

S V E U Č I L I Š T E U Z A G R E B U

Dr ing. RADENKO WOLF

ISPITIVANJE ELEKTRIČKIH STROJEVA

II



ZAGREB 1964

S V E U Č I L I Š T E U Z A G R E B U

Dr ing. RADENKO WOLF

ISPITIVANJE ELEKTRIČKIH STROJEVA

II



ZAGREB 1964

~~Odobreno rješenje~~ Komisije za udžbenike i skripta Sveučilišta u Zagrebu
broj 09-1434/1 od 13. VI 1963.

Cijena za studente Sveučilišta u Zagrebu
Din 390—

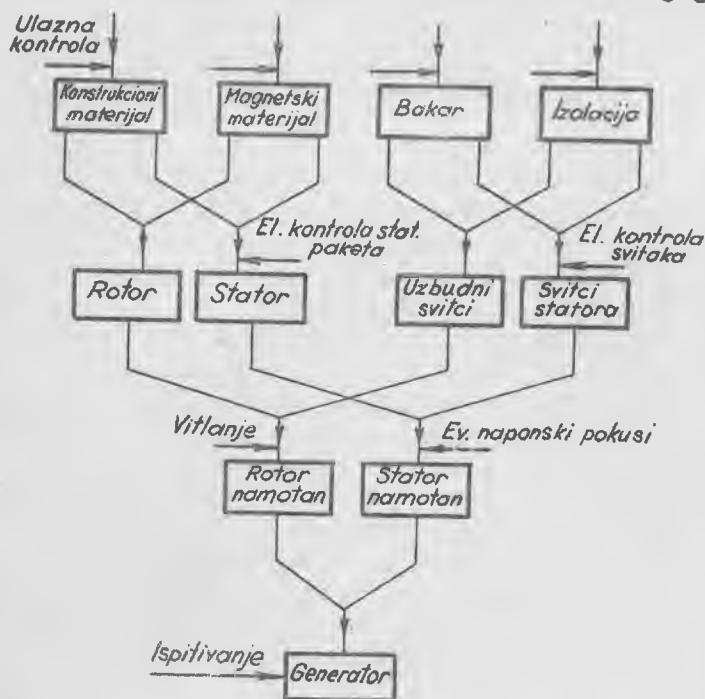
Umnoženo u Praktikumu Zavoda za kartografiju i reprodukciju karata.
Geodetski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26

Broj 456

3. Ispitivanje sinhronog stroja

3.1 Ispitivanje u toku fabrikacije

Što je veći stroj koji gradimo, to je važnije da neprekidnom kontrolom od samog početka fabrikacije izbjegnemo sve greške, koje bi mogle utjecati na funkciju gotovog stroja. Sl.3-1 prikazuje shematski tok fabrikacije i glavne tačke kontrole u toku fabrikacije. Izostavljena je kontrola dimenzija, koja se neprestano vrši u toku mehaničke izrade.



Sl.3-1

zaista onakvi, kao što to konstrukcija predviđa. Pošto se radi o objektima velike vrijednosti, primjenjuju se i relativno skupe metode ispitivanja, samo da se postigne što veća sigurnost. To su s jedne strane ispitivanja, koja ne oštećuju materijal, kao npr. rentgenografska, ultrazvučna, magnetska i radijaciona i sl., a s druge strane tehnološke probe i ispitivanja strukture na uzorcima materijala, koji su izvadjeni na odgovarajućim mjestima odljeva ili otkova, prije njegove konačne obrade. Kombinacijom jednih i drugih ispitivanja nastojimo postići maksimalno moguću sigurnost i pronaći eventualne greške materijala još prije obrade i ugradnje. Magnetske materijale ispitujemo u pogledu krivulje magnetiziranja. Kod limova pridolazi k tome ispitivanje specifičnih gubitaka kod izmjeničnog magnetiziranja, kontrola površinske izolacije lima, te mehaničkih svojstava, kao obradivosti, glatkoće površine, deformiranosti itd. Kontrola bakra obuhvaća osim vodljivosti i mehaničkih svojstava osobito ispravnost dimenzija. Kod strojeva za viši napon treba osobito pripaziti na ispravnu zaobljenost bridova bakrenog profila, jer oštri bridovi mogu iz mehaničkih i iz električkih razloga uzrokovati proboje.

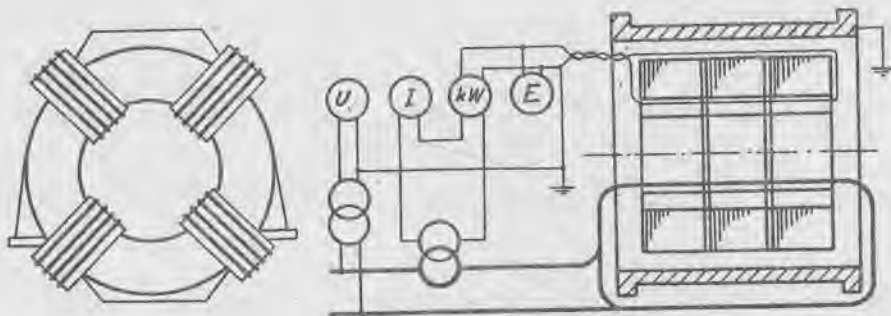
Izolacioni materijali treba da zadovolje zahtjeve na izolaciona svojstva, kao i na mehanička svojstva i točne dimenzije. Pri tom je osobito važno, da bude garantiran kontinuitet u kvaliteti, jer kvaliteta izolacije stroja ne ovisi o prosječnim vrijednostima izolacionih svojstava čitavog namota, već o izolaciji na najslabijem mjestu. Dovoljno je da bude i najmanja količina izolacionog materijala loša, pa da

3.1.1 Ulazna kontrola osigurava ispravnost i kvalitetu osnovnih materijala: konstrukcijskih materijala, magnetskih materijala, bakra i izolacionih materijala. Kontrola konstrukcijskih materijala vrlo je važna upravo kod sinhronih strojeva, jer je kod velikih jedinica konstrukter često prisiljen predvidjeti visoka mehanička naprezanja u rotoru uslijed centrifugalnih sila, pa je osobito važno da struktura i čvrstoća upotrebljenog materijala budu

ugrozi funkciju stroja. Ispitivanja se vrše na većem broju nasumce odabranih uzoraka, te ako se pojave znaci da je materijal nepouzdan, odbacuje se čitava pošiljka.

3.1.2 Ispitivanje statorskog paketa. Kad je statorski paket limova složen, treba provjeriti, slično kao kod transformatora (vidi sl.2.3.1), da nema kratkospojnih putova, kojima bi se struje zatvarale oko magnetskog toka u jezgri. Ovakvi kratki spojevi mogu nastati uslijed spoja među limovima, kao i uslijed loše izvedenih konstruktivnih učvršćenja paketa i sl.

Kod transformatora bilo je jednostavno omotati oko stupova jezgre nekoliko pomoćnih zavoja, kojima se jezgra mogla uzбудiti do predviđene indukcije. Kod statorskog paketa sinhronog stroja to nije tako jednostavno. Da bi dobili magnetske prilike slične onima u pogonu, morali bi staviti porazdijeljeni namot u utore statora, a rotor nadomjestiti lameliranom jezgrom, ili bi trebalo ugraditi i zavrtiti pravi rotor, i istosmjernom uzbuđom rotora uzbuditi stator do nominalne indukcije. I jedno i drugo zahtijeva toliko troška i vremena, da je probitačnije odgoditi takovo ispitivanje za kasniju fazu, kad se budu vršila ispitivanja u praznom hodu gotovog stroja. Ipak se može već ranije otkloniti grube kvarove, ako se oko statorskog jarma omota provizorni namot prema sl.3-2. Ovakovim namotom može se uzbuditi projektom predviđena indukcija u jarmu. Zubi ostaju praktički neuzbudjeni. Kako se opasnost od kratkog spoja u paketu (vidi izlaganja u 2.3.1) naglo povećava kad je veći tok, koji je obuhvaćen kratkospojnim zavojem, očito je, da eventualni spoj unutar pojedinog zuba



Sl. 3-2

ne predstavlja ni izdaleka toliku opasnost, kao spoj unutar jarma. Ovim vrlo jednostavnim ispitivanjem postigli smo dakle gotovo istu sigurnost, kao što bi je postigli znatno skupljim i kompliciranijim oponašanjem stvarnih magnetskih prilika u stroju. Samo mjerenje izvodi se prema sl.3-2 tako, da se osim uzbuđnog namota na jaram namota još jedan mjerni namot, s pomoću kojega mjerimo inducirani napon E , i preko njega indukciju u jarmu B_j :

$$B_j = \frac{E}{4,44 \cdot S_j \cdot f \cdot w_{mj}} \quad (1)$$

gdje je S_j = presjek jarma u m^2 , f = frekvencija narinutog napona, w_{mj} = broj zavoja mjernog namota. Istovremeno mjerimo gubitke u jarmu tako, da vatmetar priključimo strujnom granom u krug uzbudnog namota, a naponskom granom na napon mjernog namota. Napon treba preračunati na broj zavoja uzbudnog namota, kojemu se dovodi energija, tako da gubitke treba računati iz očitavanja vatmetra P_{mj}

$$P_g = P_{mj} \frac{w}{w_{mj}} \cdot k_A \quad (2)$$

gdje je w = broj zavoja uzbudnog namota, w_{mj} = broj zavoja mjernog namota, k_A = prenosni omjer upotrebljenog strujnog transformatora. Ako se ovako mjerene gubitke približno podudaraju s računski dobivenim vrijednostima, i ako provjeravanje rukom i termometrom ne pokazuje nikakvih povećanih lokalnih zagrijavanja, statorski paket se može smatrati ispravnim. Ako se pak pokaže greška, popravak se može izvršiti znatno brže i jeftinije nego u slučaju gotovog stroja, gdje bi trebalo vaditi gotov namot, i pri tome oštetiti izolaciju.

3.1.3 Ispitivanje izolacije svitka. Kod strojeva za viši napon ispituju se u toku fabrikacije i pojedini izolirani štapovi odnosno svitci prije ulaganja u stator. Uz najbolje izolacione materijale može se dogoditi, da se pri tehnološkom procesu uvuku sitne omaške, uslijed kojih je smanjena izolaciona moć ljuske štapa ili svitka. Tako npr. onečišćenje izolacije, nepotpuno slijepljeni slojevi sa zračnim medjuprostorima, pogrešne temperature pri obradi i sl. mogu pokvariti izolaciju. Da bi takve defektne štapove ili svitke prošli prije ulaganja u utore i spajanja, provodimo na njima naponske pokuse. U tu svrhu onaj dio štapa ili svitka, koji će doći u utor, ovijemo tankom metalnom folijom, koja se priljubljuje uz površinu izolacione ljuske, pa između tog ovoja i bakrenog vodiča narinemo izmjenični ispitni napon, obično u punom iznosu, koji je predviđen za naponsko ispitivanje čitavog namota. Detaljniji uvid u stanje izolacije pruža nam mjerenje faktora gubitaka $\tan \delta$ visokonaponskim Scheringovim mostom. Faktor $\tan \delta$ ukazuje na veličinu dielektričkih gubitaka, pa znatna odstupanja od vrijednosti mjerenih na ostalim štapovima, ili nagli porast $\tan \delta$ s vremenom, ili diskontinuirane promjene mjerenih vrijednosti pokazuju, da izolacija nije u redu. Naponski pokusi na čitavom namotu provode se na dovršenom stroju, nakon provedenog sušenja. Obično se to radi prilikom puštanja u pogon.

3.1.4 Princip statičkog i dinamičkog balansiranja. Prije no što podvrgnemo dovršeni rotor ispitivanju mehaničke čvrstoće tzv. pokusom vitlanja, potrebno je provesti balansiranje rotora. Grubo uzeto, rotor je simetrično gradjen, pa si sve centrifugalne sile na pojedine dijelove drže medjusobno ravnotežu. Ipak, vrlo malene nesimetrije ne mogu se izbjeći. Ako na bilo kojem mjestu u udaljenosti r od osi rotacije postoji višak mase Δm (kg), naprama masi u istoj udaljenosti na suprotnoj strani, pri rotaciji kutnom brzinom ω djelovati će na taj višak mase radijalna centrifugalna sila F , koja nije uravnotežena nikakvom protusilom, veličine :

$$F = \Delta m \cdot r \cdot \omega^2 \quad (1)$$

Ako npr. računamo s promjerom turborotora od 1 m, onda pri brzini vrtnje od 3000 1/min, svaki gram mase na obodu rotora daje centrifugalnu silu :

$$\frac{1}{1000} \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2\pi \cdot 3000}{60} \right)^2 \approx 49 \text{ N} \approx 5 \text{ kp}$$

Ova sila nije uravnotežena, te se prenosi na ležaje u kojima se rotor vrti, a smjer sile rotira isto kao i rotor. Uslijed te sile koja rotira, u ležaju nastaje vibracija frekvencije :

$$f = n/60 \quad (2)$$

koja oštećuje ležaj, prenosi se na temelje, a u slučaju nešto veće neuravnoteženosti može vrlo brzo dovesti do loma osovine ili ležaja.

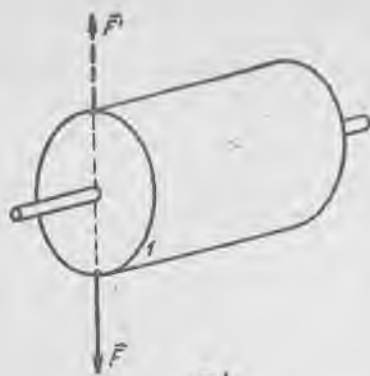
Najprimitivniji način balansiranja je tzv. "statičko balansiranje". Sastoji se u tome, da se rotor slobodno postavi u ležaje, ili se oba kraja osovine polože na dvije paralelne, horizontalne i glatko obrađene vodilice. Teža strana rotora okrenuti će se sama prema dolje, pa treba na suprotnoj strani umetnuti balansne utege u utore, koji su u tu svrhu predviđeni s obe čeonu strane rotora. Rotor je statički izbalansiran, kad ostaje miran u bilo kojem položaju. Osim neosjetljivosti uzrokovane trenjem u ležajima odnosno vodilicama, koja smanjuje točnost, postoji i drugi, principijelni razlog, zbog kojega statičko balansiranje ne može dati zadovoljavajuće rezultate - to manje, što je dužina rotora veća.

Na sl. 3-3a vidi se, da centrifugalnu silu F u tački 1 možemo uravnotežiti silom F' na suprotnoj strani, u istoj ravni okomitoj na osovini. Isto tako može se sila F statički uravnotežiti silom F' u drugoj ravni - npr. s druge čeonu strane rotora u tački 2 prema sl. 3-3b. Rotor će biti i u ovom slučaju statički u ravnoteži. Kod rotacije, međutim, sile F i F' dati će moment $M = F \cdot l$ u ravni koja prolazi kroz oba ležaja, i vrti se zajedno s rotorom. I opet će u ležajima nastati rotirajuće sile, koje stvaraju protumoment, a posljedica će biti i opet vibracije. Vidi se, da statičko balansiranje nije dovoljno, već treba provesti tzv. dinamičko balansiranje.

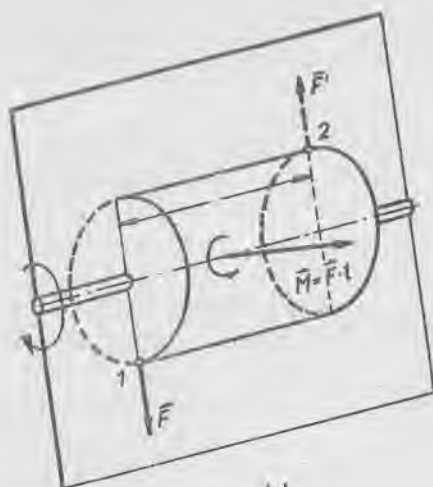
Ako su neizbalansirane centrifugalne sile rasporedjene u različitim presjecima i u različitim smjerovima, a želimo ih uravnotežiti silama u oba čeonu presjeka 1 i 2, možemo postaviti opće uvjete ravnoteže prema sl. 3-3c. Postavimo os z u smjeru osovine, a osi x i y u radijalnim smjerovima. Time su definirane ravni X, Y i Z . Ako sada prema sl. 3-3d projiciramo sve neuravnotežene sile u ravninu X i u ravninu Y , možemo lako naći ne samo njihovu rezultantu F_x odnosno F_y , već i protusile F_{x1} i F_{x2} , te F_{y1} i F_{y2} , koje će ne samo držati ravnotežu silama F_x i F_y , već takodjer i njihovim momentima, tako da budu ispunjeni uvjeti ravnoteže :

$$\begin{aligned} \sum (F)_x &= 0 & \sum (M)_x &= 0 \\ \sum (F)_y &= 0 & \sum (M)_y &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

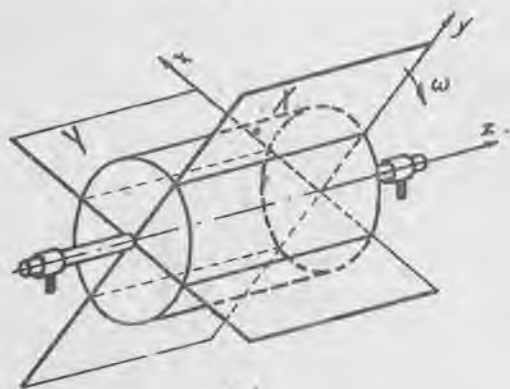
Protusile F_{x1} i F_{y1} mogu se u ravni Z_1 složiti u rezultantu F_1 , a isto tako protusile u ravni Z_2 u rezultantu F_2 . Dinamičko balansiranje može se dakle provesti po jednim protuutegom sa svake čeonu



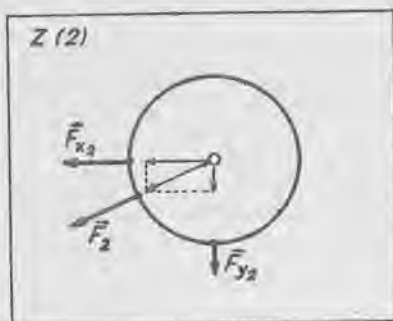
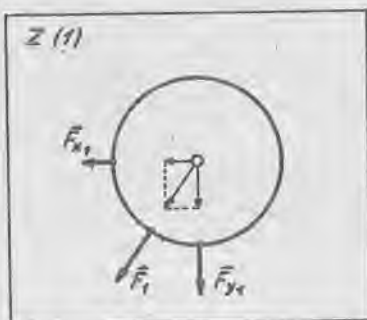
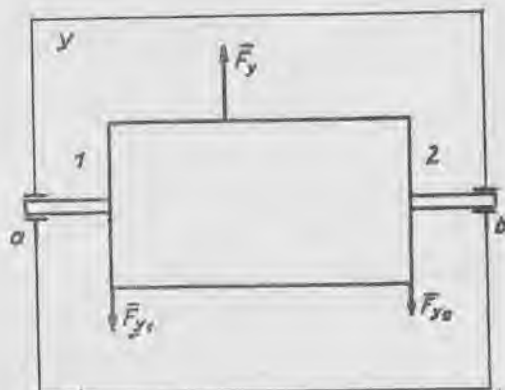
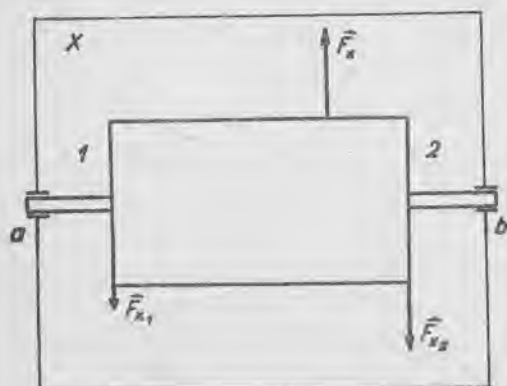
a)



b)



c)



d)

strane, samo treba pravu veličinu i pravi položaj protuntega odrediti za svaku čeonu stranu zasebno, i to ne statičkim, već dinamičkim postupkom.

Pri praktičkoj provedbi balansiranja treba držati na umu, da će svaka sila u ravnini balansiranja 1 izazvati vibracije na oba ležaja a i b, a isto tako i svaka sila u ravnini 2. Pošto ležajevi s postoljem predstavljaju elastični sistem, to se može dogoditi, da u blizini vlastite frekvencije sistema amplitude vibracije ne budu u fazi sa rotirajućom silom koja ih uzrokuje. Kod određene brzine, međutim, taj kut faznog pomaka je konstantan, a isto tako može se uzeti da su amplitude vibracija proporcionalne sili neuravnoteženosti. Može se, dakle, kod određene brzine uzeti da postoje vektorske konstante α_{a1} i α_{b1} , koje predstavljaju amplitudu i fazni kut amplitude vibracija na ležaju a odnosno na ležaju b uslijed jedinične sile u ravnini balansiranja 1, postavljene u položaj, koji na obodu rotora označimo proizvoljno sa "0". Isto tako postoje rotorske konstante α_{a2} i α_{b2} , koje definiraju upliv jedinične sile u ravnini balansiranja 2 u istom položaju "0". Te četiri vektorske konstante zovemo "dinamičkim uplivnim faktorima". Vibracije na ležaju a odnosno na ležaju b mogu se sada izraziti kao :

$$\bar{A} = \alpha_{a1} \cdot \bar{F}_1 + \alpha_{a2} \cdot \bar{F}_2 \quad (4)$$

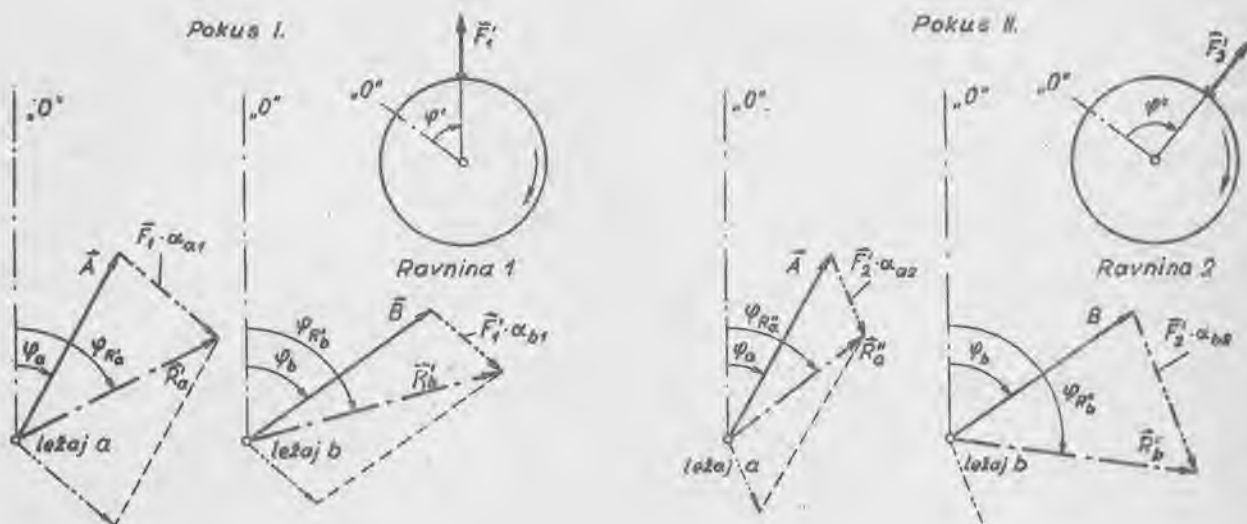
$$\bar{B} = \alpha_{b1} \cdot \bar{F}_1 + \alpha_{b2} \cdot \bar{F}_2 \quad (5)$$

gdje su $\bar{A} = A \cdot e^{j\varphi_a}$ i $\bar{B} = B \cdot e^{j\varphi_b}$ mjereni vektori vibracija na ležaju a odnosno b, definirani amplitudama i njihovim faznim kutom prema proizvoljnom času, npr. prema času prolaza položaja rotora označenog sa "0" kroz smjer mjerenja vibracije, a $\bar{F}_1 = F_1 \cdot e^{j\varphi_1}$ i $\bar{F}_2 = F_2 \cdot e^{j\varphi_2}$ rezultatne sile neuravnoteženosti u ravninama balansiranja 1 odnosno 2, izražene također vektorski.

