.11 Analiza oscilograma udarnog kratkog spoja
- 3.4.12 Istosmjerna komponenta kod troleznog kratkog spoja
- 3.4.13 Uzbudna struja
- 3.4.14 Provedba mjerenja
- 3.4.15 Utjecaj zasićenja
- 3.4.16 Relativne i postotne reaktancije
- 3.4.17 Sinhrona reaktancija
- 3.4.18 Određjivanje iz mjerenja u praznom hodu i kratkom spoju
- 3.4.19 Mjerenje narinutim naponom
- 3.4.20 Mjerenje reverziranjem uzbuđe
- 3.4.21 Mjerenje početnih reaktancija pri mirnom rotoru
- 3.4.22 Mjerenje bez postavljanja rotora u određeni položaj
- 3.4.23 Korekcija zbog radnog otpora
- 3.4.24 Prolazna reaktancija
- 3.4.25 Inverzna reaktancija
- 3.4.26 Dvopolni kratki spoj
- 3.4.27 Određjivanje inverzne reaktancije iz dvopolnog udarnog kratkog spoja
- 3.4.28 Nul-reaktancija
- 3.4.29 Jednopolni kratki spoj prema zvjezdistu
- 3.4.30 Karakteristike trajnog kratkog spoja
- 3.4.31 Udarni i trajni kratki spoj
- 3.4.32 Rasipna reaktancija
- 3.4.33 Gubici u kratkom spoju
- 3.4.34 Mjerenje gubitaka

3.5 Uzbuda

73

- 3.5.1 Karakteristične vrijednosti
- 3.5.2 Određjivanje nazivne uzbuđne struje
- 3.5.3 Promjena napona
- 3.5.4 Obilatoost uzbuđe

3.6	Mehaničke karakteristike	79
3.6.1	Čvrstoća sinhronog stroja	
3.6.2	Zamašni moment	
3.6.3	Pokus zaustavljanja	
3.6.4	Momenti sinhronog stroja	
3.6.5	Pokus zaleta	
3.6.6	Vlastita frekvencija titranja	
3.7	Rad na mrežu	92
3.7.1	Područje rada i geometrijska mjesta karakterističnih veličina	
3.7.2	Uzbudna struja u dijagramu	
3.7.3	Granica stabilnosti	
3.7.4	Karakteristike konstantne uzbude	
3.7.5	Karakteristike regulacije	
3.7.6	Karakteristike regulacije uz konstantnu uzbudnu struju	
3.7.7	V-krivulje	
3.7.8	Medjusobna veza	
3.8	Zagrijavanje i hladjenje	102
3.8.1	Termometri	
3.8.2	Termoelementi	
3.8.3	Otpornički termometri	
3.8.4	Odredjivanje temperature iz otpora namota	
3.8.5	Propisi	
3.8.6	Metode opterećenja	
3.8.7	Zagrijavanje iz praznog hoda i kratkog spoja	
3.8.8	Mjerenje protoka vode	
3.8.9	Mjerenje količine rashladnog zraka	
3.8.10	Kontrola rezultata	
3.8.11	Pogonski dijagram	
3.9	Gubici i korisnost	119
3.9.1	Metode odredjivanja korisnosti	
3.9.2	Podjela gubitaka sinhronog stroja	
3.9.3	Odredjivanje pojedinačnih gubitaka	
3.9.4	Odredjivanje gubitaka iz pokusa zaustavljanja	
3.9.5	Kalorimetrička metoda odredjivanja gubitaka	