Kad bi bili poznati dinamički uplivni faktori, trebalo bi samo izmjeriti fazni kut i amplitudu vibracija na oba ležaja, npr. u horizontalnom pravcu, pa bi se moglo iz gornjih jednažbi odrediti sile $\bar{F}_1$ i $\bar{F}_2$ po smjeru i veličini, i dodati za 180° dalje odgovarajući protunteg. Pošto obično uplivni faktori nisu poznati, treba ih odrediti iz dodatnih mjerenja. U tu svrhu dodamo, nakon što smo izmjerili vektore vibracija $\bar{A}$ i $\bar{B}$, proizvoljno dodatni uteg G_1 u ravnini 1 pod kutom φ' , koji uzrokuje centrifugalnu silu $\bar{F}'_1$, te izmjerimo nove rezultatne vibracije u oba ležaja $\bar{R}'_a$ i $\bar{R}'_b$ po veličini i faznom kutu (sl.3-4). Ako ucrtamo vektor $\bar{A}$ i vektor $\bar{R}'_a$, dobivamo drugu komponentu $\bar{F}'_1 \cdot \alpha_{a1}$, koja potječe od sile dodatnog utega $\bar{F}'_1$, pa možemo odrediti α_{a1} , isto tako iz vektora $\bar{B}$ i $\bar{R}'_b$ možemo odrediti $\bar{F}'_1 \cdot \alpha_{b1}$, te odatle α_{b1} . Sada izvršimo isto takav pokus s dodatnim utegom G_2 u ravnini 2 pod kutom φ'' , i na isti način odredimo α_{a2} i α_{b2} . Uz poznate uplivne faktore dobivamo sada sile neuravnoteženosti u obe ravnine balansiranja:

$$\bar{F}_1 = \frac{\bar{A} \cdot \alpha_{b2} - \bar{B} \cdot \alpha_{a2}}{\alpha_{a1} \cdot \alpha_{b2} - \alpha_{b1} \cdot \alpha_{a2}} = F_1 \cdot e^{j\varphi_1} \quad (6)$$

$$\bar{F}_2 = \frac{\bar{B} \cdot \alpha_{a1} - \bar{A} \cdot \alpha_{b1}}{\alpha_{a1} \cdot \alpha_{b2} - \alpha_{b1} \cdot \alpha_{a2}} = F_2 \cdot \varepsilon^{j\varphi_{F_2}} \quad (7)$$



Sl. 3-4

po veličini i po fazi. Veličina protuutega određena je dodatnim utezima G_1 i G_2 , kojima smo proizveli sile $\bar{F}_1'$ i $\bar{F}_2'$, i odnosima :

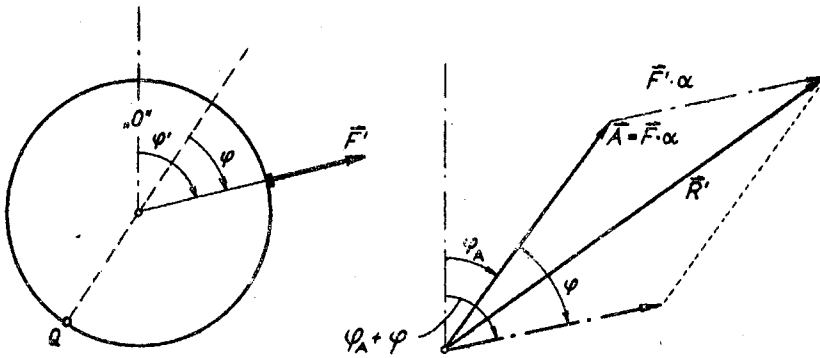
$$Q_1 = \frac{F_2}{F_1'} \cdot G_1 \quad (8)$$

$$Q_2 = \frac{F_1}{F_2'} \cdot G_2 \quad (9)$$

a kut pod kojim treba staviti utege pomaknut je za 180° prema kutu φ_{F1} u ravnini 1, odnosno prema kutu φ_{F2} u ravnini 2.

3.1.5 Specijalni slučajevi balansiranja. Na opisani način može se balansirati rotor u sasvim općenitom slučaju, pri oba ležaja elastična. U specijalnim slučajevima balansiranje postaje jednostavnije. Tako npr. kod kratkih strojeva ($l:D \leq 1:3$) dovoljno je izvršiti balansiranje u jednoj ravnini. Dovoljno je izmjeriti amplitudu i fazni kut vibracije $\bar{A}$ bez dodatnog utega, i rezultantne vibracije $\bar{R}'$ s dodatnim utegom G pod kutom φ' , prema položaju rotora "0". Iz dijagrama sila na sl.3-5 dobivamo komponentu $\bar{F}' \cdot \alpha$, koja odgovara utegu G . Očitamo veličinu F' i kut φ između $\bar{F}' \cdot \alpha$

i $\bar{A} = \bar{F} \cdot \alpha$. Za isti taj kut pomaknemo na obodu rotora smjer sile $\bar{F}'$, pa dobivamo smjer sile neuravnoteženosti $\bar{F}$. Nasuprot to-



Sl.3-5

me mjestu treba dodati uteg Q veličine :

$$Q = G \frac{F}{F'} \quad (1)$$

Pri gradnji specijalnih uređaja za balansiranje može se postupak pojednostavniti time, što se oba elastična ležaja povežu na kruti okvir ili gredu, koja ima okretište udesivo tako, da se ono može postaviti u jednu ili drugu ravninu balansiranja (sl. 3-6). Sile u ravnini balansiranja nad samim okretištem nemaju utjecaja na sile odnosno vibracije ni jednog ni drugog ležaja, pa će za slučaj okretišta u ravnini 1 biti :

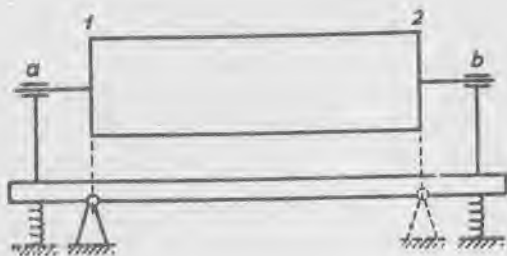
$$\begin{aligned} \alpha_{a1} &= \alpha_{b1} = 0 \\ \bar{A}' &= \alpha_{a2} \cdot \bar{F}_2 \\ \bar{B}' &= \alpha_{b2} \cdot \bar{F}_2 \end{aligned} \quad (2)$$

Isto tako će biti za slučaj okretišta u ravnini balansiranja 2 :

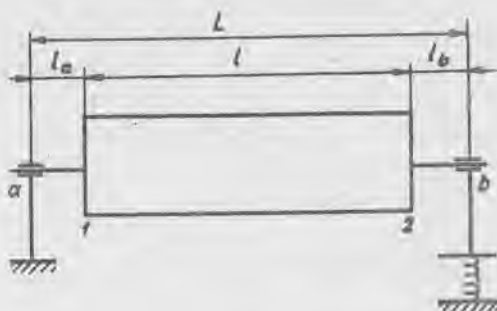
$$\begin{aligned} \alpha_{a2} &= \alpha_{b2} = 0 \\ \bar{A}'' &= \alpha_{a1} \cdot \bar{F}_1 \\ \bar{B}'' &= \alpha_{b1} \cdot \bar{F}_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Dodavanjem utega u ravnini 2 dobiva se pri okretištu u ravnini 1 odmah korekcionni uteg Q_a'' i Q_b'' koji korigira neuravnoteženost $\bar{F}_2$ obzirom na ležaj a odnosno ležaj b , istim postupkom kao pri balansiranju u jednoj ravnini. To isto ponovimo uz okretište u ravnini 2, pa dobivamo korekcijske utege Q_a' i Q_b' u ravnini 1. Time je računanje znatno skraćeno.

Slično se može pojednostavniti balansiranje ukrućivanjem prvo jednog, pa onda drugog ležaja. Ako je npr. prema sl. 3-7 ukrućen ležaj a , pa odredimo uteg Q'' u ravnini 2 kojim su vibracije u ležaju b svedene na nulu postupkom balansiranja u jednoj ravni-



Sl.3-6



Sl.3-7

ni, onda bi između konačnih utega u obe ravnine $\bar{Q}_1$ i $\bar{Q}_2$ i ovog utega $\bar{Q}''$ vrijedio odnos :

$$\bar{Q}''(l+l_a) = \bar{Q}_1 \cdot l_a + \bar{Q}_2 \cdot (l+l_a) \quad (4)$$

Isto tako izmjerimo uz ukrućen ležaj b uteg $\bar{Q}'$ u ravni 1, pa možemo napisati relaciju :

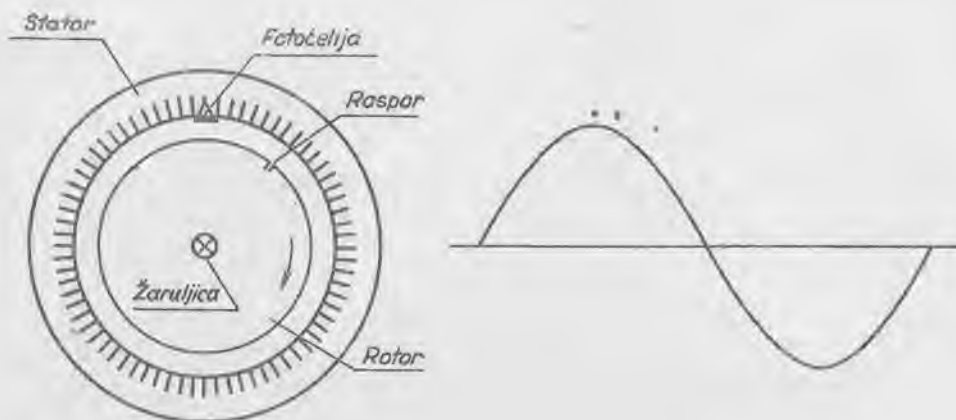
$$\bar{Q}'(l+l_b) = \bar{Q}_1 \cdot (l+l_b) + \bar{Q}_2 \cdot l_b \quad (5)$$

Iz ovih jednažbi može se odrediti $\bar{Q}_1$ i $\bar{Q}_2$, na osnovu balansiranja provedenih svaki puta u po jednoj ravni.

3.1.6 Mjerenje vibracija. Svi opisani postupci zahtijevaju ne samo mjerenje amplitude vibracija, već i faznog kuta vibracija, dakle određivanje položaja rotora u času kad pomak npr. horizontalnih vibracija dosegne maksimum. Za mjerenje amplitude vibracija postoje mnogobrojni uređaji, koji se u osnovi svode na 2 principa rada : 1) mjerenje pomaka prema čvrstoj podlozi na koju je vibrograf montiran, preko ticala koje dodiruje i preuzima vibracije s ispitivanog objekta, i 2) mjerenje pomaka između ispitivanog objekta, na koji je vibrograf pričvršćen, i trome mase, koja je elastično smještena unutar vibrografa i zadržava svoje stanje mirovanja. U grupu 1) spadaju i uređaji, koje držimo u ruci, jer su pomaci ruke tako spori prema mjerenim vibracijama, da ne kvare rezultate. Ipak su prikladniji uređaji pod 2), jer najčešće nije moguće naći čvrstu podlogu u blizini stroja, koja ne bi vibrirala. Pomicanje između oba sistema - onog mirnog, i onog koji vibrira - mogu se prenositi i registrirati na različite načine, bilo mehaničkim putem, bilo da se povećanje otklona postiže preko zrcalca i svjetlosne zrake, bilo da se promjenom otpora, induktiviteta ili kapaciteta, ili induciranjem napona, vibracije odmah pretvaraju u električne veličine.

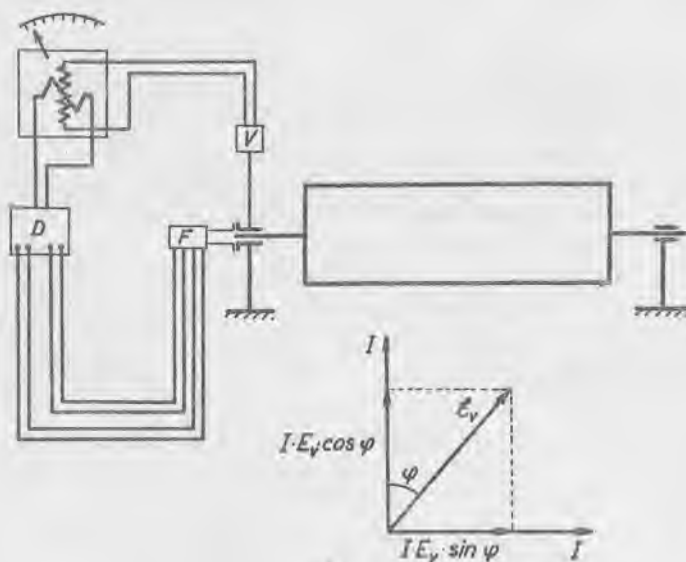
Pri traženju odnosa između položaja rotora i amplitude vibracija postoji takodjer mnogo sistema. Oni se mogu u osnovi podijeliti na stroboskopske, oscilografske i vatmetarske metode.

Kod stroboskopskih uređaja impuls koji daje vibrograf pri maksimalnoj amplitudi, ili pri prolazu kroz nulu, pali bljeskalicu, kojom rasvjetlimo rotor, na čijem smo obodu napisali brojeve. Pod bljeskovima stroboskopske svjetiljke možemo dakle očitati broj na obodu rotora, koji se nalazi na određenom mjestu u času, kad vibracija postiže svoju amplitudu, a time je određen položaj rotora. Isto se može postići, ako za palenje stroboskopa služi kontakt vezan s osovinom rotora.



Sl. 3-8

Kod oscillografskih sistema vibrometar daje sliku vibracija na ekranu oscillografa. Povrh toga davač faze daje impuls pri svakom okretanju, koji se registrira kao svijetla tačka na ekranu. Davač se može izvesti kao kontakt vezan s osovinom, ili kao šuplji cilindar s uskim rasporom, koji rotira s rotorom, a u kojemu je



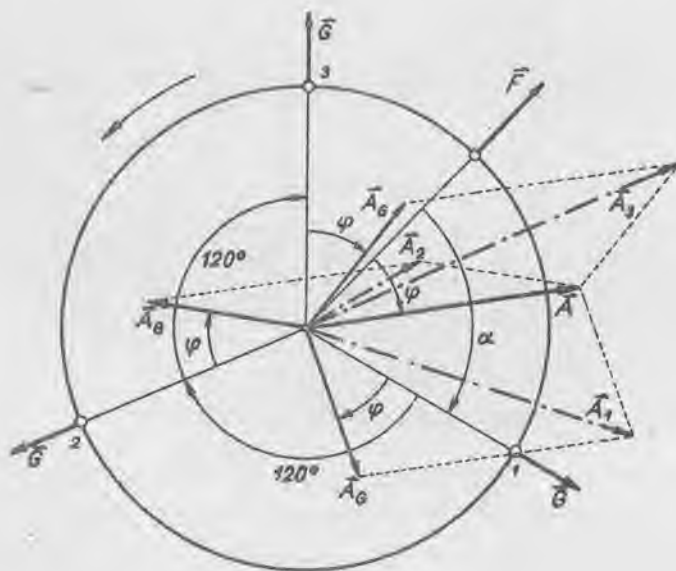
Sl. 3-9

žaruljica. Na mirnom statoru izvana je fotoćelija, koja daje impuls kod svakog prolaza raspora. Položaj statora može se zakretati tako da impuls padne u amplitudu vibracija, a na skali se taj položaj može očitati (sl.3-8).

Mana je svih ovih uređaja, da je kod vibracija s mnogo viših harmoničkih članova teško odrediti fazni položaj osnovnog člana. Ta je poteškoća izbjegnuta kod vatmetarske metode (sl.3-9). Na osovini mjerenog rotora nalazi se davač faze. To je mali generator sinusnog napona, koji može biti izveden tako, da se stator daje zakretati uz očitavanje kuta zakreta, ili pak tako, da ima 2 namota smještena pod kutom od 90° . Preklopom se može dovesti u strujnu granu vatmetra struja jedne ili druge grane davača. Na naponsku granu vatmetra dovodimo napon E_v iz vibrografa. Prema položaju preklopke vatmetar će pokazati $I \cdot E_v \cdot \cos \varphi$ odnosno $I \cdot E_v \cdot \sin \varphi$, a kako je struja I ista u oba slučaja, dobili smo obe komponente $E_v \cos \varphi$ i $E_v \sin \varphi$, koje određuju i veličinu i položaj napona na vibrografu, i to samo njegovog osnovnog harmoničkog člana.

3.1.7 Balansiranje bez posebnih uređaja. Često treba provesti balansiranje bez uređaja za mjerenje faznog kuta. Najstariji je postupak zacrtavanja. Ako su ležaji dovoljno elastični, može se osovina pobijeliti na pr. cinkovim bjelilom, i približiti joj dobro zašiljenu olovku, koja će zacrtati trag na mjestu amplitude vibracija. Pošto ova amplituda redovno zacrtaje za smjerom sile neuravnoteženosti, treba izvesti još jedno zacrtavanje sa suprotnim smjerom vrtnje. U sredini između oba znaka, i to ispred svakog znaka u smjeru vrtnje, leži smjer suvišne mase, a nasuprot tome smjer u kojemu treba dodati uteg. Za ovo mjerenje potrebne su prilično velike amplitude, i tačno obradjena osovina.

Slijedeće mjerenje zahtijeva samo mogućnost očitavanja amplituda vibracija. Izmjerimo prema sl.3-10 amplitudu vibracija A zbog neurav-



Sl. 3-10

noteženosti F , a zatim dodamo uteg G prvo na mjestu 1, onda na mjestu 2 za 120° dalje, i na mjestu 3 za još 120° dalje, te izmjerimo u sva tri slučaja rezultirajuću amplitudu vibracija A_1, A_2, A_3 . Iz vektorskih dijagrama se vidi, da je :

$$A_1^2 = A^2 + A_G^2 + 2AA_G \cdot \cos \alpha$$

$$A_2^2 = A^2 + A_G^2 + 2AA_G \cdot \cos (\alpha + 120^\circ)$$

$$A_3^2 = A^2 + A_G^2 + 2AA_G \cdot \cos (\alpha + 240^\circ)$$

Zbrajanjem dobijemo : $A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 = 3A^2 + 3A_G^2$

i odavle :

$$A_G = \sqrt{\frac{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 - 3A^2}{3}} \quad (1)$$

$$\cos \alpha = \frac{A_1^2 - A^2 - A_G^2}{2AA_G} \quad (2)$$

Time je određeno mjerilo, a to znači i veličina potrebnog utega, jer će biti

$$Q = G \cdot \frac{A}{A_G} \quad (3)$$

dok kut α određuje smjer suvišne mase, koji je za α pomaknut prema prvom položaju 1 utega G .

3.1.8 Dopuštena veličina vibracija. Pošto vibracije ovise s jedne strane o uravnoteženosti stroja, a s druge strane o mnogo drugih faktora, kao što je elastičnost ležaja i postolja itd., ne može se tačno reći, do koje granice vibracije ne predstavljaju opasnost po stroj, ležaje i zgradu. Kao približna informacija mogu poslužiti podaci iz literature, po kojima se kao granične krivulje definiraju funkcije oblika :

$$A = \frac{K}{n} \quad (1)$$

gdje je A = amplituda vibracija u mikronima ($10^{-6}m$)

n = brzina vrtnje u 1/min

K = konstanta, koja iznosi približno :

12 000	za vrlo dobro uravnotežen stroj
24 000	za dobro uravnotežen stroj
36 000	za još dozvoljeno stanje uravnoteženosti
60 000	preporuča se popravak
120 000	potreban popravak
220 000	odmah potreban popravak

3.1.9 Balansiranje u više ravnina. Ako je rotor vrlo dugačak, može se dogoditi, da sam rotor nije dovoljno krut, pa uslijed toga dolazi do savijanja rotora unatoč toga, što je statički i dinamički izbalansiran u 2 ravnine. U tom slučaju treba pokušati daljnje balansiranje u ravninama između obe čeonice ravnine, sličnim mjerenjima i postupcima kao što su opisani. U stvari bi rotor bio potpuno balansiran tek onda, kad bi svaku suvišnu masu uspjeli balansirati protutegom u istoj ravnini.

3.1.10 Pokus vitlanja. Kad je provedeno balansiranje, može se pristupiti vitlanju rotora. Svrha je pokusa vitlanja, da provjeri mehaničku čvrstoću rotora u slučaju povećane brzine vrtnje, do koje može doći, ako naglo ispadne teret generatora, a turbinski regulator zataji. Brzina vitlanja iznosi :

za generatore

na pogon vodom turbinom	brzina pobjega turbine, ali najmanje 1,8 x nominalna brzina vrtnje
na pogon parnom turbinom	1,25 x nominalna brzina vrtnje
za svaki drugi pogon	1,2 x nominalna brzina vrtnje
za motore	1,2 x nominalna brzina vrtnje
za sinhronu kompenzatore	1,2 x nominalna brzina vrtnje

Kod pogona vodom turbinom računa se s tzv. brzinom pobjega turbine, tj. onom brzinom, kojom će se vrtiti turbina bez opterećenja, a s potpuno otvorenim privodom. Ta brzina određena je konstrukcijom turbine, i konstrukter generatora mora o njoj voditi računa. Praksa je pokazala, da pobjeg vodne turbine nije nipošto rijedak slučaj, pa je uza sve zaštite potrebno graditi generator i turbinu tako, da mogu izdržati povišena mehanička naprezanja, koja rastu proporcionalno s kvadratom povećanja brzine vrtnje. Kod parne turbine računamo s time, da je uređaj za brzo obustavljanje udešen na 1,1-struku nominalnu brzinu vrtnje, ali će nakon proradjivanja tog uređaja proteći još nešto vremena, dok se privod pare zatvori, pa će brzina još dalje porasti. Pokus vitlanja traje 2 minute, i smatra se da ga je stroj izdržao, ako se nakon toga ne nadju na stroju nikakve deformacije, i ako stroj nakon vitlanja izdrži naponske pokuse. U svakom slučaju, potrebno je da se naponski pokus na rotoru izvrši nakon vitlanja, jer za vrijeme vitlanja može doći do oštećenja izolacije. Naponski pokus među zavojima statora, koji zahtijeva povećanu frekvenciju, kako bi se mogao povisiti inducirani napon, može se izvesti zajedno s pokusom vitlanja, u toku postepenog snižavanja brzine nakon izdržanog pokusa.

U rotoru svakog velikog generatora pri nominalnoj brzini, a pogotovo pri povišenoj brzini, akumulirana je golemo količina kinetičke energije :

$$A = \frac{I\omega^2}{2} \quad (1)$$

Obično se u strojarstvu računa umjesto s momentom tromosti I (kgm^2) sa zamašnim momentom mD^2 , izraženim u kg x m^2

$$I = \frac{mD^2}{4} \quad (2)$$

a kutna brzina ω izražava se s pomoću brzine vrtnje n (1/min) :

$$\omega \left(\frac{1}{s} \right) = \frac{2\pi n}{60} \quad (3)$$

tako da se energija računa :

$$A = \frac{1}{2} \cdot \frac{mD^2}{4} \left(\frac{2\pi}{60} \right)^2 \cdot n^2 = 1370 \cdot mD^2 \left(\frac{n}{1000} \right)^2 [Ws] \quad (4)$$

Npr. hidrogenerator sa $mD^2 = 2000 \text{ tm}^2$ i nominalnom brzinom vrtnje 125 1/min ima u rotoru akumuliranu energiju :

$$A = 1370 \cdot 2000 \cdot 10^3 \left(\frac{125}{1000} \right)^2 = 41 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 41 \text{ MWs}$$

pri nominalnoj brzini vrtnje, a pri brzini pobjega od npr. $2,5 \times n_n$ biti će ta energija

$$A = 2,5^2 \cdot 41 = 260 \text{ MWs}$$

ili u slučaju turbogeneratorsa sa $mD^2 = 10 \text{ tm}^2$ i $n_n = 3000 \text{ 1/min}$ biti će pri nominalnoj brzini vrtnje :

$$A = 1370 \cdot 10 \cdot 10^3 \left(\frac{3000}{1000} \right)^2 = 123 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 123 \text{ MWs}$$

a pri brzini vitlanja $1,25 \times 3000 = 3750 \text{ 1/min}$ biti će energija :

$$A = 1,25^2 \cdot 123 = 192 \text{ MWs}$$

Kolike su to energije lakše si je predočiti, ako ih usporedimo npr. s kinetičkom energijom brzog vlaka mase 200 t, koji juri brzinom od 100 km/h = 28 m/s :

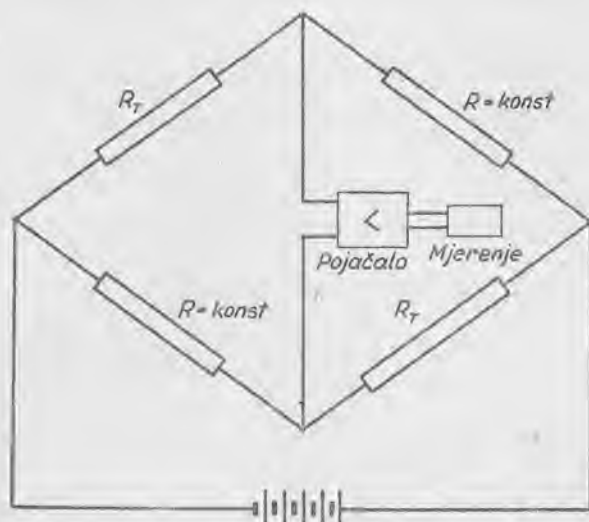
$$A = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2} \cdot 200 \cdot 10^3 \cdot 28^2 = 78 \cdot 10^6 \text{ Ws} = 78 \text{ MWs}$$

ili ako uočimo, da je potrebna energija kidanja za čelični štap dužine 1 m i presjeka 10 cm² približno jednaka 0,5 MWs.

Kraj ovakvih golemih količina akumulirane energije lako je zamisliti, kakove bi bile posljedice, kad bi rotor pri vitlanju popustio i razletio se - što se naziva "eksplozijom" rotora. Mali dio energije utrošio bi se na kidanje samog rotora, a ostatak na demoliranje okoline, sličnog učina, kao da su se 2-3 brza vlaka zaletila punom brzinom u čvrstu stijenu. Kako bi se smanjila opasnost po okolinu, a posebno po osoblje, vitlanje se normalno vrši u posebnoj jami za vitlanje, koja je građena i osigurana tako, da eventualno razaranja nastane samo na dijelovima, koje se može nadomjestiti - vrećama pijeska, betonskim blokovima, drvenim gradama i sl. Za turborotore, rotore horizontalnih strojeva i one rotore vertikalnih strojeva,

koji se mogu postaviti u horizontalne ležaje, grade se horizontalni tuneli za vitlanje, zaštićeni obilnim slojem betona i zemlje, a za velike vertikalne rotore slično zaštićene vertikalne jame za vitlanje. Svaka jama za vitlanje mora imati mogućnost daljinskog upravljanja istosmjernim motorom kojim se tjera rotor prilikom vitlanja, te daljinskog mjerenja brzine vrtnje, vibracija u oba ležaja i električkih veličina - napona, struje i uzbude - pogonskog motora.

Često se za vrijeme pokusa vitlanja mjere i mehanička naprezanja na pojedinim kritičnim mjestima. U tu svrhu upotrebljavaju se otporničke mjerne trake, tzv. tenzometri. To su trake malih dimenzija, koje sadrže gusto namotanu specijalnu otporničku žicu. Pričvršćene specijalnim ljepilom na dio konstrukcije u smjeru u kojemu želimo



Sl. 3-11

mjeriti naprezanje, one reagiraju povećanjem otpora na svako istezanje, a smanjivanjem na svako stlačivanje. Priključkom u most, npr. prema sl.3-11, dobivamo napon, koji daje sliku istežanja, a time i naprezanje na mjestu na kojemu smo trake prilijepili. Osobita je prednost, što možemo na oscilografu registrirati i vrlo brze promjene uslijed vibracija i slično, pa dobivamo punu sliku statičkih i dinamičkih naprezanja.

3.2 Puštanje u pogon

Čak i onda, ako su izvršena sva snimanja i ispitivanja u ispitnoj stanici tvornice, preostaje čitav niz kontrola, koje treba izvršiti na mjestu postavljanja prije puštanja stroja u pogon. To su sva ona ispitivanja, koja se mogu provesti tek nakon definitivne montaže stroja, a bitna su za sigurnost rada.

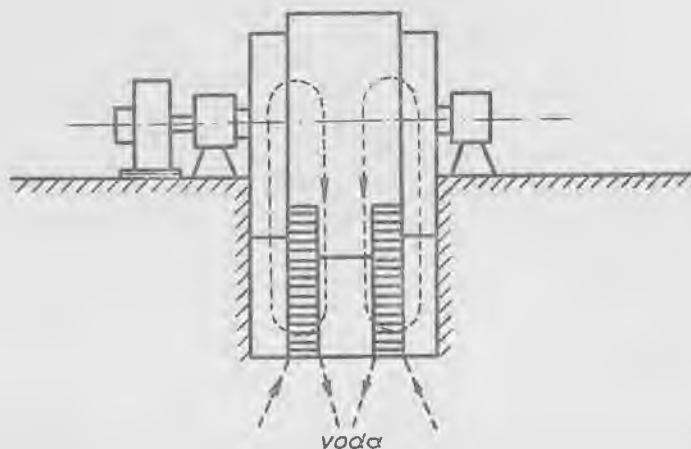
3.2.1 Sušenje namota. Tokom izrade stroja izolacija je izvrgnuta vlazi. Prije stavljanja pod napon - bilo u svrhu ispitivanja, bilo u svrhu pogona - treba izolaciju osušiti. Kod niskog napona to nije od presudne važnosti, jer će se i relativno vlažna izolacija u pogonu - uz nešto povećanu struju odvoda kroz izolaciju - brzo osušiti. Ako se radi o visokonaponskom stroju, onda će stavljanje pod napon bez prethodnog sušenja dovesti do proboja izolacije.

Sušenje namota treba provesti ne samo prije prvog stavljanja pod napon novog stroja, već također i kod starog stroja nakon dužeg stavljanja ili nakon čišćenja izolacije. Ovakovo čišćenje potrebno je provesti, kad se u pogonu skupe veće količine nečistoće na površini izolacije. Ako se radi o suhoj prašini, može se ova ispuhati komprimiranim zrakom, ili pokupiti usisačem prašine. No ako je na izolaciju dospjelo ulje iz ležaja ili druge masnoće, treba je dobro očistiti odgo-

varajućim rastvaračima, jer ulje oštećuje izolaciju. Kao rastvarači mogu poslužiti destilati nafte, zatim benzol, toluol, ksilol, ili klorirani rastvarači kao ugljikov tetroklorid, trikloretilen i drugi, ali kod ovih posljednjih treba poduzeti posebne zaštitne mjere radi zdravlja radnika. Izolacija se može također oprati mlazom hladne vode, ili, ako je prijavština masna, mlazom vruće vode. Nakon ovakvog postupka treba izolaciju dobro osušiti.

Općenito se smatra, da izolaciju treba sušiti, ako izolacioni otpor nije veći od $1\text{ M}\Omega$ kod niskonaponskih strojeva, a od $1\text{ M}\Omega$ po kV pogonskog napona kod visokonaponskih strojeva. Pri sušenju treba postupati oprezno, jer naglo sušenje ili previsoka temperatura izolacije mogu izazvati oštećenja. Uzima se, da temperatura izolacije ne smije prekoračiti $85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sušenje možemo provesti a) vanjskim zagrijavanjem, i b) unutarnjim zagrijavanjem. Kod vanjskog zagrijavanja toplina se dovodi izolaciji namota izvana, npr. tako, da manji stroj stavimo u peć za sušenje, ili da stroj zagrijavamo cijevima s vrućom parom ili vrućim zrakom, ili električnim grijačima. Kod strojeva sa zatvorenim krugom ventilacije (sl.3-12) zrak se može zagrijati po volji visoko, ako



Sl. 3-12

se zatvori privod rashladne vode. Kako zrak za vrijeme sušenja preuzima vlagu od izolacije, potrebno je omogućiti da jedan dio zraka odlazi iz stroja, a da s druge strane isto toliko svježeg suhog zraka pridodje. To se postiže malim podizanjem poklopca na odgovarajućim mjestima kućišta. Zagrijavanje se može vršiti samom rotacijom neuzbudjenog stroja, jer su često već gubici ventilacije dovoljni da podignu temperaturu na traženu vrijednost. Ako to nije dovoljno, grijanje se vrši dodatnim grijalicama u krugu ventilacije. Intenzivna ventilacija pri tome pogoduje sušenju.

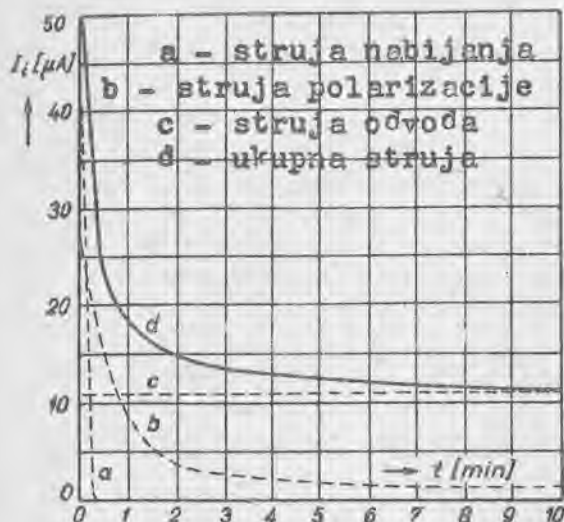
Kod unutarnjeg zagrijavanja toplina se proizvodi u samim vodičima statorskog namota. Zagrijavanje se vrši u tropskom kratkom spoju. Stroj se uzbudi toliko, da struja kratkog spoja bude cca 25 % nominalne struje, pa se u nekoliko stepena podiže, dok se ne postigne temperatura od $75 - 85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kod velikih generatora moramo biti oprezniji, pa sušimo kod svega oko $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Podizanje struje treba izvršiti

tako, da se dosegne puna temperatura tek nakon nekoliko sati kod manjih strojeva, a nekoliko desetaka sati kod velikih strojeva. Kad je dosegnut potreban izolacioni otpor, treba sušenje produžiti bar još nekoliko sati. Kod unutarnjeg zagrijavanja potrebno je provesti neke mjere opreza. Temperaturu treba neprestano kontrolirati mjerenjem otpora, ili termosondama. Struja zagrijavanja ne treba nipošto da prekorači nominalnu struju. U slučaju prenog porasta temperature ne smije se nipošto prekinuti struju otvaranjem sklopke, jer bi time neosušeni stroj došao pod napon, već treba isključiti uzbudu. Katkada se struja zagrijavanja uzima iz vanjskog izvora, umjesto da se inducira u kratkom spoju. U takovom slučaju postoji opasnost pregrijavanja pri-gušnog namota i površine polova, odnosno induciranja visokog napona u uzbudnom namotu. Zato treba uzbudni namot svakako kratko spojiti, a temperaturu rotora kontrolirati.

Poslije dovršenog sušenja treba namot zadržati na temperaturi koja je bar 15 do 25 ° viša od temperature okoline, kako stroj ne bi prije puštanja u pogon navukao vlagu iz okoline. Za vrijeme prekida u pogonu treba također nastojati, da se namot ne ohladi ispod temperature okoline.

3.2.2 Kontrola stanja izolacije. Ispravnost izolacije može se sigurno utvrditi jedino naponskim pokusima na namotu. Ove pokuse ne smijemo, međjutim, izvršiti još u toku sušenja, jer su to tzv. destruktivne metode ispitivanja, kod kojih može doći do oštećenja izolacije i onesposobljavanja stroja za pogon. Ako se to dogodi zbog greške u izolaciji, onda se to nije moglo izbjeći, no ako se to dogodilo zato, što izolacija još nije bila dovoljno suha, onda je stroj nepotrebno oštećen. Kao tzv. nedestruktivna metoda za vrijeme sušenja upotrebljava se mjerenje izolacionog otpora istosmjernom strujom. Vlažna i zaprljana izolacija imaće nizak izolacioni otpor. No visok izolacioni otpor još ne znači, da u izolaciji ne može biti skrivenih grešaka. Zato mjerenje izolacionog otpora pokazuje samo opće stanje izolacije, a nakon toga treba provesti naponske pokuse, kao jedini pouzdan dokaz da je izolacija sposobna za pogon. Izolacioni otpor ovisi o više faktora, osim o stanju izolacije. Tako će očito veće površine kod većih dimenzija stroja uzrokovati smanjenje otpora izolacije, a veće debljine kod višeg napona dati će veće otpore. Vrsta izolacije također utječe na otpor, a također i visina napona kojim se mjeri, vrijeme koje je proteklo od priključka naponado očitavanja, te temperatura izolacije pri mjerenju.

Upliv vremena do očitavanja uzrokovan je time, što kod priključka istosmjernog napona na ispitivanu izolaciju mora poteći struja nabijanja, jer bakar s jedne strane, a željezni paket s druge strane predstavlja ploče kondenzatora, u kojemu je izolacija namota dielektrik. Ova struja nabijanja vrlo je velika ali vrlo brzo iščezava, tako da je nakon nekoliko sekundi više praktički nema (sl.3-13). Mnogo duže se održava tzv. polarizaciona struja, uzrokovana pojavom polarizacije dielektrika, koja se odvija s priličnom tromosti. Kad iščezne i ova komponenta - a to će biti tek nakon nekoliko minuta - onda preostaje samo struja odvoda kroz izolaciju, koja u stvari pokazuje stanje izolacije. Ovu struju dobivamo, ako očitavanje izvršimo npr. 10 minuta nakon priključka napona. Često se, međjutim, navodi mjerena struja i izolacioni otpor nakon 1 minute. Bitno je, da se uz mjerene podatke



Sl. 3-13

istakno i vrijeme mjerenja, pa se govori o "1-minutnom", ili "10-minutnom izolacionom otporu."

Temperatura izolacije vrlo jako utječe na izolacioni otpor, i to tako, da većoj temperaturi odgovara manji otpor. Označimo li sa i_0 struju odvoda kod temperature ϑ_0 , a sa i_ϑ struju kod temperature ϑ , onda vrijedi

$$\frac{i_\vartheta}{i_0} = \frac{R_0}{R_\vartheta} = e^{-\alpha(\vartheta - \vartheta_0)} \quad (1)$$

odnosno

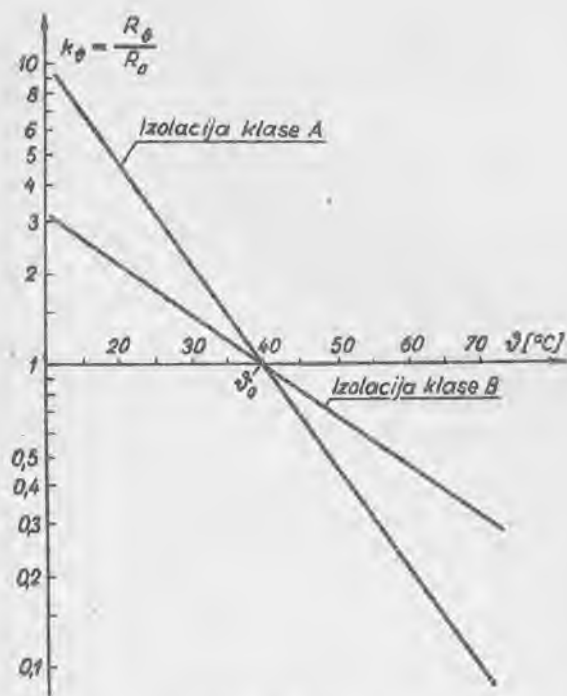
$$\frac{R_\vartheta}{R_0} = e^{-\alpha(\vartheta - \vartheta_0)} \quad (2)$$

gdje se koeficijent α kreće od $1/10$ do $1/30$ prema vrsti izolacije. Ova ovisnost otpora o temperaturi može se pisati :

$$\ln \frac{R_\vartheta}{R_0} = -\alpha(\vartheta - \vartheta_0) \quad (3)$$

i predočiti padajućim pravcem u koordinatnom sistemu s $\ln \frac{R_\vartheta}{R_0}$ na ordinatnoj, a ϑ na apscisnoj osi (sl. 3-14). Koeficijent α treba odrediti mjerenjem za određenu izvedbu izolacije. Koliki je utjecaj temperature, vidi se,

ako se izračuna prirast temperature kod kojega otpor padne na polovicu. Uz $\alpha \approx 15$ taj prirast iznosi približno 10° . Očito je da se ne može navesti podatak o izolacionom otporu, a da se ne navede i temperatura kod koje je izmjenjen, odnosno na koju je preračunat.



Sl. 3-14

Pri sušenju generatora dolazi u početku do padanja izolacionog otpora uslijed porasta temperature, i do porasta otpora uslijed sušenja. U početku prevladava prvi utjecaj, i izolacioni otpor pada po krivulji (a) na sl. 3-15. Kad bi preračunali otpor na konačno toplo stanje, onda bi on od početka rasao po krivulji (b). Nakon što je dostignuto toplo stanje, otpor uslijed sušenja neprestano raste, i kad krivulja porasta počne pokazivati



Sl.3-15

zasićenje, smatramo namot osušenim. Ako želimo odrediti utjecaj temperature na izolacioni otpor, onda mjerimo na ovako osušenom namotu izolacioni otpor u ovisnosti o temperaturi za vrijeme hladjenja. U dijagramu s logaritamskim mjerilom na ordinatnoj osi dobivamo pravac, a nagib toga pravca daje nam koeficijent α . Sada imamo sve elemente, da bi kasnije u pogonu mjerenjem izolacionog otpora i temperature izolacije mogli zaklju-

čiti u kakovom je stanju izolacija. Upravo takova usporedba važnija je od apsolutnog iznosa izolacionog otpora. Ipak nailazimo na iskustvene formule, koje daju potrebnu vrijednost izolacionog otpora. Tako npr. u američkim standardima :

$$R_i = k_p \cdot k_i \frac{(U_n + 3,6)(8 + \sqrt{n})}{\sqrt{P} - 16} \quad [M\Omega] \quad (4)$$

gdje je R_i = izolacioni otpor trofaznog namota izmjeren nakon 1 min sa 500 V istosmjernog napona

U_n = nazivni napon u kV

P = nazivna (prividna) snaga u kVA

n = nazivna brzina vrtnje u 1/min

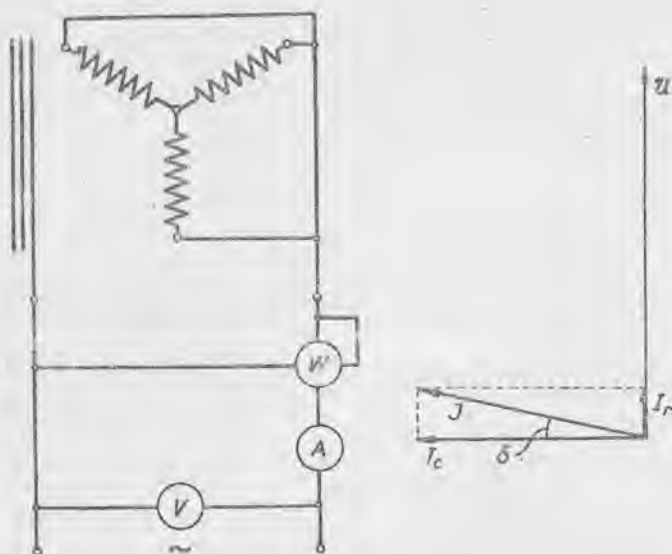
k = temperaturni koeficijent prema sl.3-14 uz $k_p = 1$ za 40°C

k_i = koeficijent za vrstu izolacije = 2,5 za izolaciju klase A
= 7 za izolaciju klase B

Osim mjerenja izolacionog otpora, za kontrolu stanja izolacije može dobro poslužiti mjerenje kuta gubitaka δ , odnosno vrijednosti $\tan \delta$, koja nam direktno pokazuje koliko su veliki gubici u dielektriku pri izmjeničnom naponu, izraženi u odnosu prema kapacitivnoj snazi, koju moramo dovesti da bi namot stavili pod napon :

$$P = UI_c \tan \delta \approx UI \tan \delta = UI \cos \varphi \quad (5)$$

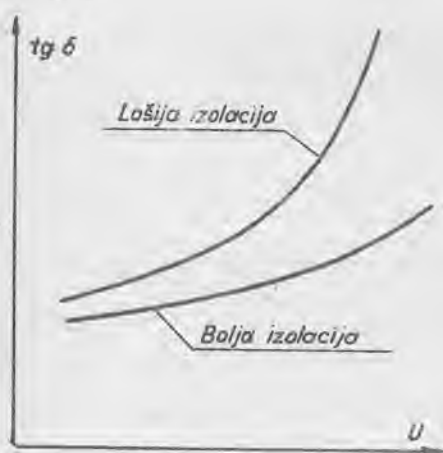
Gubici P_i mogu se mjeriti vatmetrom za mali $\cos \varphi$ (sl.3-16) ili vektormetrom, instrumentom, koji omogućuje direktno očitavanje međusobnog faznog položaja napona i struje, ili visokonaponskim Scheringovim mostom. Obično se snima $\tan \delta$ u ovisnosti o visini napona s kojim je vršeno mjerenje. Izolacija je to bolja, što manje raste $\tan \delta$ s visinom napona. To isto može se reći i kod mjerenja izolacione struje ; bolja izolacija biti će ona, kod koje porast izolacione struje



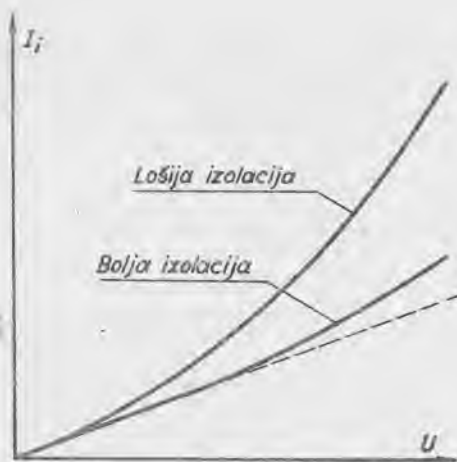
Sl. 3-16

s naponom nije mnogo iznad linearnog (sl.3-17 i sl.3-18).

Kvalitet izolacije može se kontrolirati i usporedbom izolacionog otpora izmjerenog nakon 10 minuta i nakon 1 minute. Omjer ovih



Sl.3-17



Sl.3-18

dviiju vrijednosti pri 500 V napona zove se "polarizacioni indeks":

$$P_i = \frac{R_{10}}{R_1} \quad (6)$$

i poželjno je da bude što veći. Smatra se da zadovoljava $p_i = 1,5$ kod izolacije klase A, a $p_i = 2,5$ kod klase B.

3.2.3 Naponski pokusi. Izolacija sinhronog stroja ispituje se naponskim pokusima na gotovom i osušenom stroju, po mogućnosti u toplom stanju. Pokus stranim naponom provjerava izolaciju između namota i željeza, a pokus induciranim naponom izolaciju između pojedinih zavoja namota.

Kod pokusa stranim naponom potrebno je narinuti ispitni napon između namota koji ispituje s jedne strane, a mase i svih ostalih namota s druge strane. Po mogućnosti treba na taj način ispitati svaku fazu zasebno. Ako je nazivni napon iznad 1 kV, onda to treba svakako provesti. Prilikom ispitivanja rotor mora biti u statoru. Samo iznimno može se dopustiti ispitivanje s izvađenim rotorom kod istaknutih polova, ako nema mogućnosti, da bi dijelovi rotora doprinijeli probodu. Puni ispitni napon smije se priključiti odjednom samo ako je manji od 2 kV. Iznad toga treba uključiti najviše 50 % ispitnog napona, a ostatak podizati kroz vrijeme od najmanje 10 sekundi. Ispitni naponi određeni su propisima, i uglavnom uskladjeni s preporukama Internacionalne elektrotehničke komisije (IEC), koje su prihvaćene i kod nas. Trajanje pokusa s navedenim ispitnim naponima je 1 min, a veličina ispitnih napona iznosi po IEC preporukama :

- | | |
|--|---|
| a) za stator sinhronog generatora iznad 10 MVA | |
| nominalni napon do 2000 V | $2 \cdot U_n + 1000 \text{ V}$ |
| 2 - 6 kV | $2,5 U_n$ |
| 6 - 16,5 kV | $2 \cdot U_n + 3000$ |
| iznad 16,5 kV | po utanačenju |
| b) kao pod a), ali ispod 10 MVA | $2 \cdot U_n + 1000 \text{ V}$
ali najmanje 1500 V |
| c) rotor sinhronog generatora | $10 \cdot U_n$
ali najmanje 1500 V
a najviše 3500 V |
| d) uzбудnik ili rotirajuće pojačalo | kao uzbudni namot |
| e) uzbudni namot uzbudnika | $2 \cdot U_n + 1000 \text{ V}$
ali najmanje 1500 V |

Frekvencija ispitnog napona je 50 Hz .