III dio

4. Ispitivanja asinhronog stroja

- 4.1 Ispitivanje u toku proizvodnje 1
 - 4.1.1 Kontrola namota
 - 4.1.2 Kontrola mehaničkog rada
 - 4.1.3 Kontrola rotora
- 4.2 Ispitivanje u praznom hodu 3.
 - 4.2.1 Prijenosni omjer
 - 4.2.2 Karakteristika zasićenja
 - 4.2.3 Prazni hod pri sniženom naponu
 - 4.2.4 Kontrola zračnog raspora
 - 4.2.5 Utjecaj frekvencije
 - 4.2.6 Gubici u praznom hodu
 - 4.2.7 Idealni prazni hod
 - 4.2.8 Razdvajanje gubitaka praznog hoda
 - 4.2.9 Utjecaj frekvencije na gubitke
- 4.3 Ispitivanje u kratkom spoju 22
 - 4.3.1 Statičke i dinamičke pojave u kratkom spoju
 - 4.3.2 Struja kratkog spoja
 - 4.3.3 Potezni moment
 - 4.3.4 Korekcija poteznog momenta i struje
- 4.4 Opterećenje asinhronog motora 36
 - 4.4.1 Snimanje karakteristika opterećenja
 - 4.4.2 Mjerenje klizanja
 - 4.4.3 Metode opterećenja
 - 4.4.4 Kočnice
 - 4.4.5 Generator za opterećenje
 - 4.4.6 Dinamo-vaga
 - 4.4.7 Mjerenje momenta
 - 4.4.8 Mjerenje momenta vaganjem na statoru
 - 4.4.9 Moment iz direktnog mjerenja ubrzanja
 - 4.4.10 Indirektno određivanje momenta iz mjerenja brzine $n = f(t)$
 - 4.4.11 Određivanje momenta brojanjem okretaja i dvostrukim diferenciranjem

4.5	Gubici	73
4.5.1	Energetika bilansa	
4.5.2	Gubici prema propisima	
4.5.3	Odredjivanje dodatnih gubitaka	
4.5.4	Korisnost	
4.6	Zagrijavanje asinhronog stroja	83
4.6.1	Mjerenje zagrijanja statora	
4.6.2	Mjerenje zagrijanja rotora	
4.6.3	Opterećenje	
4.6.4	Termička granična snaga	
4.7	Podaci natpisne pločice	86
4.7.1	Nazivna snaga	
4.7.2	Rotorski podaci	
4.7.3	Tolerancije	
4.8	Mjerenje šumova	88
4.8.1	Uzroci šuma	
4.8.2	Definicije	
4.8.3	Metode mjerenja	
4.8.4	Provedba mjerenja	
4.8.5	Utjecaj prostoriije	
5.	Ispitivanje istosmjernog stroja	93
5.1	Ispitivanje u toku proizvodnje	93
5.1.1	Kontrola rotorskog namota	
5.1.2	Kontrola statorskih namota	
5.1.3	Naponski pokusi	
5.1.4	Oznake stezaljki i spajanje	
5.1.5	Odredjivanje neutralne zone	
5.2	Prazni hod i kratki spoj	107
5.2.1	Karakteristike praznog hoda	
5.2.2	Stabilnost samouzbuđe	
5.2.3	Valovitost napona	
5.2.4	Krivulja polja u rasporu	
5.2.5	Korekcija raspore glavnih polova	
5.2.6	Kratki spoj	

5.3	Reakcija armature	123
5.3.1	Zasićenje u polovima	
5.3.2	Pomak četkica	
5.3.3	Utjecaj pomoćnih polova	
5.3.4	I-linije	
5.4	Karakteristike	137
5.4.1	Karakteristike zasićenja	
5.4.2	Vanjska i unutarnja karakteristika	
5.4.3	Karakteristike regulacije	
5.4.4	Karakteristika brzine vrtnje	
5.4.5	Paralelni rad	
5.4.6	Karakteristike serijskog stroja	
5.4.7	Karakteristika momenta	
5.4.8	Karakteristika uzbuđnika	
5.4.9	Dinamičke karakteristike	
5.4.10	Preopterećenost	
5.5	Komutacija	159
5.5.1	Mehaničke greške	
5.5.2	Električne greške	
5.5.3	Krivulja napona četkice	
5.5.4	Odredjivanje crnog pojasa	
5.5.5	Udešavanje pomoćnih polova	
5.5.6	Komutacija kod prelaznih pojava	
5.6	Gubici i zagrijavanje	174
5.6.1	Podjela gubitaka	
5.6.2	Odredjivanje gubitaka	
5.6.3	Baždarenje istosmjernog stroja	
5.6.4	Mjerenje otpora armature	
5.6.5	Korisnost	
5.6.6	Metode opterećenja	
5.6.7	Zagrijavanje	
5.7	Tolerancije	188

PROSTOR ZA UNOŠENJE ISPRAVAKA

strana

red

piše

treba pisati