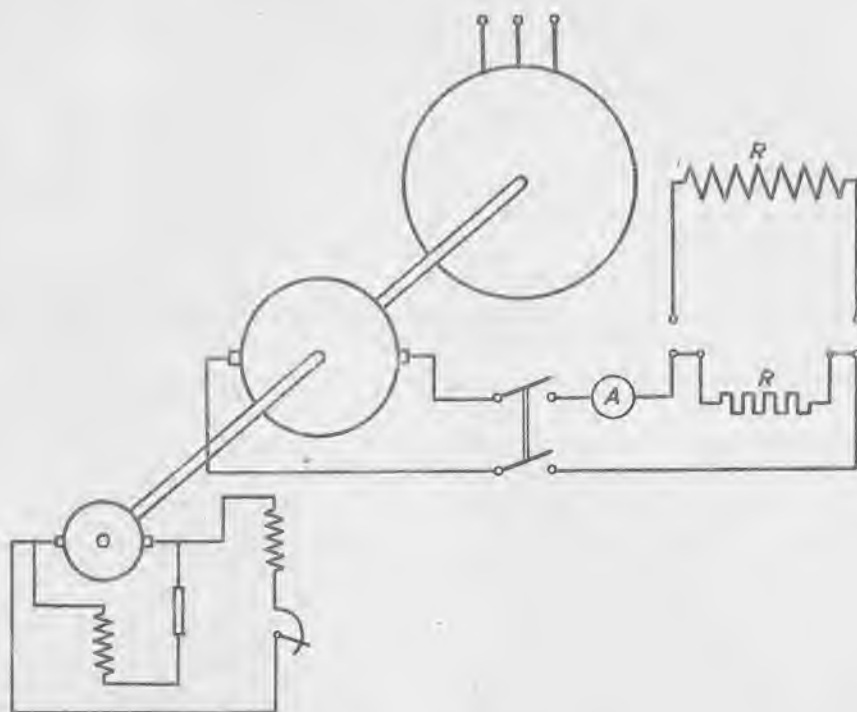
Mjerenje ispitnog napona vrlo je važno, jer je za naprezanje izolacije odlučna maksimalna vrijednost narinutog napona, a ne efektivna. U koliko mjerimo efektivnu vrijednost napona, onda treba prije provedbe naponskog pokusa baždariiti pri sniženom naponu očitavanja voltmetra, bilo s pomoću iskrišta, bilo analizom snimljene krivulje oblika ispitnog napona. Isto kao kod ispitivanja transformatora, tako treba i ovdje povesti računa o veličini ispitnog transformatora. Općenito će kapaciteti između namota i mase kod generatora biti znatno veći nego kod transformatora slične snage.

Pri ponavljanju naponskih pokusa treba uzeti svega 80 % ispitnog napona, ako je stroj još u garancijskom roku, a 70 % nakon toga roka.

Naponski pokus induciranim naponom vršimo naponom $1,3 \cdot U_n$, ako je izvršen naponski pokus stranim naponom među fazama, a sa $1,5 \cdot U_n$ ako taj pokus iz bilo kojeg razloga nije izvršen. Trajanje pokusa je 3 minute. Zbog zasićenja potrebno je povišiti brzinu vrtnje, da bi dobili inducirani napon potrebne visine, pa je i frekvencija ispitnog napona povišena. Poželjno je, da se naponski pokusi vrše po noći, jer se onda lakše može vidjeti eventualno mjesto proboja ili preskoka.

3.2.4 Pripreme za puštanje u pogon. Dakako da je svako puštanje u pogon, a pogotovo pogon s povećanom brzinom, moguće tek pošto smo osigurali ispravan mehanički hod stroja i provjerili zaštitu za slučaj kvara. Kod velikih strojeva posebno je važno provjeriti, da nije prilikom montaže ništa zaboravljeno u stroju - vijci, alat i slično. Zatim treba provjeriti funkcioniranje rashladnog sistema za ulje i za vodu, kako bi bilo od prvog časa osigurano podmazivanje i hladjenje stroja. Stroj se nipošto ne smije sam uzbuditi za vrijeme ispitivanja mehaničkog hoda, i zato je najbolje da se uzbudni krug otvori. Automatska regulacija brzine vrtnje mogla bi biti neispravna, pa se pri prvom puštanju u rad brzina regulira ručno. Kod vertikalnih hidrogeneratora treba brzinu što prije podići iznad 50 % nominalne, jer inače nije osigurano podmazivanje nosećeg ležaja. Inače se u pravilu brzina podiže vrlo oprezno, i neprestano se kontrolira i vidom, i sluhom, i njuhom, da se ne dogadja u stroju štogod nepredviđeno. Vrlo je važno, da svi zaporni uređaji za brzo obustavljanje pogonskog stroja ispravno funkcioniraju, i da bude određeno lice, koje je uvijek spremno da na dogovoreni znak obustavi pogon. Pri podizanju brzine treba neprestano kontrolirati vibracije i temperaturu ležaja. Ako ležaji nemaju ugrađene termometre, onda svaki termometar koji se spušta u ulje ležaja mora biti vrpcom vezan, jer ako slučajno padne u ležaj, to može zahtijevati demontažu čitavog stroja, a ako se razbije, mogu krhotine u ulju oštetiti ležaj. Centrifugalnu zaštitu protiv pobjega, kao i nadnaponsku zaštitu, moramo udesiti iznad $1,3 \cdot n_n$ odnosno $1,3 \cdot U_n$, kako bi mogli izvršiti pokus induciranim naponom. Ostala zaštita, kao prekostrujna, dozemna i diferencijalna moraju biti postavljene i provjerene, koliko se to moglo učiniti bez stavljanja stroja u pogon.

3.2.5 Kontrola uzбудnika. Prije bilo kakovog uzbuđivanja generatora - npr. zbog sušenja namota u kratkom spoju, ili zbog stavljanja pod napon - moramo biti sigurni, da struju uzbuđnika možemo regulatorom udešavati, i zadržati je u potrebnim granicama. Može se dogoditi, da pogrešno udešen uzbuđnik, kad ga opteretimo, svojom vlastitom strujom opterećenja poveća svoju uzбудu, i nikakav regulator u krugu poredne ili nezavisne uzbuđne ne može vratiti struju opterećenja na nižu vrijednost. Pomaže jedino prekidanje glavnog strujnog kruga uzbuđnika - što je opasno, jer uz velik induktivitet imamo i veliku struju - ili obustavljanje uzbuđnika, što odviše dugo traje, osobito ako je uzbuđnik na istoj osovini s generatorom. Da bi izbjeegli opasnost oštećenja uzbuđnika, odvojimo prema sl.3-19 uzbuđni namot generatora, i mjesto njega priključimo na uzbuđnik otpornik istog otpora R. Sada se može bez opasnosti prekinuti strujni krug, ako se opazi da struja raste unatoč postavljanju regulatora na polo-



Sl. 3-19

žaj manjeg napona. Stabilizaciju uzбудnika provedemo udešavanjem položaja četkica u neutralnoj zoni, te korigiranjem kompaundacije i pomoćnih polova, kako će biti detaljnije opisano kod razmatranja o ispitivanju istosmjernih strojeva.

3.2.6 Kontrola regulatora napona. Svi pokusi i ispitivanja vrše se na taj način, da se uzbuđa regulira ručnim regulatorom. Po potrebi može se u seriju s ručnim regulatorom dodati otpornike za finiju regulaciju. Dobar ručni regulator omogućuje sniženje napona u praznom hodu bar na 80 % nominalne vrijednosti. Nominalni napon dobiva se sa približno $1/3$ punog zakreta regulatora, a nominalna uzbuđna struja, koja odgovara punom teretu uz nominalni faktor snage, sa približno $2/3$ zakreta. Preostala trećina zakreta ostaje na raspolaganju za eventualne potrebe kratkotrajne preuzbude. Grubu kontrolu ručnog regulatora najbolje je provesti još pri pokušnom radu uzbudnika na nadomjesni otpornik, pri čemu se oslanjamo na proračunske vrijednosti uzbuđne struje za različita pogonska stanja.

Automatski regulator napona je za vrijeme ispitivanja isključen. Njegovu ispravnost treba provjeriti još prije no što ga uključimo u rad s generatorom. Rad svakog automatskog regulatora zasniva se na usporedbi mjerene veličine - u našem slučaju napona generatora - s unaprijed postavljenom vrijednosti, koja može biti određena npr. jednim stalnim "referentnim" naponom, ili strujom, ili silom pera, prema konstrukciji regulatora. Kontrolu možemo izvršiti tako, da umjesto mjerenog napona generatora dovedemo na stezaljke regulatora određeni izmjenični napon, koji možemo regulirati. Kad taj napon do-

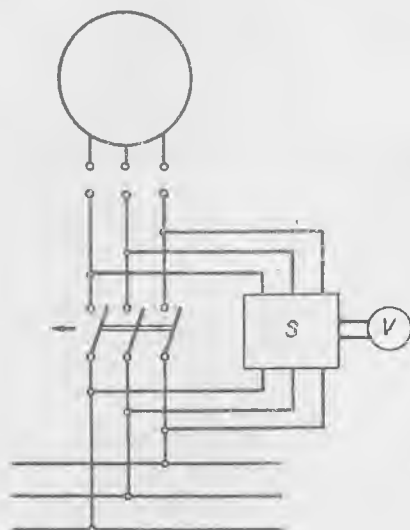
vedemo u blizinu nominalne vrijednosti, regulator mora proraditi. Ako ga podignemo, regulator mora automatski sniziti napon uzбудnika, a ako ga snizimo, on mora pavisiti uzбудu. Time je osigurano ispravno reagiranje regulatora, ali još nije osiguran i stabilan rad. Stabilizacija se postiže kod različitih konstrukcija regulatora na različite načine, a često se ne može provjeriti drugačije, do uključivanjem automatskog regulatora u stvarni krug regulacije. Da bi izbjegli njihanje napona i eventualni ispad iz pogona, najbolje je udesiti prigušenje na najveću moguću vrijednost, pa ga onda postepeno smanjivati, dok ne dobijemo najveću moguću brzinu regulacije bez periodičkog njihanja. To se sve može udesiti u praznom hodu. Smetnju unosimo u krug regulacije naglim dodavanjem ili oduzimanjem otpora u krugu mjerenja napona, a funkcioniranje regulatora razabiremo iz snimljenih oscilograma napona generatora, te eventualno napona uzбудnika i drugih veličina u krugu regulacije. Tek nakon priključka generatora na mrežu može se kontrolirati tzv. kompaundacija regulatora. Ova se sastoji u dovodjenju na mjerne stezaljke regulatora - osim napona generatora - još i jednog pada napona, koji je po veličini i faznom kutu ovisan o struji opterećenja. Ovako kompaundiran generator reagira na svaku promjenu radnog tereta preuzimanjem i odgovarajućeg induktivnog tereta, a isto tako pri promjeni napona mreže može se odgovarajućim udešavanjem kompaundacije postići, da se generatori preuzimanjem induktivnog tereta angažiraju u određenoj mjeri na održavanju napona mreže. Kompaundacijom se može postići i to, da regulator održava stalan napon npr. na kraju dužeg dalekovoda, ili iza transformatora, ma da se napon za regulator mjeri na



Sl.3-20

samim stezaljkama generatora. U koliko postoji sumnja, da je kompaundacija pogrešno priključena, treba prvo raščistiti, kako je ona izvedena za dotični regulator, i kakovi treba da budu međusobni odnosi vektora napona dovedenih na regulator. Zatim to provjerimo mjerenjem, najbolje pri čisto radnom i pri čisto jalovom opterećenju određenom strujom (sl.3-20 a i b), tako da kontroliramo sve napone između stezaljki - npr. 0, 1, 2, 3 - i crtamo vektorske dijagrame. Umjesto toga može se mjerenje izvršiti i vektorimetrom. Kako god se izvedbe regulatora, pa tako i kompaundacije, jako razlikuju, ipak se može općenito reći, da će kod ispravno udešene kompaundacije svaki regulator reagirati na povećanje radnog tereta povišenjem uzbuđene, a time i induktivnog tereta.

3.2.7 Ispitivanje sinhronizacionog uređaja. Svaki sinhronizacioni uređaj treba prije prve upotrebe provjeriti, jer pogrešno sinhroniziranje može imati teške posljedice. Najjednostavniji način provje-



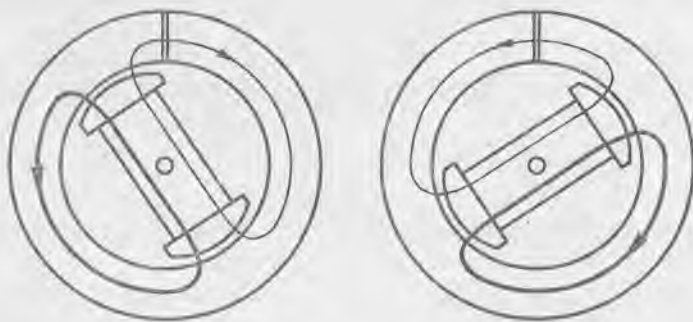
Sl. 3-21

ravanja je taj, da se otvori rastavljač, ili skinu i izoliraju priključci na stezaljke generatora, pa se onda zatvori glavna sklopka (sl.3-21). Pošto je isti sistem napona sada doveden na obe strane sinhronizacionog uređaja, mora ovaj pokazati sinhronizam, a ako ga ne pokazuje, onda je pogrešno priključen ili neispravan.

Kod poluautomatskog uređaja treba provjeriti, da li ovaj daje u tom momentu impuls za ubacivanje sklopke, što možemo ustanoviti voltmetrom. Potpuno automatski uređaj treba osim toga da ispravno reagira na odstupanje frekvencije i napona, te da automatski uskladjuje napon i frekvenciju generatora i mreže. Zbog toga provodimo ovdje osim provjere uklapanja još jednu kontrolu. Stezaljke za aktiviranje sklopke ostavimo nepriključene, pa mijenjamo napon i frekven-

ciju generatora. Automatski sinhronizacioni uređaj, priključen s jedne strane na mrežu, a s druge na generator, mora uvijek reagirati u ispravnom smislu, i dovesti napon i frekvenciju generatora u sklad s prijednostima mreže, te onda dati impuls za uklapanje. Tek kad je to u redu, smije se priključiti sklopka na sinhronizacioni uređaj.

3.2.8 Ležajne struje. Uslijed nejednolikosti zračnog rasporeda, zatim uslijed rasporeda u statorskom paketu nastalih pri sastavljanju limova, raznih rupa i utora koji zahvaćaju paket statora, dolazi do nesimetrija u magnetskom toku koje pri rotaciji (sl.3-22) induciraju napon u



Sl.3-22

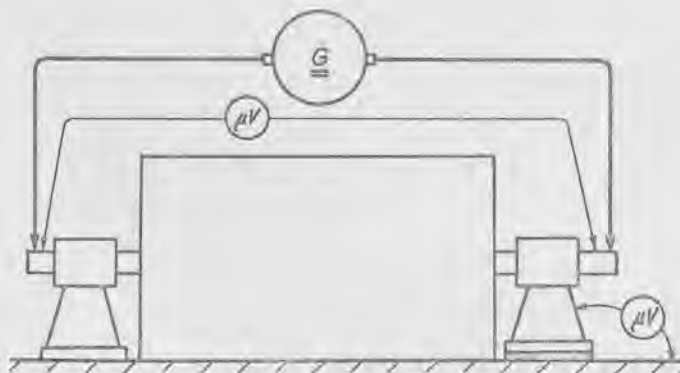
osovini. Taj napon je redovito malen, ali može biti opasan, jer struja koja se zatvara kroz ležaje i kućište uzrokuje sitna oštećenja u

površini ležaja, koja brzo dovode do razaranja. Da bi se to spriječilo, uvijek se izolira jedan ležaj stroja, tako da strujni krug bude prekinut (sl.3-23). Vrlo lako se dogodi, da izolaciona podloga ležaja bude oštećena. To je vrlo teško ustanoviti, jer je kućište vezano



Sl.3-23

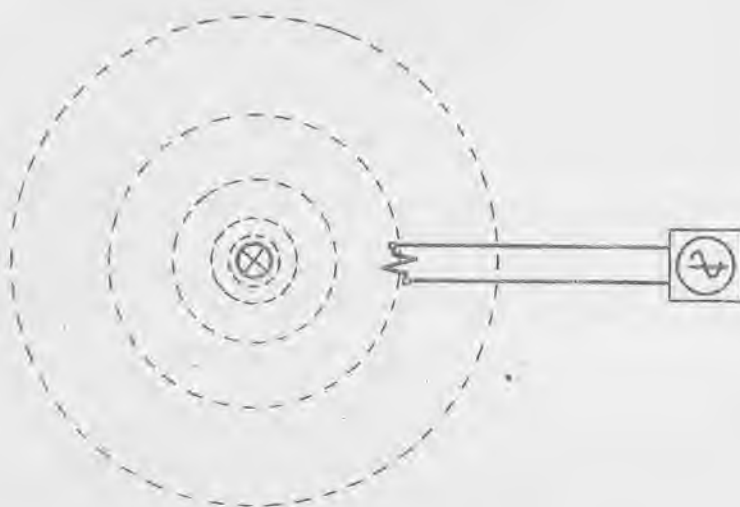
s fundamentom preko drugog ležaja, pa se ne može mjeriti izolacija. Lako se dogodi, takodjer, da kraj dobre izolacije ležaja neka od priključenih cijevi ne bude izolirana, i premosti izolaciju. Da bi ustanovili ispravnost izolacije ležaja, potjeramo istosmjernu struju od nekoliko stotina ampera kroz osovinu, s pomoću agregata za svarivanje (vidi sl.3-24). Mikrovoltmetrom mjerimo pad napona na osovinu. Ako je



Sl.3-24

jedan ležaj izoliran, onda će se taj isti pad napona pojaviti i kao napon na izolaciji ležaja. Ako je napon na izolaciji ležaja manji, onda treba vrlo osjetljivim galvanometrom kontrolirati pad napona između šiljaka, koje prislanjamo u razmaku od cca 10 cm, i na taj način odredjujemo smjer struje, koji se podudara sa smjerom maksimalnog pada napona. Ovim postupkom možemo pronaći oštećeno mjesto, odnosno premoštenje izolacije.

Drugi je postupak, da se induktivni svitak od 0,1 do 1 H priključi na oscilograf, pa se snimaju inducirani naponi u svitku. Ako eliminiramo iz razmatranja visokofrekventne napone od komutacije uzbudnika, i napone oko glava namota, koji se induciraju od rasipnih polja, preostaju naponi inducirani od ležajnih struja. Ma da su naponi na osovinu maleni, struje su ipak znatne, pa se i izmjenična magnetska polja mogu lijepo slijediti na oscilografu, ako držimo na umu, da je inducirani napon najveći kad svitak okrenemo tako, da se njegova os podudara sa smjerom silnica, koje se zatvaraju oko struje, i da je taj napon to veći, što smo svitak primakli bliže struji



Sl. 3-25

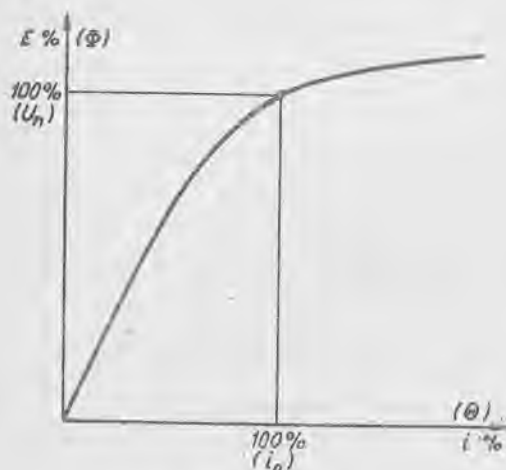
(sl.3-25). Sistematskim traženjem može se na taj način pronaći put kojim se zatvara ležajna struja, i poduzeti potrebne protumjere.

3.3 Ispitivanja u praznom hodu

Ispitivanja u praznom hodu daju nam podatke o magnetskim prilika-
ma u stroju : o funkcionalnoj ovisnosti magnetskog toka o uzbudnoj
struji, zatim o obliku krivulje induciranog napona, koji ovisi, osim
o konstrukciji namota, o rasporedu magnetskih silnica u zračnom ras-
poru stroja; napokon, ispitivanja u praznom hodu daju nam podatke
o gubicima koje uzrokuje magnetski tok, koji rotira, u željezu stato-
ra, i o gubicima koji nastaju pri rotaciji uslijed trenja u ležajima,
trenja zraka i snage potrebne za ventilaciju stroja.

3.3.1 Karakteristika praznog hoda. Karakteristika praznog hoda pred-
stavlja napon neopterećenog stroja u ovisnosti o uzbudnoj struji,
 $E = f(i)$. Ona u stvari predstavlja karakteristiku magnetskog kruga
stroja, jer je pri konstantnoj brzini stroja napon proporcionalan s
magnetskim tokom Φ , a uzbudna struja je proporcionalna s protje-
canjem Θ , koje taj tok uzbuđuje. Uslijed toga krivulja $E = f(i)$
predstavlja u odredjenom mjerilu krivulju $\Phi = f(\Theta)$.

Zgodno je crtati karakteristiku praznog hoda na taj način, da se
nanosi relativna odnosno postotna vrijednost napona $E\%$ u ovisnosti
o relativnoj odnosno postotnoj vrijednosti uzbudne struje $i\%$. Pri
tome se uzima nominalni napon U_n kao 100% napona, a uzbudna
struja i_0 , koja odgovara nominalnom naponu u praznom hodu, kao 100%
uzbudne struje. Ovako prikazane karakteristike mogu se međusobno
uspoređivati, bez obzira na napon za koji je stroj gradjen i bez
obzira na broj zavoja uzbudnog namota. Vrijednost 100% na ordinati
odgovara ujedno magnetskom toku pri nominalnom naponu u praznom hodu,
a 100% na apscisi odgovara protjecanju, koje je potrebno da proizve-
de taj tok (sl.3-26).



Sl.3-26

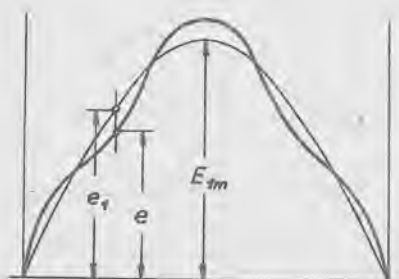
Karakteristika praznog hoda crta se uvijek za sinhronu brzinu vrtnje. Kad bi brzina vrtnje n odstupala od sinhronne brzine vrtnje n_s , bio bi induciran napon E' različit od napona E koji odgovara sinhronoj brzini n_s , jer je pri određenom toku Φ inducirani napon proporcionalan brzini vrtnje n . Trebalo bi dakle računski odrediti pravu vrijednost koja odgovara sinhronoj brzini :

$$E = E' \frac{n_s}{n} = E' \frac{f_n}{f} \quad (1)$$

Najtočnije možemo kontrolirati brzinu vrtnje za vrijeme mjerenja tako da mjerimo frekvenciju induciranog napona f . Sinhronoj brzini odgovara nominalna frekvencija f_n .

3.3.2 Oblik krivulje napona. U praznom hodu kontroliramo oblik krivulje induciranog napona. U tu svrhu oscilografski snimimo krivulju napona, te ucrtamo u oscilogram osnovni harmonički član na osnovu analize snimljene krivulje (sl.3-27). Najveće odstupanje stvarnog

napona e od pripadne vrijednosti osnovnog harmoničkog člana e_1 , ne smije ni na kojem mjestu krivulje premašiti 5 % amplitude osnovnog harmoničkog člana E_{1m} :



Sl.3-27

$$100 \frac{(e - e_1)_{max}}{E_{1m}} \leq 5\% \quad (1)$$

U tom slučaju smatramo da je napon praktički sinusnog oblika. Kod namota spojenog u zvijezdu ne zahtijevamo od faznog napona da bude praktički sinusnog oblika, već se zadovo-

ljavamo, ako linijski napon ispunjava taj zahtjev. Treći harmonički član, ako postoji u faznom naponu, ne pojavljuje se u linijskom naponu. Ukoliko napon ne možemo smatrati praktički sinusnim, razlog može biti loše odabrano skraćeno koraka namota, ili loše odabran oblik polnih nastavaka. Namot se na izvedenom stroju više ne može mijenjati, ali se polni nastavci mogu korigirati. Kod promjene oblika polnog nastavka treba unaprijed ocijeniti sve posljedice, kao npr. povećanje uzbudne struje i slično, pa se tek onda pristupa korekciji.

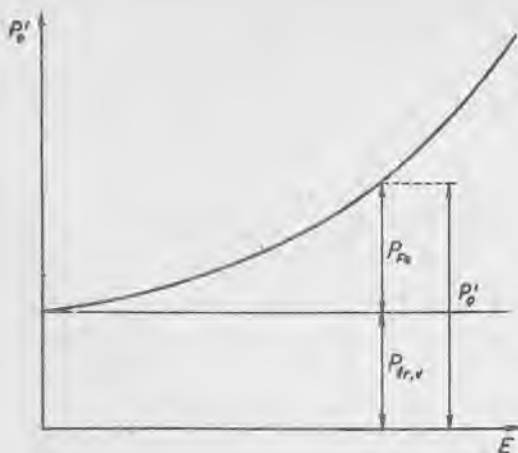
3.3.3 Gubici u praznom hodu. Gubici u praznom hodu sastoje se od gubitaka trenja i ventilacije, $P_{tr,v}$, i gubitaka u željezu P_{Fe} , te gubitaka u uzbuđnom krugu zbog uzbuđne praznog hoda I_0 :

$$P_a = P_{tr,v} + P_{Fe} + P_{u0}$$

Uzbuđni gubici pokrivaju se snagom uzbuđnika, i mogu se lako odvojeno mjeriti za bilo koje pogonsko stanje. Oni, naravno, ovise o uzbuđnoj struji, pa vrijednost uzbuđnih gubitaka u praznom hodu nije ni od kakvog interesa pri određivanju ukupnih gubitaka pri opterećenju. Iz tih razloga uzbuđni gubici se obično izdvajaju pri određivanju gubitaka praznog hoda. Preostale gubitke nazivamo "užim gubicima praznog hoda":

$$P'_0 = P_{tr,v} + P_{Fe}$$

Gubici trenja i ventilacije obuhvaćaju trenje u ležajima, trenje četkica na kliznim kolutinama, trenje zraka na rotirajućim dijelovima, kao i snagu utrošenu za ventilaciju, izuzev posebne ventilatore, koji nisu sastavni dio stroja. Ovi gubici ovisni su o brzini vrtnje. Nasuprot tome, gubici u željezu ovise i o brzini vrtnje, i o naponu na koji je stroj uzbuđen. Ovi gubici obuhvaćaju naime gubitke uslijed histerese i uslijed vrtločnih struja, koje uzrokuje glavni tok uzbuđenog stroja u jarmu i zubima statora, a također - zbog pulzacija uzrokovanih statorskim utorima - i na površini rotora. Kako svi ti gubici ovise o indukciji na pojedinim mjestima magnetskog kruga, a ova je približno proporcionalna s ukupnim tokom, to će se i gubici mijenjati u ovisnosti o naponu u praznom hodu. Kako pak svi ti gubici ovise i o frekvenciji kojom se mijenja magnetska indukcija, ovisiti će oni očito i o brzini vrtnje. Pošto se u pogonu može očekivati da stroj radi pri različitim vrijednostima inducirano napona, ali će uvijek raditi pri jednoj te istoj, tj. sinhronoj, brzini, to gubitke praznog hoda tako i mjerimo i prikazujemo u ovisnosti o naponu pri sinhronoj brzini vrtnje (sl.3-28).

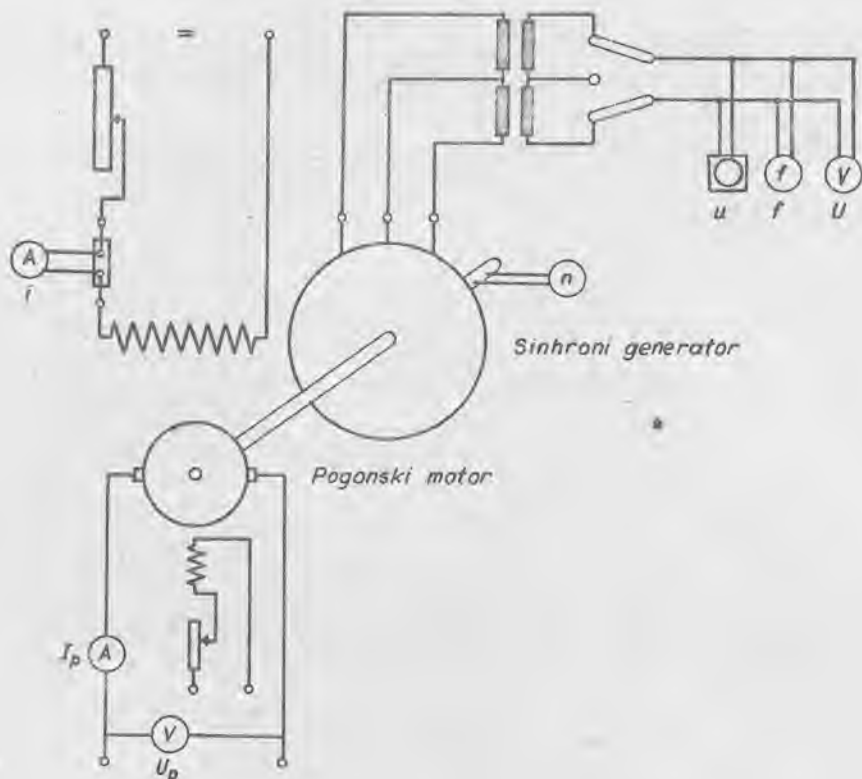


Sl.3-28

Na ordinatnu os nanosimo gubitke u (W), ili u % nominalne snage. Ovaj način nanošenja postotnih gubitaka omogućuje uvid u učešće pojedinih gubitaka u ukupnim gubicima i njihov uticaj na ukupnu korisnost stroja, a u drugu ruku omogućuje neposrednu usporedbu različitih strojeva obzirom na gubitke.

3.3.4 Generatorski postupak. Mjerenje u praznom hodu može se izvršiti generatorskim ili motorskim postupkom. Pri generatorskom postupku (sl.3-29) tjeramo ispitivani stroj pogonskim istosmjernim motorom. Uzbuđom istosmjernog mo-

tora održavamo tačno sinhronu brzinu, koju kontroliramo tačnim mjerenjem frekvencije induciranog napona. Karakteristiku praznog hoda snimamo podizanjem uzbudne struje i snimanjem uzbudne struje i pripadnih vrijednosti napona na stezaljkama. Treba paziti, da se struja uvijek samo podiže, a nikada ne spušta prilikom udešavanja. Nakon toga snimimo i silaznu granu karakteristike spuštanjem struje.



Sl.3-29

Napokon prekinemo uzbudnu struju i očitamo napon remanencije. Pojava histereze dolazi ovdje do izražaja zbog istosmjernog magnetskog toka u rotoru, koji podižemo odnosno spuštamo. U statoru imamo izmjenično magnetiziranje, tok se mijenja frekvencijom mreže, tako da histereza uzrokuje gubitke, ali ne utječe na razliku uzlazne i silazne grane karakteristike praznog hoda. Pri mjerenju generatorskim postupkom možemo priključenim oscilografom snimiti i oblik krivulje napona samog stroja, jer na stezaljke nije marinut nikakav vanjski napon, što kod motorskog postupka nije slučaj.

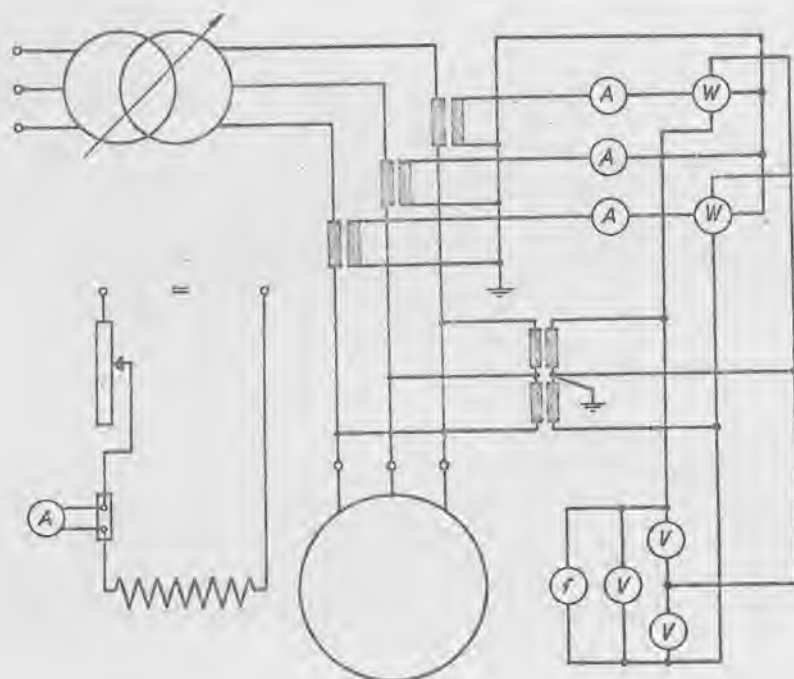
Gubitke sinhronog stroja - izuzev uzbudne gubitke - pokriva u generatorskom radu pogonski motor. Ako prema sl.3-29 mjerimo napon i struju pogonskog istosmjernog stroja, onda dobivamo snagu, koju generator prima na osovini:

$$P_i = P_o' = I_p \cdot U_p - P_{gp} \quad (1)$$

gdje su P_{gp} ukupni gubici pogonskog stroja za to pogonsko stanje. Ove gubitke dobivamo s krivulja baždarenja pogonskog stroja. Pogonski stroj ne treba da bude mnogo veće snage od uzih gubitaka praznog hoda P_o' .

mjerenog stroja. U tom slučaju eventualne manje netočnosti pri određivanju gubitaka P_{gp} - koji iznose svega malo postotaka tipne snage pogonskog motora - ne će bitno utjecati na tačnost mjerenja gubitaka sinhronog stroja P'_0 .

3.3.5 Motorski postupak. U slučajevima gdje spajanje sinhronog stroja s pogonskim motorom predstavlja bilo s kojeg razloga poteškoću, primjenjujemo motorski postupak. U tu svrhu potreban je promjenljivi izmjenični napon, koji u ispitnoj stanici dobivamo bilo iz mreže preko zakretnog transformatora, bilo iz posebnog agregata, kojime možemo dobiti bilo koji napon uz održavanje konstantne frekvencije. Budući da napon možemo podizati postepeno počev od najni-

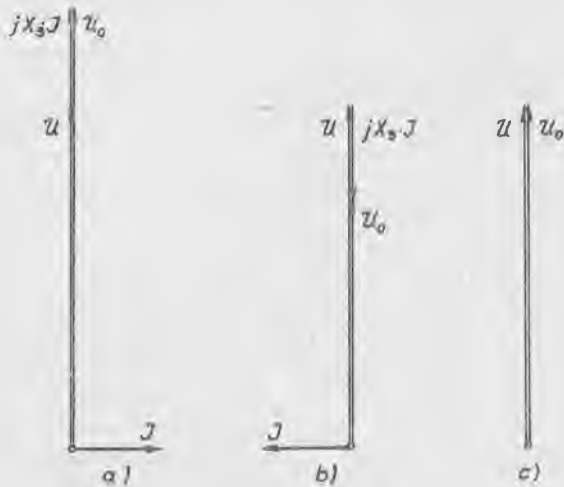


Sl.3-30

žih vrijednosti, to možemo gotovo uvijek izvršiti asinhroni zalet ispitivanog stroja uz postepeno podizanje napona bez poteškoća. Kad je brzina porasla gotovo do sinhrone, uključimo uzbudu i time sinhroniziramo stroj. Preko uključenih instrumenata možemo sada mjeriti napon i frekvenciju na stezaljkama, struju u sve tri faze, snagu koju uzima ispitivani stroj iz mreže, i uzbudnu struju (sl.3-30).

Uzbudnu struju udešavamo otporom u uzbudnom krugu. Vrijednosti uzbudne struje odgovara određena vrijednost induciranog napona, koji se u praznom hodu pojavljuje na stezaljkama. U ovom slučaju dove-

li smo, međutim, na stezaljke neki drugi napon, koji je određen položajem zakretnog transformatora ili uzbudom agregata ispitne stanice. Ako su ti naponi različiti, onda će teći jalova struja. Pad napona te jalove struje na sinhronoj reaktanciji i omskom otporu ispitivanog stroja upravo je jednak razlici napona praznog hoda i stvarnog napona na stezaljkama. Ako je napon praznog hoda veći, teći će induktivna struja iz stroja, a ako je manji, teći će induktivna struja u stroj (ili kapacitivna iz stroja) (sl. 3-31). Ovakovo pogonsko



Sl. 3-31

stanje ne može se nipošto smatrati praznim hodom, jer je stroj opterećen jalovim strujama, koje uzrokuju i promjenu napona na stezaljkama, i povećanje gubitaka naprama praznom hodu. Ma da možemo udešavati uzbudnu struju i narinuti napon na stezaljkama neovisno jedno o drugome, ipak jednom određenom naponu na stezaljkama u praznom hodu odgovara samo jedna uzbudna struja, tj. ona, kod koje je napon praznog hoda jednak narinutom naponu, pa ne teče nikakova jalova struja (sl. 3-31c).

Snimanje karakteristike praznog hoda treba dakle vršiti tako, da za svaki narinuti napon tako dugo udešava-

mo uzbudnu struju, dok struja armature ne bude najmanja. Zatim to ponavljamo za drugi narinuti napon, dok ne dobijemo čitavu krivulju. Struja armature ne će nikada posve iščeznuti, jer mora uvijek teći mala radna struja, koja pokriva uže gubitke praznog hoda, i na taj način održava pogon pri sinhronoj brzini. Ta je struja toliko male u usporedbi s nazivnom, da možemo zanemariti njezin pad napona i gubitke strujne topline, i smatrati da je stroj u praznom hodu.

Dakako da je svejedno da li za određeni napon na stezaljkama tražimo uzbudnu struju, kod koje će struja armature biti minimalna, ili udesimo konstantnu uzbudnu struju, pa mijenjamo narinuti napon. Treba, međutim, paziti, da se kod snimanja uzlaznog dijela karakteristike pri udešavanju i narinuti napon i uzbudna struja uvijek samo povisuju, a kod silaznog dijela uvijek samo snizuju. Oblik krivulje napona može se snimiti u motorskom pogonu na taj način, da udesimo tačku nazivnog napona i priključimo oscilograf, pa izvršimo snimanje neposredno nakon što smo otvorili sklopku kojom je stroj priključen na vanjski napon, dok je brzina praktički još negromljena.

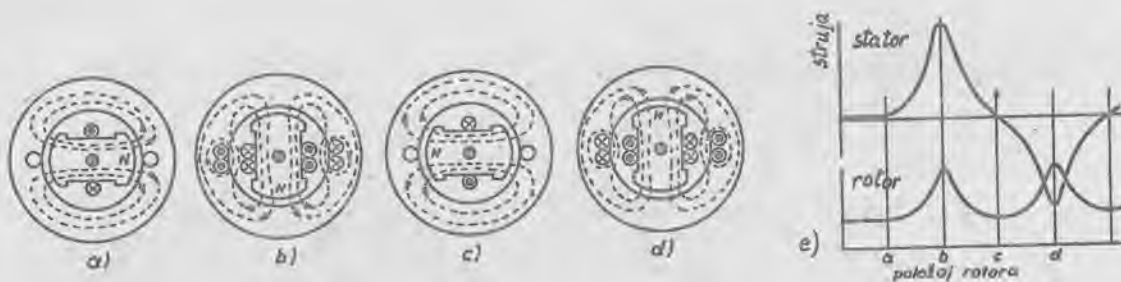
Mjerenje užih gubitaka praznog hoda može se pri motorskom postupku provesti još jednostavnije nego pri generatorskom, jer je dovoljno očitati vatmetre (sl. 3-30). Faktor snage je uvijek 1, kad je postignuto da jalova struja bude nula, ali za vrijeme udešavanja mogu teći znatne jalove struje. To znači, da možemo tačno mjeriti vatmetrima za $\cos = 1$, ali ih treba zaštititi od prevelikih struja za vrijeme udešavanja, npr. kratkim spajanjem.

Gubici u praznom hodu mogu se mjeriti i metodom zaustavljanja, o čemu će biti govora u poglavlju 3.6. i 3.9.

3.4 Kratki spoj i reaktancije

U najopćenitijem slučaju kratki spoj obuhvaća sve pojave u stroju od časa kratkog spajanja stezaljki stroja, preko uspostavljanja stacionarnog stanja, do ponovnog otvaranja stezaljki. Prelazne pojave određene su magnetskim prilikama i omskim otporima u pojedinim strujnim krugovima stroja. Dok omske otpore možemo lako računati, pa čak i direktno mjeriti, kod magnetskih krugova to nije tako lako. Registriranje prelaznih pojava u kratkom spoju i razrada dobivenih rezultata omogućuje nam uvid upravo u magnetske prilike u stroju, koje nastojimo prikazati odgovarajućim karakterističnim reaktancijama i vremenskim konstantama. Ovako dobiveni rezultati omogućuju ne samo ocjenu prilika pri kratkom spoju generatora u pogonu, već i razmatranje različitih drugih pogonskih stanja, kao što je kratki spoj na mreži, nesimetrično opterećenje i slično.

3.4.1 Jednofazni "idealni" kratki spoj. Fizikalna slika zbivanja u kratkom spoju otvara nam se najbolje pred očima, ako prvo razmotrimo tzv. "idealni kratki spoj", tj. ako u prvom času pretpostavimo, da su radni otpori svih strujnih krugova jednaki nuli. Promotrimo slučaj prema sl.3-32 gdje je uzet samo jedan namot na statoru

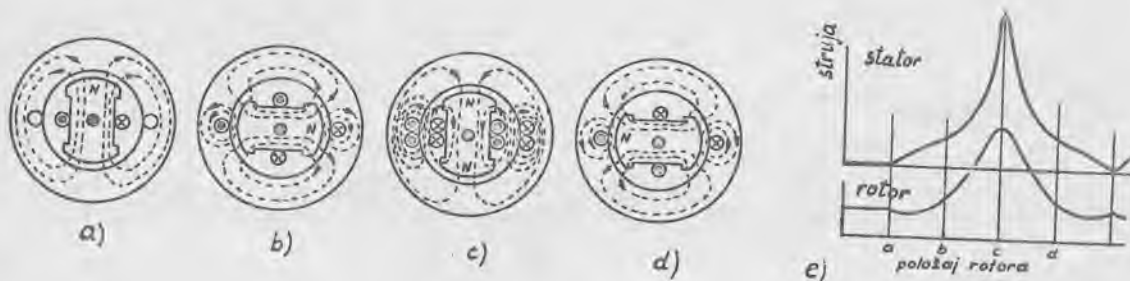


Sl. 3-32

i rotor s odgovarajućom uzбудom, i zamislimo, da je kratki spoj statorskog namota nastao upravo u času, kad tok rotora nije ulančen s namotom statora, tj. tok kroz statorski namot neka je $\phi = 0$ (slučaj a) na sl.32). Rotor se vrti dalje sinhronom brzinom, i nakon $1/4$ okreta dolazi u položaj b), gdje bi čitav njegov tok prošao kroz statorski namot. Pošto smo, međjutim, pretpostavili, da je omski otpor statorskog namota jednak nuli, to bi svaka i najmanja promjena toka u statorskom namotu inducirala neizmjereno veliku struju. Kako se ta struja protivi toku, koji je izaziva, jasno je da ne će teći neizmjereno velika struja, već uvijek upravo onolika struja, koja je dovoljna da spriječi promjenu toka u namotu statora. U slučaju b) teći će dakle struja označenog smjera, a takove veličine, da njeni amperzavoji sprečavaju amperzavojima rotora, da protjeraju tok kroz namot statora. Tok rotora mora se prema tome zatvoriti tako, da ne obuhvati zavoje statorskog namota, tj. uglavnom kroz provrt. Sjetimo se sada, da smo i za uzбудni namot pretpostavili otpor jednak nuli, a to znači da se ni tok kroz

rotorski namot ne smije promijeniti. Pošto se taj tok nepromijenjene veličine sada zatvara velikim dijelom kroz zrak, trebati će znatno veću uzbudu, nego u slučaju a) , gdje se zatvarao kroz željezo. Struja će u rotorskom namotu porasti, a tome će odgovarati i struja u statorskom namotu veća od one, koja bi odgovarala uzbuđnim amperzavojima iz položaja a) . Nakon dalje $1/4$ okretaja nastupa stanje prema sl.c) . Rotorski tok opet nije ulančen sa statorskim namotom, rotorska struja spala je opet na početnu vrijednost, a statorska struja je jednaka nuli. Još $1/4$ okreta dalje, prema sl. d) , rotorska struja je opet porasla na vrijednost kao kod položaja b) , a isto tako i statorska struja, samo što je ova posljednja sada promijenila predznak. Na sl. 3-32 e) prikazana je statorska struja, kao i rotorska struja za vrijeme jednog punog okreta, prema gornjim razmatranjima. Vidi se, da u statorskom namotu teče izmjenična struja, dok se u rotoru istosmjernoj struji superponira izmjenična komponenta dvostruke frekvencije. Ovo stanje može se protumačiti i tako, da izmjenično protjecanje statorskog namota rastavimo na dva okretna protjecanja, jedno direktno, koje rotira sinhrono s rotorom, i sprečava prodiranje silnica u statorski namot, i drugo inverzno, koje rotira sinhronom brzinom u suprotnom smjeru. Frekvencija ovog protjecanja obzirom na rotor je dvostruka, pa se u rotorskom namotu istosmjernoj struji superponira struja dvostruke frekvencije, koja drži ravnotežu inverznoj komponenti statorskog protjecanja.

3.4.2 Istosmjerna komponenta. Gornje razmatranje vrijedi za slučaj kratkog spoja u času kad je tok ulančen sa statorskim namotom upravo jednak nuli. Razmotrimo sada slučaj prema sl.3-33, gdje je kratki



Sl.3.33

spoj nastao u času kad čitav tok prolazi kroz statorski namot. U tom času nema još struje u statorskom namotu, ali kako se rotor okreće, struja raste, da bi $1/4$ okreta kasnije (sl.b), kada rotor sam više ne bi tjerao nikakav tok kroz statorski namot, dosegla veličinu potrebnu da se održi puni tok samo statorskom strujom. Još $1/4$ okreta kasnije statorska struja mora čak toliko narasti, da protjecanje statora - koje pri tome drži ravnotežu protjecanju rotora - bude dovoljno, da protjera i statorski i rotorski puni početni tok kroz puteve rasipanja (sl.c) . Očito je, da će u tom času i stator-

ska i rotorska struja doseći maksimalnu vrijednost. Nakon još $1/4$ okreta (d) vraćamo se na stanje (b), da bi nakon čitavog jednog okreta sve počelo nanovo. Statorska struja sadrži u ovom slučaju - osim izmjenične komponente koja sprečava varijacije rotorskog toka kroz statorski namot - još jednu istosmjernu komponentu, koja održava puni tok kroz statorski namot, koji je postojao u času kratkog spoja. Rotorska struja, osim istosmjerne komponente, koja održava rotorski tok, i drugog harmoničkog člana, koji drži ravnotežu inverznoj komponenti statorskog protjecanja, sadrži još jedan član osnovne frekvencije, koji svojom inverznom komponentom drži ravnotežu istosmjernom protjecanju statorskog namota. Direktna komponenta izaziva pak struju dvostruke frekvencije u statoru, a inverzna komponenta te struje uzrokuje pojavu daljnjih viših harmoničkih članova u struji statora i rotora. Očito je, da se pri jednofaznom kratkom spoju mogu očekivati znatna odstupanja oblika i veličine krivulja struje u statoru i u rotoru u ovisnosti o času u kojemu je nastupio kratki spoj.

3.4.2 Trofazni kratki spoj. Znatno su preglednije prilike, ako promatramo simetrični kratki spoj višefaznog generatora. Za svaku fazu vrijedi doduše isto što je rečeno za jednofazni kratki spoj - pojaviti će se dakle uz izmjeničnu komponentu i istosmjerna komponenta ovisna o položaju rotora u času kratkog spoja - ali se inverzne komponente svih triju faza poništavaju, pa više nema njihovog djelovanja na rotor i svih posljedica. U rotoru se pojavljuje uz osnovnu uzбудnu struju izmjenična komponenta osnovne frekvencije, koja odgovara istosmjernoj komponenti statorskog protjecanja, kao i dodatna istosmjerna struja, koja je potrebna da bi početni rotorski tok održala unatoč tome što je taj iz statora potisnut u rasipne putove. Ova istosmjerna komponenta odgovara dakle izmjeničnoj struji statora, ili tačnije protjecanju okretnog polja statora (sl.3-34).

Stator kao cjelina treba da proizvede jedan mirujući tok, tj. da zadrži tok na onom iznosu i u položaju prema statorskom namotu kao što je to bio u času kratkog spoja, a uz to još da spriječi amperzavoja rotora, da proizvedu tok, koji bi zahvaćao statorski namot. To znači, da će stator proizvesti okretno protjecanje suprotno protjecanju rotora, i istosmjerno protjecanje, u smjeru početnog položaja rotora u času kratkog spoja (sl.3-35). Oba ova protjecanja superponiraju se, tako da se poništavaju u početnom položaju rotora, a daju maksimalnu vrijednost kad se rotor okrene za jedan polni korak.

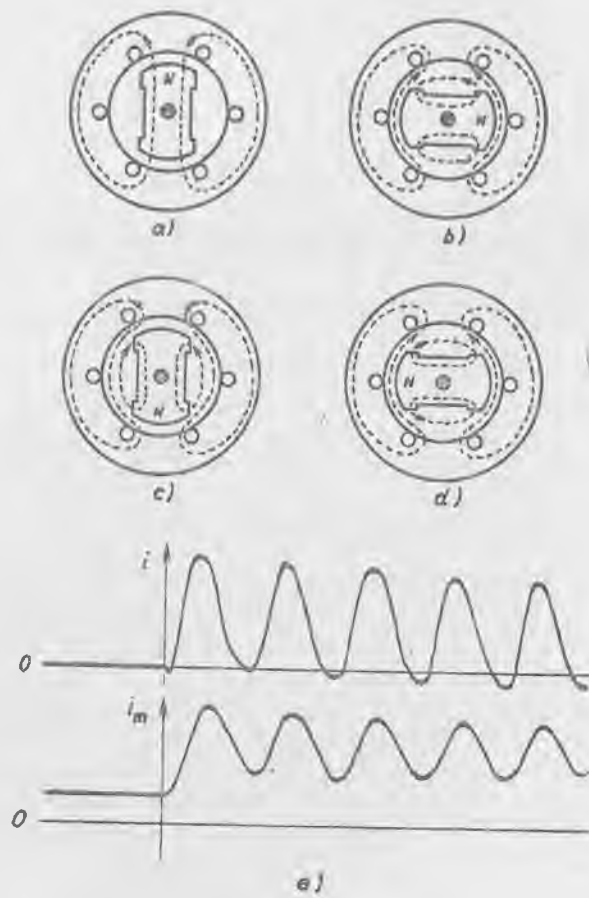
Istosmjerno protjecanje daju istosmjerne komponente struje u sve tri faze, koje moraju biti takove, da se u zvjezdištu poništavaju, tj. :

$$I_{R_1} + I_{R_2} + I_{R_3} = 0 \quad (1)$$

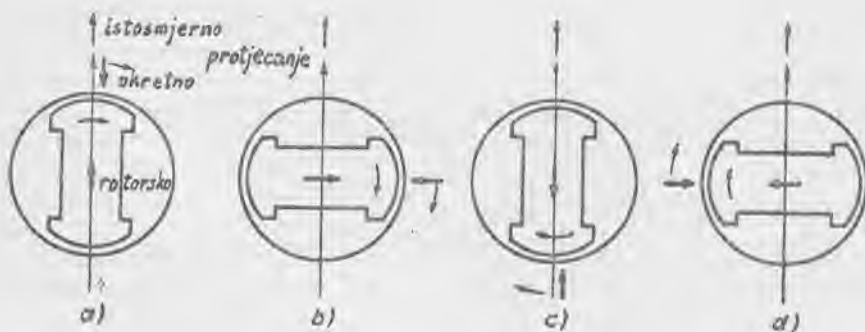
Okretno protjecanje dati će izmjenične komponente struja u fazama, koje sačinjavaju direktni sistem, tj. za koje vrijedi :

$$I_s = I_R \cdot \alpha \quad (2)$$

$$I_T = I_R \cdot \alpha^2 \quad (3)$$



Sl. 3-34



Sl. 3-35

gdje je $\alpha = \epsilon^{-j\frac{2\pi}{3}}$, tj. zakret vektora za 120° unazad. Struje po-

jedinih faza ovisiti će o položaju rotora prema dotičnoj fazi u času kratkog spoja. Kad bi npr. kratki spoj nastao u času podudaranja osi rotora s osi faze R, protjecanje koje tome odgovara uspostavilo bi se strujom $I_{R_0} = \frac{2}{3} I_{d_0}$ u fazi R, a strujama $I_{S_0} = -\frac{1}{3} I_{d_0}$

i $I_{T_0} = -\frac{1}{3} I_{d_0}$ u ostale dvije faze, gdje I_{d_0} predstavlja ekvivalentnu struju, koja bi dala iste amperzavoje u namotu jedne faze. Kad bi se kratki spoj dogodio u bilo kojem času, kad se rotor zaokrenuo prema fazi R za kut ωt , struje u trim fazama dale bi polje u smjeru rotora uz uvjet da je :

$$I_{R_0} = \frac{2}{3} \cdot I_{d_0} \cdot \cos \omega t \quad (4)$$

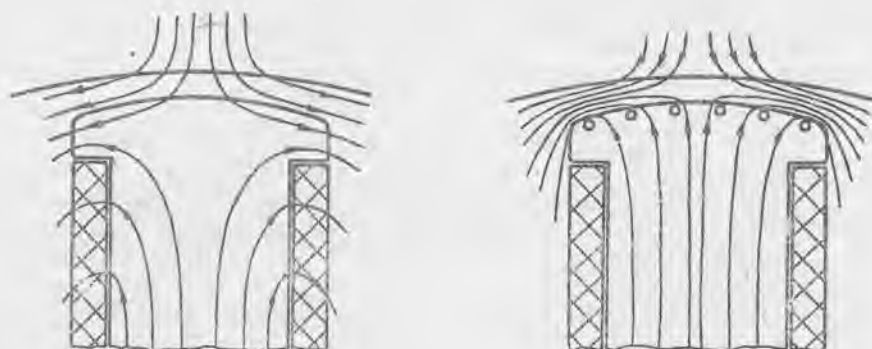
$$I_{S_0} = \frac{2}{3} \cdot I_{d_0} \cdot \cos (\omega t - 120^\circ) \quad (5)$$

$$I_{T_0} = \frac{2}{3} \cdot I_{d_0} \cdot \cos (\omega t + 120^\circ) \quad (6)$$

To će biti istosmjerne komponente faznih struja, koje se očitito u zvjezdištu poništavaju. To će biti ujedno i momentane vrijednosti izmjeničnih komponenti u času kratkog spoja, ali s obrnutim predznakom, jer okretno protjecanje mora u prvom času prema sl. 3-35a biti jednako i suprotnog smjera od istosmjernog protjecanja. Iz toga slijedi, da će svaka fazna struja početi s vrijednosti nula, i da će titrati oko svoje istosmjerne komponente kao srednje vrijednosti. Izmjenične komponente struje biti će u sve tri faze iste veličine, ali pomaknute za fazni kut 120° .

Rotorski namot - za koji isto tako pretpostavljamo da mu je otpor jednak nuli - također ne dozvoljava nikakove promjene toka. Budući da mu se protive statorski amperzavoji, tok se zatvara rasipnim putovima, a za to su potrebni znatno veći amperzavoji. Istosmjerna komponenta rotorske struje drži ravnotežu s okretnim protjecanjem statorskih izmjeničnih struja, koje se vrti sinhrono s rotorom i djeluje mu nasuprot. Izmjenična komponenta rotorske struje sprečava istosmjernoj komponenti statora da izazove promjenu toka u rotoru. Tačno promatrano, protjecanje ove izmjenične komponente može se rastaviti u 2 okretnne komponente, koje rotiraju sinhronom brzinom relativno prema rotoru, i to jedna - direktna - u smjeru vrtnje rotora, a druga - inverzna - nasuprot smjeru vrtnje rotora. Inverzna komponenta prema tome miruje obzirom na stator, i djeluje nasuprot istosmjernoj komponenti statora, dok direktna komponenta rotira dvostrukom sinhronom brzinom obzirom na stator, i time izaziva u statoru direktni sistem struja dvostruke frekvencije. Kako ćemo vidjeti, ove su u pravilu toliko malene, da ih možemo zanemariti u daljnjem razmatranju.

3.4.4 Utjecaj prigušnog namota. Razmatranje ne bi bilo potpuno, kad ne bismo uzeli u obzir i utjecaj prigušnog namota, bilo da se radi o prigušnom kavezu u polnim nastavcima rotora, bilo da su polni nastavci izvedeni iz masivnog - nelameliranog - željeza, tako da djeluju kao kratkospojni namot, koji obuhvaća pol. Ako i za prigušni namot



Sl.3-36

pretpostavimo otpor jednak nuli, onda struje prigušnog namota ne će dozvoliti promjenu toka, koji kroz taj namot prolazi. Usljed toga će tokovi u rasipnim putovima (sl.3-36) imati mnogo manje prostora na raspolaganju, gustoća silnica će porasti, a time i potrebni amperzavoji. Statorske struje biti će dakle znatno veće nego bez prigušnog namota, jer struje u prigušnom namotu podržavaju protjecanje rotora i time povećavaju ukupno protjecanje, kojemu stator mora održati ravnotežu. Za struje vrijedi sve što je rečeno ranije, s time da rotorsko protjecanje sada predstavlja struje u uzbuđnom namotu i struje u prigušnom namotu zajedno.

3.4.5 Utjecaj radnog otpora. Nije teško vidjeti, kako će utjecati omski otpor namota na ova razmatranja. U prvom času tokovi se ne mogu promijeniti, i pri beskonačno malenom otporu teći će tolike struje, da održe tok na početnoj veličini :

$$\Phi = \Phi_{poc} = L \cdot i \quad (1)$$

Medjutim, pošto otpor nije beskonačno malen, potrebna je neka mala promjena toka, da bi inducirala napon potreban za svladavanje omskog otpora R , kako bi se struja i mogla održati na potrebnom iznosu :

$$- \frac{d\Phi}{dt} = i \cdot R \quad (2)$$

Prema tome, svi tokovi, koji su se slučajno zatekli u času kratkog spoja, a nisu održavani narinitim uzbuđnim naponom, i koje smo u sadašnjem razmatranju zamišljali "zamrznutima" u strujnim krugovima beskonačno malog otpora, u stvari će opadati, "trošiti" će se to brže, što je veći otpor kroz koji promjena toka šalje struju, i što je veća struja potrebna za održavanje toka. Struja će biti to veća, što je manji induktivitet L . Iz gornjih izraza, koji vrijede za jednostavan strujni krug vezan s magnetskim tokom Φ , može se odmah vidjeti, da je

$$-L \cdot \frac{di}{dt} = R \cdot i \quad (3)$$

$$\frac{di}{i} = -\frac{R}{L} \cdot dt \quad (4)$$

$$i = E^{-\frac{R}{L}t}$$

$$\Phi = \Phi_{po\check{c}et} \cdot E^{-\frac{R}{L}t} \quad (5)$$

tj. da će struja i tok eksponencijalno padati, pri čemu je vrijednost

$$T = L/R = \text{vremenska konstanta} \quad (6)$$

karakteristična za trajanje pojave, jer se početna vrijednost struje odnosno toka nakon vremena $t = T$ smanji na $1/E = 0,368$ svojeg iznosa. Unatoč mnogo zamršenijim prilikama pri nekoliko magnetski vezanih strujnih krugova, ipak se pojave mogu svesti na razmatranja magnetskih polja, koja se po eksponencijalnom zakonu razgrađuju. Ako npr. promatramo tok kroz prigušni kavez, budući da je broj zavojica malen, to je i ulančeni tok i induktivitet malen, dok je omski otpor obzirom na mali raspoloživi presjek štapova relativno velik. Vremenska konstanta je malena, pa se tok relativno brzo "oslobađa" prigušnog namota, i time skraćuje rasipne putove u kojima se zatvara. To se zbiva u prvim nekoliko poluperioda kratkog spoja, a poslije toga je vrijednost izmjenične komponente smanjena. Kažemo da je kratki spoj iz "početne" prešao u "prolaznu" fazu. Relativno brzo iščezavaju i istosmjernne komponente statorskkih struja i izmjenična komponenta uzbudne struje koja im odgovara. Razlog je tome u visokoj struji, koja je potrebna za održavanje istosmjernog toka kroz dugačke rasipne putove u zraku. Duže traje razgrađivanje rotorskog istosmjernog toka, koji se dobrim dijelom zatvara kroz željezo, pa je induktivitet relativno viši, a otpor manji. Usljed toga polakše opada dodatna istosmjerna komponenta rotorske struje i izmjenične komponente statorskkih struja, koje toj komponenti odgovaraju. Napokon, kad je rotorska struja ponovno pala na vrijednost određenu narinutim uzbudnim naponom, u statoru će teći samo izmjenične struje, koje svojim protjecanjem drže ravnotežu početnom protjecanju rotora, a preostaje samo toliko toka, da pokrije padove napona u namotima. Prelazna pojava je završila, te imamo tzv. trajni kratki spoj.

3.4.6 Reaktancije. Pri promjenama opterećenja događaju se u stroju slične prelazne pojave kao pri udarnom kratkom spoju. Bitna je razlika u tome, što induktivitetu i omskom otporu namota treba još pridodati induktivitete i omske otpore mreže i potrošača. Pri tome će obično omski otpor prema induktivnom biti zastupljen u znatno većoj mjeri nego kod kratkog spoja samog stroja. Posljedica je toga, da os okretnog polja statora ne će biti identična s osi rotorskog namota, kao što je to slučaj kod pretežno induktivnih struja u kratkom spoju. Time se bitno mijenjaju induktiviteti, koji određuju prelazne pojave.

U drugu ruku, radi lakšeg razmatranja prelaznih pojava u stroju zgodno je obuhvatiti njegove konstante tačno definiranim reaktancijama i vremenskim konstantama, koje određuju struje u pojedinim karakterističnim momentima prelazne pojave, i vremenski tok prelazne pojave. Pri tome definiramo početnu, prolaznu i sinhronu reaktanciju, te vremenske konstante početne, prolazne i istosmjerne komponente udarne struje kratkog spoja. Obzirom na položaj osi okretnog protjecanja statora prema osi rotorskog namota valja razlikovati uzdužnu i poprečnu reaktanciju, kako početnu, tako i prolaznu i sinhronu. Pri udarnom kratkom spoju om ski otpori su zanemarivo maleni prema induktivnim otporima, i os okretnog protjecanja izazvanog induktivnim izmjeničnim strujama podudarati će se s osi rotorskog namota. To znači da će reaktancije koje odredimo iz pokusa udarnog kratkog spoja uvijek biti uzdužne reaktancije.

3.4.7 Reduciranje veličina na uzdužne i poprečne komponente. Pri računskom razmatranju prelaznih pojava u sinhronom stroju potrebno je - kao i kod razmatranja stacionarnog stanja - uzeti u obzir razlike induktiviteta u smjeru osi rotorskog namota i okomito na taj smjer, koje dolaze osobito do izražaja kod stroja s istaknutim polovima. Okretno polje statorskih struja rotira sinhrono s rotorom, pa možemo zamisliti, da ga je proizvela struja u fiktivnom faznom namotu, koji rotira sinhrono s rotorom. Veličina te struje bila bi :

$$i = \frac{3}{2} \cdot i_f \quad (1)$$

gdje je i_f = fazna struja.

Budući da os tog fiktivnog namota može biti za neki kut φ pomaknuta prema osi rotorskog namota, možemo protjecanje statora rastaviti u dva protjecanja; jedno u smjeru osi rotora, tzv. "uzdužno", i drugo, okomito na taj smjer, tzv. "poprečno" protjecanje. Ako želimo jedno i drugo prikazati rotirajućim faznim namotima, onda bi u namotu u uzdužnoj osi tekla "uzdužna" struja :

$$i_d = i \cdot \cos \varphi = \frac{3}{2} i_f \cdot \cos \varphi \quad (2)$$

a u namotu u poprečnoj osi "poprečna struja" :

$$i_q = -i \cdot \sin \varphi = -\frac{3}{2} i_f \cdot \sin \varphi \quad (3)$$

Na taj način može se (vidi sl.3-37) izraziti komponente i_d i i_q s pomoću faznih struja i_R , i_S i i_T i onda, ako struje ne predstavljaju simetričan trofazni sistem, jer se može uzeti komponenta svakog faznog protjecanja u uzdužnoj osi, i u poprečnoj osi, te napokon nulta komponenta, ako se struje ne poništavaju u zvjedištu. Uzdužna struja je u najopćenitijem slučaju :

$$i_d = \frac{2}{3} \left[i_R \cdot \cos \omega t + i_S \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + i_T \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \quad (4)$$

a poprečna komponenta :

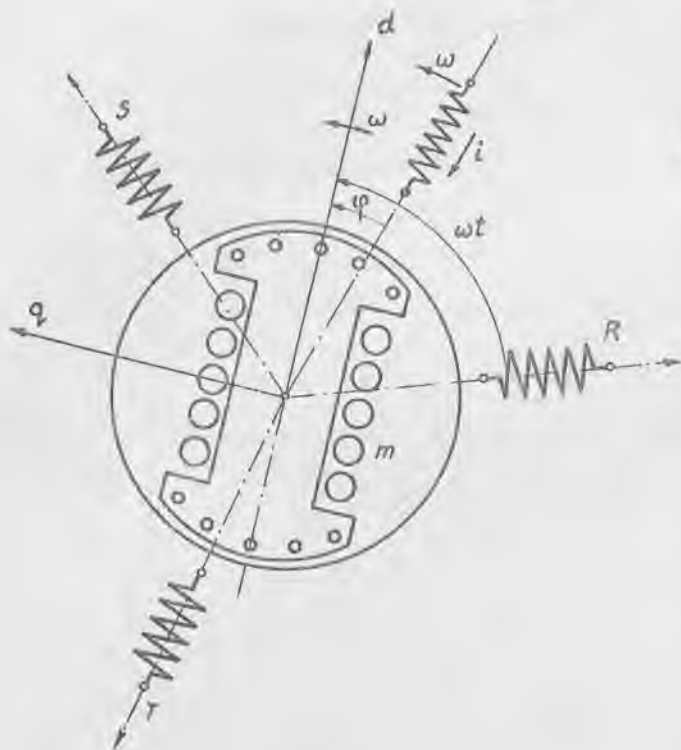
$$i_z = -\frac{2}{3} \left[i_R \sin \omega t + i_S \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + i_T \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \right] \quad (5)$$

i multa komponenta

$$i_o = \frac{1}{3} (i_R + i_S + i_T) \quad (6)$$

gdje je faktorom $2/3$ obuhvaćena redukcija ukupnog protjecanja na fazno protjecanje, tako da se može jednostavno računati fazne struje iz uzdužne i poprečne komponente kao :

$$i_R = i_d \cdot \cos \omega t - i_q \cdot \sin \omega t + i_o \quad (7)$$



Sl. 3-37

te analogno za i_S i i_T ako se piše $\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$ odnosno $\left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$ namjesto ωt . Dovoljno je dalje razmatrati struju samo u jednoj fazi, jer u druge dvije faze ne može pri kratkom spoju nastupiti slučaj, koji ne bi nastupio i u prvoj fazi, ako samo razmotrimo sve početne položaje rotora prema toj fazi u času kratkog spoja. Ako odredimo struje i_d , i_q i eventualno i_o , onda možemo izračunati i faznu struju i_R . Ovakovo računanje vrlo je zgodno, jer protjecanja struje i_d odnosno i_q miruju obzirom na rotor, pa se može računati sa sasvim određenim induktivitetima i međainduktivitetima. Multa komponenta kod simetričnog trofaznog kratkog spoja otpada, jer se struje u zvjezdištu nužno poništavaju.

3.4.8 Magnetski tokovi i naponske jednadžbe. U najopćenitijem slučaju možemo izraziti s pomoću struja i induktiviteta magnetske tokove ulančene s pojedinim statorskim i rotorskim strujnim krugovima na slijedeći način :

a) magnetski tok ulančen s uzbudnim namotom rotora :

$$\Phi_m = M_{dm} \cdot i_d + L_m \cdot i_m + M_{mpd} \cdot i_{pd} \quad (1)$$

gdje indeksi znače: d = uzdužni
m = uzbudni
pd = prigušni namot u uzdužnoj osi

b) magnetski tok ulančen s prigušnim namotom u uzdužnoj osi :

$$\Phi_{pd} = M_{dpd} \cdot i_d + L_{pd} \cdot i_{pd} + M_{mpd} \cdot i_m \quad (2)$$

c) magnetski tok ulančen s prigušnim namotom u poprečnoj osi :

$$\Phi_{pq} = M_{dpq} \cdot i_d + L_{pq} \cdot i_{pq} \quad (3)$$

gdje indeksi znače
 q = poprečni
 pq = prigušni namot u poprečnoj osi

d) magnetski tok ulančen sa statorskim namotom u uzdužnoj osi :

$$\Phi_d = L_d \cdot i_d + M_{dm} \cdot i_m + M_{dpd} \cdot i_{pd} \quad (4)$$

e) magnetski tok ulančen sa statorskim namotom u poprečnoj osi :

$$\Phi_q = L_q \cdot i_q + M_{dpq} \cdot i_{pq} \quad (5)$$

f) multi magnetski tok ulančen sa statorskim namotom :

$$\Phi_o = L_o \cdot i_o \quad (6)$$

Promjena svakog pojedinog od ovih tokova inducirati će u odgovarajućem strujnom krugu napon, koji služi za pokrivanje pada napona u otporu tog kruga. Za prigušne namote u uzdužnoj i poprečnoj osi vrijedi prema tome :

$$-p\Phi_{pd} = R_{pd} \cdot i_{pd} \quad (7)$$

$$-p\Phi_{pq} = R_{pq} \cdot i_{pq} \quad (8)$$

U uzbudnom krugu imamo osim toga narinuti napon uzбудnika, tako da vrijedi :

$$u_m - p\Phi_m = R_m \cdot i_m \quad (9)$$

Kod razmatranja prilika u statorskom namotu treba voditi računa o tome, da se u namotu u uzdužnoj osi induciraju dva napona : jedan uslijed event. vremenske promjene uzdužnog toka Φ_d (napon transformacije), i drugi uslijed rotacije poprečnog toka naprama vodičima statora (napon rotacije). Isto tako u poprečnoj osi imamo napon transformacije poprečnog toka, i napon rotacije uzdužnog toka, pa jednadžbe glase :

$$u_d = -p\Phi_d + \Phi_q \cdot \omega - R \cdot i_d \quad (10)$$

$$u_q = -\Phi_d \cdot \omega - p\Phi_q - R \cdot i_q \quad (11)$$

$$u_o = -p\Phi_o - R \cdot i_o \quad (12)$$

Ukupno imamo dakle 12 jednažbi, gdje su nepoznanice

$$\Phi_m, \Phi_{pd}, \Phi_{p2}, \Phi_d, \Phi_2, \Phi_o, i_d, i_2, i_o, i_m, i_{pd}, i_{p2},$$

dakle takodjer 12 nepoznanica, pa je sistem određen. Treba samo odrediti koliki su narinuti naponi u_d, u_q, u_o i u_m , da bismo mogli izračunati struje.

3.4.9 Uvjeti udarnog kratkog spoja. Ako razmotrimo slučaj udarnog kratkog spoja na neopterećenom generatoru, koji se vrti uzbudjen na nominalni napon, onda su statorske struje neposredno pred kratki spoj jednake nuli, a isto tako i struje u prigušnim namotima. Pojavljuje se jedino uzbudna struja, koja uzbudjuje uzdužni tok Φ_d , dok je poprečni tok Φ_q jednak nuli. Kako se uzdužni tok ne mijenja, očito je da mora biti :

$$u_d = -p\Phi_d + \Phi_2 \cdot \omega - R \cdot i_d = 0 \quad (1)$$

$$u_2 = -\Phi_d \cdot \omega = -M_{dm} \cdot i_m \cdot \omega = -M_{dm} \cdot \frac{U_m}{R_m} \cdot \omega = U_m \quad (2)$$

$$u_o = 0 \quad (3)$$

U času kratkog spoja napon na uzdužnom kao i na poprečnom namotu mora biti jednak nuli, a to je isto kao da smo na poprečni namot narinuli napon $-U_m$. Prema tome glase jednažbe napona za stator u slučaju udarnog kratkog spoja :

$$-p\Phi_d + \Phi_2 \cdot \omega - R \cdot i_d = 0 \quad (4)$$

$$-\Phi_d \cdot \omega - p\Phi_2 - R \cdot i_2 = -\frac{U_m}{p} \quad (5)$$

$$-p\Phi_o - R \cdot i_o = 0 \quad (6)$$

Ako još eliminiramo nulte struje i nulti tok, koji se u slučaju simetričnog trofaznog kratkog spoja ne će pojaviti, ostaje nam 10 jednažbi s 10 nepoznanica, iz kojih možemo riješiti struje i_d, i_q i i_m koje nas ovdje prvenstveno interesiraju.

3.4.10 Struje i reaktancije . Riješimo li iz gornjih izraza struju i_d , dobivamo uz zanemarenja članova nižeg reda veličine izraz u transformiranom području :

$$i_d = \frac{U_m}{p} \cdot \frac{1}{X_d} \cdot \frac{(1+pT'_{do}) \cdot (1+pT''_{do})}{(1+pT'_d) \cdot (1+pT''_d)} \cdot \frac{\omega^2}{(p^2 + 2\alpha p + \omega^2)} \quad (1)$$

gdje je U_m = maksimalna vrijednost faznog napona u praznom hodu prije kratkog spoja,

$$\omega = 2\pi f \quad = \text{kružna frekvencija}$$

$$X_d, T_{do}, T_d', T_{do}'', T_d'', \alpha = \text{konstante određene omskim otporima i induktivitetima stroja.}$$

Vraćena u originalno područje struja i_d poprima oblik :

$$i_d = \frac{U_m}{X_d} + \left(\frac{U_m}{X_d'} - \frac{U_m}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{U_m}{X_d''} - \frac{U_m}{X_d'} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} - \frac{U_m}{X_d''} \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} \cdot \cos \omega t \quad (2)$$

Na sličan način može se odrediti struja i_q u transformiranom području :

$$i_q = \frac{U_m}{p} \cdot \frac{1}{X_2} \cdot \frac{(1+pT_{2o}'')}{(1+pT_2'')} \cdot \frac{p\omega}{(p^2+2\alpha p+\omega^2)} \quad (3)$$

što daje u originalnom području približno izraz :

$$i_q = -\frac{U_m}{X_2''} \cdot e^{-\frac{t}{T_2''}} \sin \omega t \quad (4)$$

Računamo li sada faznu struju i_R iz struja i_d , i_q kako je ranije navedeno, slijedi :

$$i_R = \left[\frac{U_m}{X_d} + \left(\frac{U_m}{X_d'} - \frac{U_m}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} + \left(\frac{U_m}{X_d''} - \frac{U_m}{X_d'} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} \right] \cos(\omega t + \varphi) - \frac{U_m}{X_m} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos \varphi - \frac{U_m}{X_n} \cdot e^{-\frac{t}{T_a}} \cdot \cos(2\omega t + \varphi) \quad (5)$$

Kut φ karakterizira moment u kojemu je kratki spoj nastupio. Promatranje ovog izraza otkriva nam slijedeće : nakon dužeg vremena svi eksponencijalno prigušeni članovi nestaju, pa preostaje samo izmjenični član :

$$i_R = \frac{U_m}{X_d} \cdot \cos(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

kao trajna struja kratkog spoja. Razmatranje konstanta pokazuje da je

$$X_m = \frac{2 \cdot X_d'' \cdot X_2''}{X_d'' + X_2''}, \quad X_n = \frac{2 \cdot X_d'' \cdot X_2''}{X_2'' - X_d''} \quad (7)$$

pa se vidi da je posljednji član, dvostruke frekvencije, zbog $X_n \gg X_m$ znatno manji od istosmjernog člana, dok oba iščezavaju s istom vremenskom konstantom T_a koju nazivamo vremenskom konstantom

kratkog spoja armature. Za ostale konstante vrijedi :

$$X_d'' < X_d' < X_d \quad (8)$$

(početna vremenska konstanta) $T_d'' < T_d'$ (prolazna vremenska konstanta)

pa se vidi, da u izmjeničnoj komponenti prvo nestaje član sa T_d'' , pa onda član sa T_d' . U prvom času, za $t = 0$, preostaje od izmjenične komponente član :

$$i_a'' = \frac{U_m}{X_d''} \cos(\omega t + \varphi) \quad (9)$$

Odgovarajuća efektivna vrijednost :

$$I'' = \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot X_d''} \quad (10)$$

naziva se početnom ili subtransientnom strujom udarnog kratkog spoja, dok se konstanta X_d'' naziva početnom ili subtransientnom reaktancijom. Kad bi T_d'' bilo zanemarivo maleno, tj. kad bi se prelazna pojava odigravala tako kao da trećeg člana u izmjeničnoj komponenti uopće nema, onda bi u času $t = 0$ bila struja :

$$i_a' = \frac{U_m}{X_d'} \cos(\omega t + \varphi) \quad (11)$$

Odgovarajuću efektivnu vrijednost :

$$I' = \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot X_d'} \quad (12)$$

nazivamo prolaznom ili transientnom strujom udarnog kratkog spoja, a konstantu X_d' prolaznom ili transientnom reaktancijom.

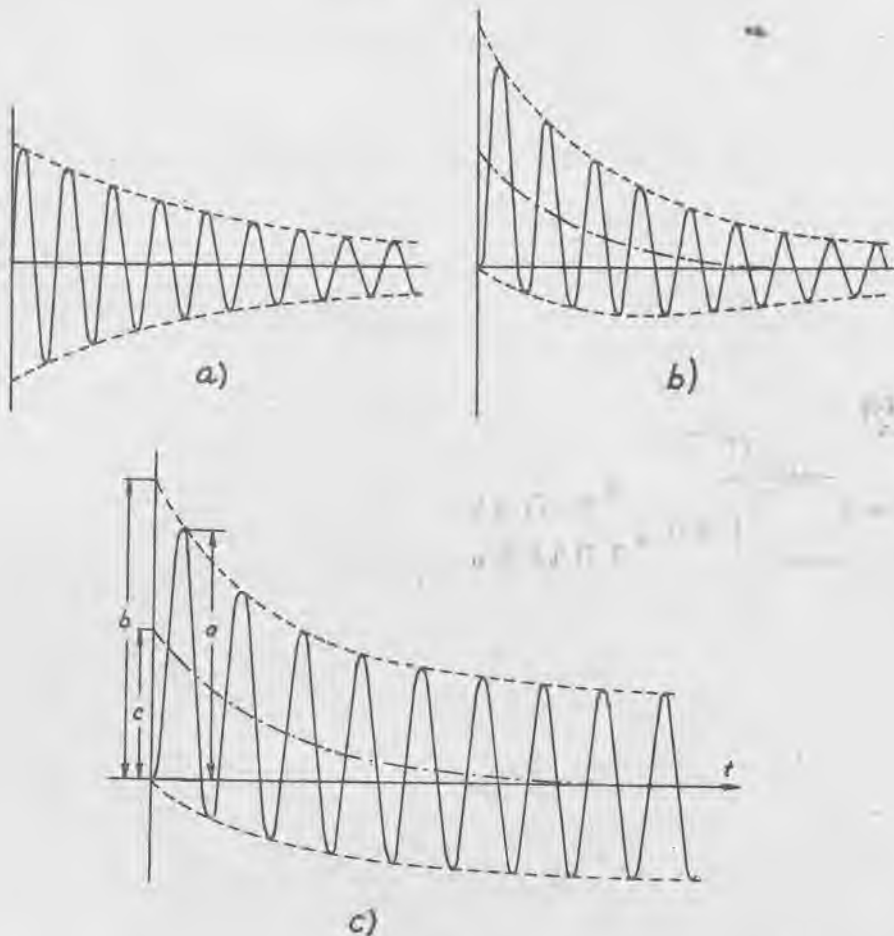
Nakon dužeg vremena preostaje samo izmjenični član, čija je efektivna vrijednost :

$$I_k = \frac{U}{\sqrt{2} \cdot X_d} \quad (13)$$

Ovu vrijednost nazivamo trajnom strujom kratkog spoja.

U početnom času ($t = 0$) zbroj posljednjih dvaju članova s negativnim predznakom upravo je jednak momentanoj vrijednosti

$\frac{U_m}{X_d''} \cos \varphi$ izmjeničnog člana osnovne frekvencije, bez obzira na vrijednost kuta φ , tj. bez obzira na to u kojem je času kratki spoj nastao. Struja počinje dakle uvijek s vrijednošću nula, bilo da izmjenična komponenta počinje također s vrijednošću nula (sl.3-38a), bilo da počinje maksimalnom vrijednošću (sl.3-38b). U ovom posljednjem slučaju momentane vrijednosti struje postižu maksimalni iznos. To je tzv. "udarna struja kratkog spoja" (vrijednost a na sl.3-38c), koja ipak, zbog prigušenja unutar prve poluperiode, ne premašava 1,8-struku maksimalnu vrijednost početne struje udarnog kratkog spoja, tj. vrijednost $1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot I''$ (sl.3-38c). Veličina $c = b/2$ predstavlja istosmjernu struju udarnog kratkog spoja, a vrijednost b dvostruku amplitudu izmjenične struje udarnog kratkog spoja.



Sl.3-38

3.4.11 Analiza oscilograma udarnog kratkog spoja. Kad poznajemo izraz po kojemu se mijenja struja za vrijeme prelazne pojave kod udarnog kratkog spoja, možemo lako provesti analizu snimljenog oscilograma udarnog kratkog spoja, i odrediti konstante koje nas zanimaju, a to su reaktancije i vremenske konstante.

Posljednji član dvostruke frekvencije vrlo je malen prema istosmjernom članu, pa se istosmjerni član može jednostavno odrediti tako, da se u oscilogramu struje povuku envelope, i njihov vertikalni razmak svagdje raspolovi. Udaljenosti y od srednje linije predstavljaju amplitude izmjenične komponente u ovisnosti o vremenu (sl.3-39a). Ako vrijednosti prenesemo u poseban dijagram (sl.3-39b), dobivamo eksponencijalnu krivulju :

$$\Delta_1 = \left(\frac{U_m}{X_d'} - \frac{U_m}{X_d} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d}} = \sqrt{2} (I' - I_k) \cdot e^{-\frac{t}{T_d}} \quad (1)$$

koja je superponirana povrh konstantnog člana :

$$\frac{U_m}{X_d} = \sqrt{2} \cdot I_k \quad (2)$$

U samom početku tome je još pribrojen član

$$\Delta_k = \left(\frac{U_m}{X_d''} - \frac{U_m}{X_d'} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} = \sqrt{2} (I'' - I') \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} \quad (3)$$

Da bi sve ove komponente lakše razlučili, povučemo horizontalu u visini konačne vrijednosti $\sqrt{2} I_k$ kojoj snimljena krivulja asimptotski teži, i prenesemo razlike Δ od ove horizontale do krivulje u - izostavljajući prvih nekoliko poluperioda - u novi dijagram s logaritamskom skalom na ordinatnoj osi. Dobivamo :

$$\log \Delta_1 = \log \sqrt{2} (I' - I_k) - \frac{t}{T_d'} \cdot \log E \quad (4)$$

Ovako dobiveni pravac odsijeca na ordinatnoj osi - za $t = 0$ - vrijednost $\log \sqrt{2} (I' - I_k)$, a prolaznu vremensku konstantu T_d' možemo očitati kao vrijeme $t = T_d'$, kod kojega izraz postaje jednak :

$$\log \Delta_1 = \log \sqrt{2} (I' - I_k) - \frac{T_d'}{T_d'} \cdot \log E = \frac{\sqrt{2} (I' - I_k)}{E} \quad (5)$$

tj. kod kojega amplituda spadne na 0,368 svoje početne vrijednosti $\sqrt{2} (I' - I_k)$ (vidi sl.3-39c).

U prvih nekoliko poluperioda stvarne vrijednosti $\log \Delta$ ležati će nešto iznad pravca $\log \Delta_1$ (crtkana linija na sl.3-39c) koji smo ekstrapolirali do ordinatne osi, jer je u stvari Δ jednako zbroju $\Delta_1 + \Delta_2$. Ako ove razlike $\Delta - \Delta_1 = \Delta_2$ nanese ponovno u logaritamskom mjerilu, dobivamo pravac :

$$\log \Delta_2 = \log \sqrt{2} (I'' - I') - \frac{t}{T_d''} \cdot \log E \quad (6)$$

koji odsijeca na ordinatnoj osi vrijednost $\sqrt{2} (I'' - I')$. Subtransientnu ili početnu vremensku konstantu T_d'' dobijemo istim postupkom kao i kod T_d' (sl.3-39d).

Saberemo li amplitudu trajne struje kratkog spoja i početnu vrijednost izraza Δ_1 , koju u crtani pravac odsijeca na ordinatnoj osi, dobivamo

$$\sqrt{2} \cdot I_k + \sqrt{2} (I' - I_k) = \sqrt{2} \cdot I' = I_m' \quad (7)$$

a to je amplituda prolazne udarne struje kratkog spoja, iz koje slijedi prolazna reaktancija (uzdužna vrijednost) :

$$X_d' = \frac{U_r}{I'} = \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot I'} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I'} \quad (8)$$

gdje je U = linijski napon u praznom hodu prije kratkog spoja,

$I' = I_m' / \sqrt{2}$ = prolazna struja udarnog kratkog spoja dobivena analizom oscilograma.

Dodamo li sada vrijednosti $\sqrt{2} I'$ još početnu vrijednost izraza Δ_2 dobivenu prema sl.3-39, imamo amplitudu početne struje udarnog kratkog spoja :

$$\sqrt{2} \cdot I_k + \sqrt{2} (I' - I_k) + \sqrt{2} (I'' - I') = \sqrt{2} \cdot I'' = I_m \quad (9)$$

iz koje slijedi početna reaktancija (uzdužna vrijednost) :

$$X_d'' = \frac{U_r}{I''} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I''} \quad (10)$$

Napokon, iz struje trajnog kratkog spoja na kraju oscilograma dobivamo uzdužnu vrijednost sinhronne reaktancije :

$$X_d = \frac{U_r}{I_k} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_k} \quad (11)$$

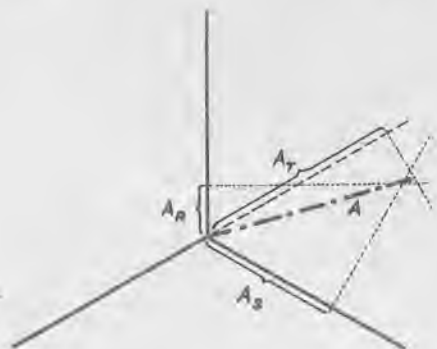
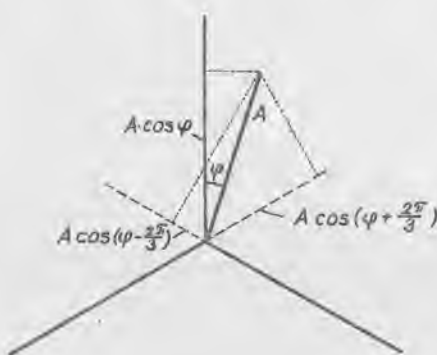
3.4.12 Istosmjerna komponenta kod troleznog kratkog spoja. Amplituda početne udarne struje jednaka je prema sl.3-38c) maksimalnoj vrijednosti istosmjerne struje udarnog kratkog spoja koja se može pojaviti pri istoj uzbudi. Ova se pak može odrediti iz jednog jedinog pokusa, ako smo snimili struje u sve tri faze. Kako je istosmjerna komponenta određena časom kratkog spajanja, tj. faktorom $\cos \varphi$ za prvu fazu, $\cos(\varphi - \frac{2\pi}{3})$ za drugu fazu, odnosno $\cos(\varphi + \frac{2\pi}{3})$ za treću fazu, to se njene početne vrijednosti mogu zamisliti kao projekcije maksimalne vrijednosti A u smjerove osi pojedinih faza

(sl.3-40). Da bi dobili maksimalnu vrijednost, treba početne vrijednosti za sve tri faze nanijeti u odgovarajuće smjerove pod kutovima od 120° , pri čemu treba paziti na predznak. Ako u dobivenim točkama podignemo okomice, one se sijeku približno u jednoj tački. Udaljenost ove tačke od ishodišta jednaka je maksimalnoj istosmjernoj komponenti

$$A = \sqrt{2} \cdot I'' = I_m \quad (1)$$

Vremensku konstantu kratkog spoja armature T_a možemo odrediti na isti način kao T_d' i T_d'' , ako u logaritamskom mjerilu nanesimo istosmjernu komponentu :

$$\log i_m = \log \frac{U_m}{X_m} \cos \varphi - \frac{t}{T_a} \cdot \log E \quad (2)$$



Sl.3-40

i očitamo vrijeme $t = T_a$, nakon

kojega je i_m spalo na 0,368 svoje početne vrijednosti.

3.4.13 Uzbudna struja. Ako iz istih jednadžbi iz kojih smo računali i_d i i_q izračunamo uzbudnu struju i_m , dobivamo, da je ova jednaka zbroju uzbudne struje neposredno prije kratkog spoja i_{m0} i struje prelazne pojave i_m' :

$$i_m = i_{m0} + i_m' \quad (1)$$

Prvo se može izraziti prema 3.4.9 kao :

$$i_{m0} = -\frac{U_m}{\omega M_{dm}} = -\frac{U_m}{X_{dm}} \quad (2)$$

gdje X_{dm} znači reaktanciju, koja povezuje uzbudnu struju i napon statora u praznom hodu U_m .

Za struju prelazne pojave jednadžbe iz 3.4.8 daju u transformiranom području :

$$i_r' = \frac{(1 + pT_{pd})}{(1 + pT_d')(1 + pT_d'')} \cdot \frac{\omega p}{(p^2 + 2\alpha p + \omega^2)} \cdot \frac{X_{dm}}{X_d} \cdot \frac{1}{R_m} \cdot \frac{U_m}{p} \quad (3)$$

Sve konstante i oznake u ovom izrazu iste su kao u 3.4.8 i 3.4.10. K tome još pridolazi vremenska konstanta prigušnog namota u uzdužnoj osi :

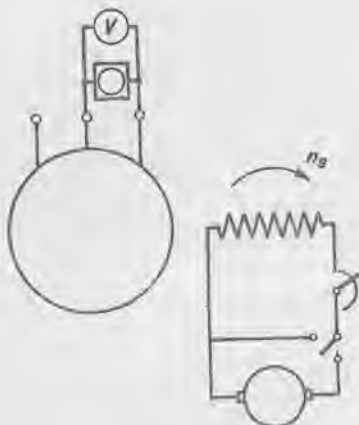
$$T_{pd} = \frac{X_{pd}}{R_{pd}} \quad (4)$$

Kad vratimo taj izraz u originalno područje, izlazi ukupna struja u uzbudnom krugu :

$$i_m = -\frac{U_m}{X_{dm}} \left\{ 1 + \frac{X_d - X_d'}{X_d'} \left[e^{-\frac{t}{T_d'}} - \left(1 - \frac{T_{pd}}{T_d''} \right) \cdot e^{-\frac{t}{T_d'}} - \frac{T_{pd}}{T_d''} \cdot e^{-\frac{t}{T_d''}} \cos \omega t \right] \right\} \quad (5)$$

U početnom času $t = 0$ uzbudna je struja $i_m = i_{m0}$, da bi onda prema sl.3.34e) porasla u izmjeničnim prigušenim titrajima osnovne frekvencije, oko srednje vrijednosti koja predstavlja eksponencijalnu krivulju s prolaznom vremenskom konstantom T_d' . U prvom času ta je krivulja spuštена uslijed struja u prigušnom namotu za eksponencijalni član, koji brzo iščezava s početnom vremenskom konstantom T_d'' .

Često je interesantno poznavati vremensku konstantu praznog hoda T_{d0}' , koja određuje porast i razgrađivanje napona statora u praznom hodu pri naglo priključenom naponu na uzbudni krug. Otpor uzbudnog kruga treba da bude onoliki, koliki odgovara uzbudi na nominalni napon u praznom hodu. Mjerenjem se određuje prema sl.3-41 tako, da se uzbudni namot pri nominalnoj brzini i nominalnom naponu kratko spoji, te se oscilografom snimi opadanje napona na stezaljke-



Sl.3-41

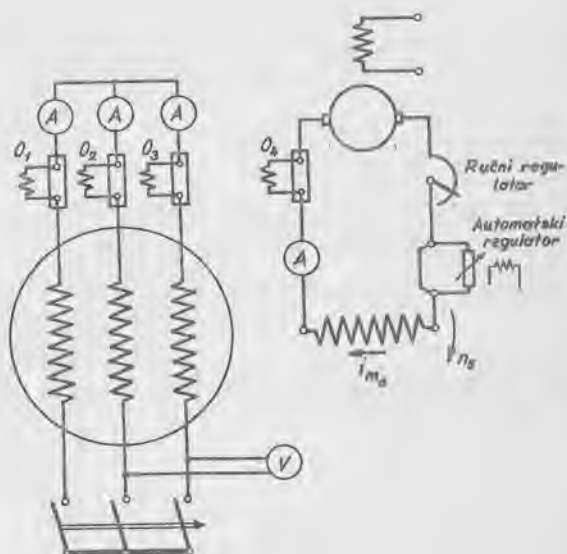
uzbudnu struju. Rotor se vrti sinhronom brzinom. Struje svih triju faza i uzбудnu struju snimamo petljastim oscilografom fotografskim putem. Pri tome se nipošto ne treba služiti strujnim transformatorima, koji ne bi proporcionalno prenijeli istosmjerne komponente, već treba upotrebiti shuntove. Shuntove i kontrolne ampermetre uključujemo u zvjezdište, a ne u izvode generatora, kako bi zaštitili petljasti oscilograf od visokog napona u praznom hodu prije kratkog spajanja. Kontrolni ampermetri su potrebni, kako bi mogli na kraju pokusa, kada su struje već prešle u stacionarne struje trajnog kratkog spoja, očitati njihove tačne vrijednosti na ampermetrima, i usporedbom sa stacionalnim strujama, koje je registrirao oscilograf, baždari-
ti petlje oscilografa, tj. odrediti mjerila za snimljene oscilogramе.

3.4.15 Utjecaj zasićenja. Sve reaktancije sinhronog stroja ovise o stanju zasićenosti u željezu, jer magnetski tokovi prolaze ne samo zrakom, već i željezom, pa pojedini samoinduktiviteti i međuinuktiviteti ovise o permeabilitetu tih putova u željezu. Očito je, da će i reaktancije X'_d i X''_d , koje odredimo iz po-

kusa udarnog kratkog spoja, ovisiti o veličini struja u pojedinim namotima, što u krajnjoj liniji znači, da će ovisiti o veličini uzbudne struje prije kratkog spoja. Obično se definiraju dvije vrijednosti reaktancija obzirom na zasićenje : a) vrijednost koja odgovara nominalnom naponu, i b) vrijednost koja odgovara nominalnoj struji u prolaz-

ma statora. Razrada oscilograma vrši se isto kao kod određivanja ostalih vremenskih konstanti prenošenjem u logaritamsko mjerilo (sl.3-39).

3.4.14 Provedba mjerenja. Pri provedbi pokusa udarnog kratkog spoja (sl.3-42) treba osobito paziti, da se sve tri faze kratko spoje istovremeno. Prije kratkog spoja na stezaljkama mora biti određeni napon. Ovaj udesimo ručnim regulatorom. Automatski regulator napona mora biti kratko spojen, kako ne bi nakon kratkog spoja - zbog rušenja napona - mijenjao



Sl.3-42

nom stanju. Za slučaj a) potrebno je prije kratkog spoja udesiti uzbudu tako, da na otvorenim stezaljkama dobijemo nominalni napon. Za slučaj b) trebalo bi uzbudu udesiti tako, da prolazna struja udarnog kratkog spoja bude po vrijednosti jednaka nominalnoj struji. Naravno da se to ne može unaprijed postaviti, dok ne poznamo vrijednost reaktancija, pa će pri pokusu prolazna struja ispasti manja ili veća od nominalne. Ponavljanjem pokusa može se nacrtati krivulja reaktancije u ovisnosti o prolaznoj struji udarnog kratkog spoja, i za vrijednost $I' = I_n$ očitati reaktanciju koja odgovara nominalnoj struji. Valja napomenuti, da se na taj način definira i početna reaktancija X_d'' koja odgovara nominalnoj struji. Treba je dakle izmjeriti za $I' = I_n$.

3.4.16 Relativne i postotne reaktancije. Sva mjerenja kvocijenata napona i struje daju u stvari impedancije. Kod iole većeg sinhronog stroja radni je otpor toliko malen u usporedbi s induktivitetom, da se može bez daljnjih korekcija izmjerene vrijednosti smatrati reaktancijama, a da eventualna pogreška zbog zanemarenja radnog otpora bude uvijek unutar granica tačnosti mjerenja.

Najčešće se sve reaktancije daju kao relativne vrijednosti ili kao postotne vrijednosti, tj. kao pad napona u reaktanciji pri nominalnoj struji izražen u odnosu (ili u postocima) prema nominalnom faznom naponu :

$$x = \frac{I_n \cdot X}{U_n / \sqrt{3}} \quad , \quad x\% = \frac{I_n \cdot X}{U_n / \sqrt{3}} \cdot 100 \quad (1)$$

Ako nazovemo izraz :

$$X_n = \frac{U_n / \sqrt{3}}{I_n} \quad (2)$$

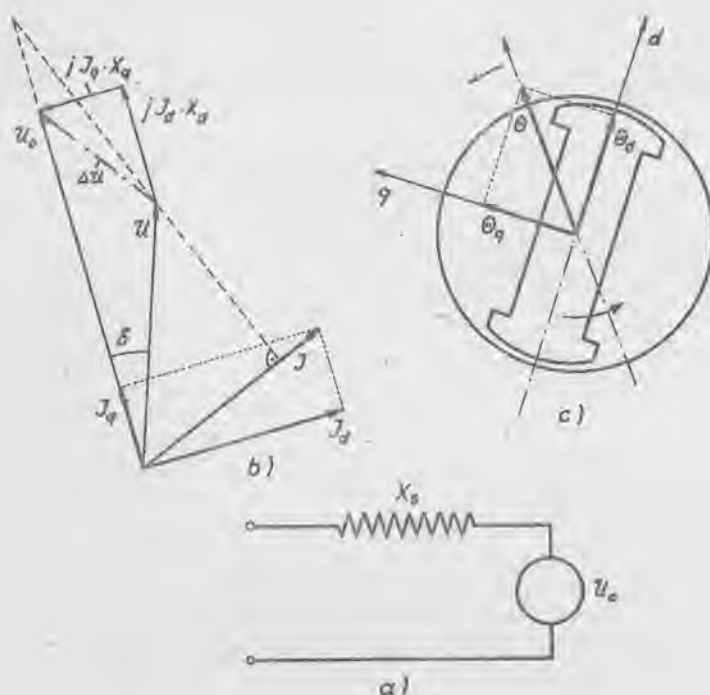
"nominalnom reaktancijom", onda se relativna odnosno postotna reaktancija računa :

$$x = \frac{X}{X_n} \quad , \quad x\% = \frac{X}{X_n} \cdot 100 \quad (3)$$

a reaktancija u omima dobiva se množenjem relativne reaktancije s nominalnom reaktancijom.

3.4.17 Sinhrona reaktancija. Osobito je važna za ocjenu ponašanja stroja u različitim pogonskim prilikama njegova sinhrona reaktancija. Ako zamislimo sinhroni stroj kao izvor napona praznog hoda U_0 bez unutarnjeg otpora, onda možemo smanjenje napona na stezaljkama uslijed magnetizirajućeg djelovanja struje opterećenja u statorskome namotu prikazati kao pad napona u reaktanciji X_s spojenoj u seriju (sl.3-43) . Ovu reaktanciju nazivamo sinhronom reaktancijom. Djelovanje amperzavoja struje I u statorskome namotu biti će posve različito u slučaju kad se os polova rotora podudara s osi protjecanja sta-

tora (uzdužni položaj), i u slučaju kad su te osi međusobno okomite (poprečni položaj), jer su magnetski otpori različiti. U prvom slučaju govorimo o uzdužnoj sinhronoj reaktanciji X_d , u drugom slučaju



Sl.3-43

o poprečnoj X_q . Kod općenitog razmatranja sinhronog stroja rastavljamo protjecanje statora na uzdužnu i poprečnu komponentu, pa govorimo analogno o uzdužnoj struji I_d i poprečnoj struji I_q . Isto tako i razliku napona :

$$\Delta U = U_e - U \quad (1)$$

rastavljamo na uzdužnu i poprečnu komponentu (sl.3-43b). Uzdužnu sinhronu reaktanciju definiramo onda kao omjer uzdužne komponente napona armature ΔU i uzdužne komponente struje :

$$X_d = \frac{\Delta U_d}{I_d} \quad (2)$$

a poprečnu sinhronu reaktanciju kao omjer poprečne komponente napona armature i poprečne komponente struje :

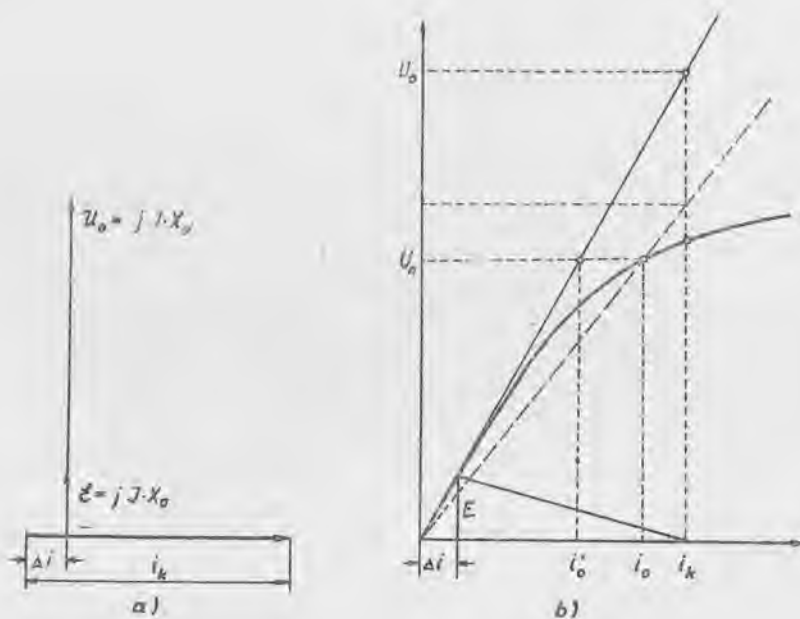
$$X_q = \frac{\Delta U_q}{I_q} \quad (3)$$

Pri tome se razumijeva da je stroj simetrično opterećen, u stacionarnom pogonu pri nominalnoj frekvenciji, te da se reaktancije računaju iz osnovnih harmoničkih članova napona i struja. U koliko nije izričito

napomenuto na koju struju opterećenja se odnose vrijednosti sinhronne reaktancije, onda se smatra da su vrijednosti određene pri nominalnoj struji.

3.4.18 Određjivanje iz mjerenja u praznom hodu i kratkom spoju. Kod mjerenja u kratkom spoju struje su praktički posve induktivne, i os njihovog protjecanja se prostorno podudara s osi rotorskog protjecanja. Reaktancija izmjerena u kratkom spoju biti će uvijek uzdužna reaktancija.

Prema sl.3-44, uzbuđna struja i_k , koja je potrebna da bi prove- li pokus kratkog spoja sa nominalnom strujom u statoru, pokriva uzduž-



Sl.3-44

no protjecanje armature, tako da preostaje samo mali dio uzbude Δi koji pokriva pad napona uslijed rasipanja statora. U stvari se inducira samo mali napon $\mathcal{E}$, i tok u rasporu je vrlo malen. Zasićenje u željezu je vrlo nisko, tj. nalazimo se na donjem dijelu karakteristike praznog hoda, koji je praktički linearan, a određen je veličinom zračnom raspora. Ovako nezasićenom stanju odgovarao bi znatno viši napon uz istu uzbudu, no što bi ga dobili po krivulji praznog hoda. Tako bi prema sl.3-44b) uzbuđnoj struji i_k , za koju je $I_k = I_n$, odgovarao napon na otvorenim stezaljkama, s kojim treba računati reaktanciju :

$$U_a = U_n \cdot \frac{i_k}{i'_0} \quad (1)$$

gdje je i'_0 onaj dio uzbuđne struje u praznom hodu, koji odgovara zračnom rasporu. Sinhrona reaktancija je prema tome :

$$X_d = \frac{U_a}{\sqrt{3} \cdot I_n} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \cdot \frac{i_k}{i'_0} \quad (2)$$

ili kao relativna vrijednost

$$x_d = \frac{X_d}{X_n} = \frac{i_k}{i_o} \quad (3)$$

Često se definira zasićena vrijednost sinhrona reaktancije uzevši umjesto karakteristike magnetiziranja zračnog rasporeda pravac kroz tačku nominalnog napona, tako da je ;

$$U_{o\ zas} = U_n \cdot \frac{i_k}{i_o} \quad (4)$$

odnosno

$$x_{d\ zas} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \cdot \frac{i_k}{i_o} \quad (5)$$

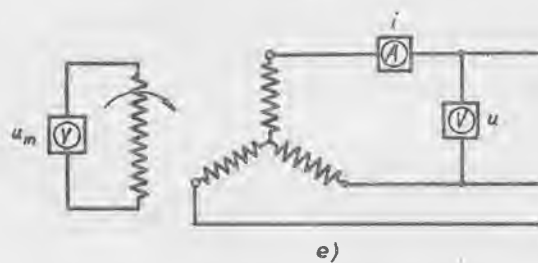
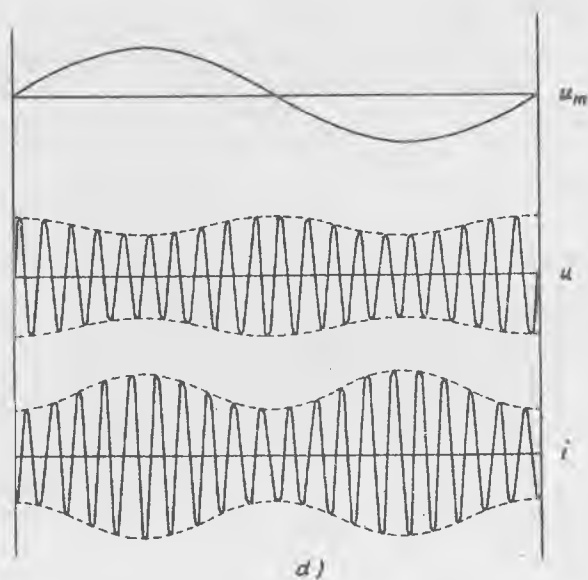
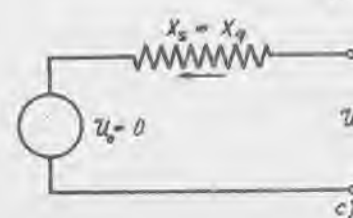
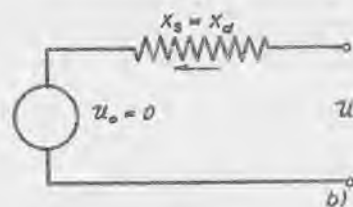
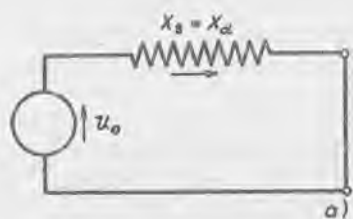
$$x_{d\ zas} = \frac{i_k}{i_o} \quad (6)$$

3.4.19 Mjerenje narinutim naponom. Poprečna sinhrona reaktancija ne može se mjeriti na isti način, jer struje kratkog spoja daju uvijek uzdužno protjecanje. Može se, međutim, mjerenje obrnuti, pa umjesto unutarnjeg napona induciranog u stroju, koji šalje struju kroz namot kratko spojen na stezaljkama (sl.3-45a), upotrebiti vanjski napon narinut na stezaljke stroja koji je neuzbudjen, tj. nema unutarnjeg napona (sl.3-45b). U ovom slučaju struje će biti induktivne obzirom na izvana narinuti napon, a okretno polje koje ove struje proizvode povući će sa sobom rotor, i nastojati da ga zadrže u položaju manjeg magnetskog otpora, t.j. u uzdužnom položaju, prema sl.3-45b). Vanjskim pogonom možemo, međutim, dovesti rotor i u poprečni položaj (sl.3-45c). Praktički se rotor ne može trajno tjerati sinhronom brzinom u poprečnom položaju, pa se pokus provodi tako, da rotor vrtimo asinhrono uz vrlo malo klizanje, pri čemu rotor prolazi naizmjenice uzdužni i poprečni položaj. Uslijed toga struja varira između minimalne vrijednosti I_{min} u uzdužnom, i maksimalne vrijednosti I_{max} u poprečnom položaju. Ako pad napona u dovodima nije zanemariv, varirat će i napon na stezaljkama od U_{max} do U_{min} . Rotorski namot mora biti otvoren pri samom mjerenju, ali bi bilo vrlo opasno otvoriti ga prije no što se brzina sasvim približila sinhronoj, zbog visokih napona, koji bi se inducirali u rotoru. Zbog toga se zalet do neposredno prije mjerenja vrši uz kratko spojeni uzbudni namot. Kao još jedna kontrola uzdužnog odnosno poprečnog položaja rotora može poslužiti mjerenje napona na rotorskom namotu. Ovaj će napon biti nula u uzdužnom, a maksimalan u poprečnom položaju. Najzgodnije je snimiti napon i struju oscilografski (sl.3-45d), pa iz oscilograma računati :

$$x_d = \frac{U_{max}}{\sqrt{3} \cdot I_{min}} \quad (1)$$

$$x_g = \frac{U_{min}}{\sqrt{3} \cdot I_{max}} \quad (2)$$

Narinuti napon na stezaljkama ne smije biti prevelik, kako neuzbudjeni stroj ne bi vukao prevelike struje i kako reakcioni moment, ko-



ji nastoji zadržati rotor u uzdužnom položaju, ne bi bio prevelik; no isto tako narinuti napon ne smije biti ni premalen, jer bi u tom slučaju remanentni unutarnji napon, koji se inducira u stroju, kvario rezultate. Obično se uzima kao narinuti napon na stezaljkama bar 25 % U_n .

Kako bi se eliminirale greške baždarenja oscillografa, najjednostavnije je odrediti uzdužnu reaktanciju iz pokusa trajnog kratkog spoja, a iz pokusa klizanja odrediti omjer poprečne i uzdužne reaktancije :

$$\frac{X_g}{X_d} = \frac{U_{min}}{U_{max}} \cdot \frac{I_{min}}{I_{max}} \quad (3)$$

pa odatle izračunati poprečnu reaktanciju

$$X_g = X_d \cdot \frac{U_{min}}{U_{max}} \cdot \frac{I_{min}}{I_{max}} \quad (4)$$

3.4.20 Mjerenje reverziranjem uzbude. Kod strojeva s istaknutim polovima, ako pogonski stroj nije vrlo velik, ne može se postići dovoljno malo klizanje, jer čim se klizanje znatno smanji, okretno polje povuče i zadrži rotor u uzdužnom položaju. Da bi dobili poprečnu reaktanciju, treba uzbudu stroja smanjiti na nulu, i onda je polako povećavati u suprotnom smjeru. Kut između okretnog polja i rotora postaje pri tom sve veći, i statorska struja raste. Konačno, kada kut dosegne 90° el, rotor preskoči za jedan polni korak. Krajnjem položaju od 90° el. odgovara maksimalna struja statora, pa je poprečna reaktancija :

$$X_g = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_{max}} \quad (1)$$

3.4.21 Mjerenje početnih reaktancija na mirnom rotoru. Početna reaktancija može se izmjeriti i statičkim postupkom, tj. mjerenjem kod kojega rotor miruje. Jednofazni izmjenični napon priključimo na stezaljke statora A - B. Rotorski namot kratko spojimo preko ampermetra, koji pokazuje induciranu izmjeničnu struju, i zakrećemo rotor tako dugo, dok inducirana struja u rotorskom namotu postigne maksimalnu vrijednost (sl.3-46). Sada znamo, da se os rotorskog namota podudara s rezultirajućom osi statorskih namota A - B. Pošto je frekvencija izmjeničnog polja 50 Hz, to se u prigušnom namotu, polnim nastavcima i uzbudnom namotu induciraju struje, koje potiskuju tok u rasipne putove van rotora, slično kao kod brzih promjena u samom početku udarnog kratkog spoja. To znači, da mjerena reaktancija ne će odgovarati sinhronoj reaktanciji, već početnoj reaktanciji. Kako je rotor postavljen u uzdužni položaj, i kako mjerimo napon na 2 faze spojene u seriju, biti će :

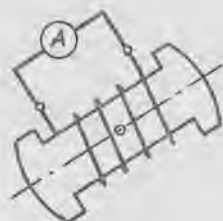
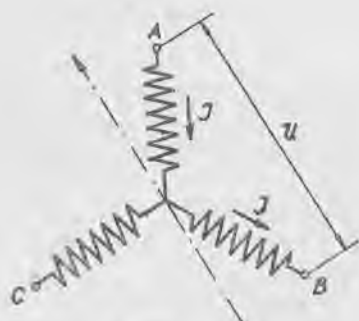
$$X_d'' = \frac{U}{2 \cdot I_d} \quad (1)$$

Isto tako možemo izmjeriti poprečnu vrijednost X_g'' , ako rotor postavimo u položaj, u kojemu se u rotorskom namotu ne inducira struja, pa računamo za taj položaj :

$$X_g'' = \frac{U}{2 \cdot I_g} \quad (2)$$

3.4.22 Mjerenje bez postavljanja rotora u određeni položaj.

Dok je za upravo opisano mjerenje potrebno namještat i rotor u određeni položaj, što može predstavljati prilične poteškoće kod jako velikih generatora, može se izvesti statičko mjerenje uz bilo koji položaj rotora, ako mjerimo uzastopce narinuti napon i struju na stezaljkama A-B, B-C i C-A. Označimo izmjerene reaktancije po fazi kako slijedi :



Sl.3.46

$$X_{AB} = \frac{U_1}{2 I_1}, X_{BC} = \frac{U_2}{2 I_2}, X_{CA} = \frac{U_3}{2 I_3} \quad (1)$$

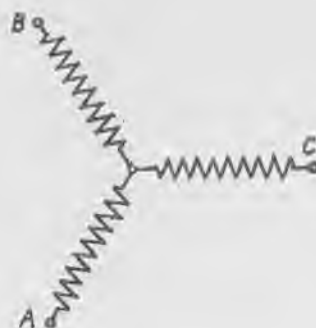
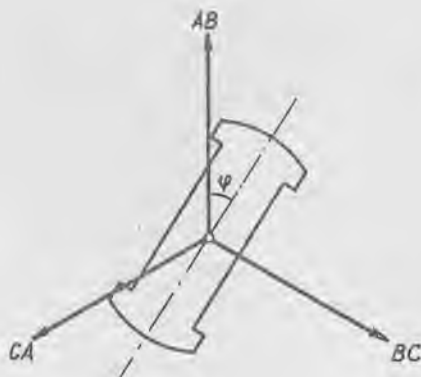
Pri tome neka je položaj rotora prema sl.3-47 općenito takav, da njegova os zatvara s osi A-B kut φ . Ako zadržimo indekse 1,2,3 kao gore za mjerenje na stezaljkama A-B, B-C, C-A, bit će kutovi za sva tri mjerenja :

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi \\ \varphi_2 &= \varphi - 120 \\ \varphi_3 &= \varphi + 120 \end{aligned} \quad (2)$$

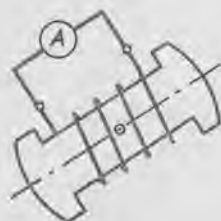
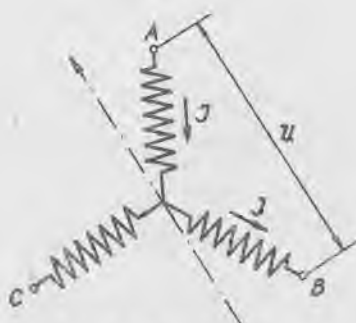
Pošto smo reaktancije X_d'' i X_q'' definirali tako, da njihov umnožak s faznom strujom pri simetričnom opterećenju daje fazni napon, npr.:

$$I \cdot X_d'' = U_d'' \quad (3)$$

a pošto je kod simetričnog trofaznog sistema maksimalno strujno protjecanje za 50 % veće od protjecanja jedne faze, treba u ovom



Sl.3-47



Sl.3.46

Pošto smo reaktancije X_d'' i X_q'' definirali tako, da njihov umnožak s faznom strujom pri simetričnom opterećenju daje fazni napon, npr.:

$$I \cdot X_d'' = U_d'' \quad (3)$$

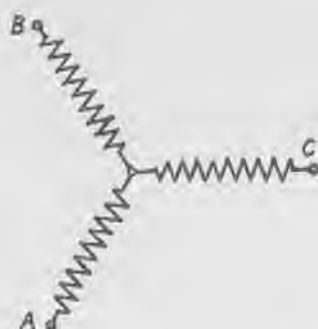
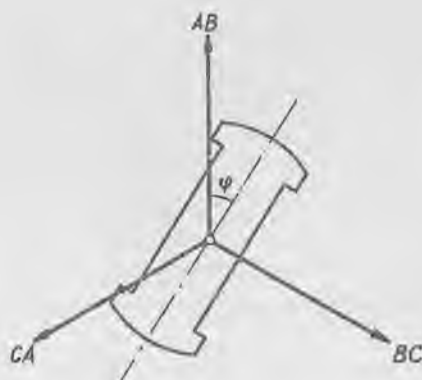
a pošto je kod simetričnog trofaznog sistema maksimalno strujno protjecanje za 50 % veće od protjecanja jedne faze, treba u ovom

3.4.22 Mjerenje bez postavljanja rotora u određeni položaj. Dok je za upravo opisano mjerenje potrebno namještati rotor u određeni položaj, što može predstavljati prilične poteškoće kod jako velikih generatora, može se izvesti statičko mjerenje uz bilo koji položaj rotora, ako mjerimo uzastopce narinuti napon i struju na stezaljkama A-B, B-C i C-A. Označimo izmjerene reaktancije po fazi kako slijedi :

$$X_{AB} = \frac{U_1}{2 I_1}, \quad X_{AC} = \frac{U_2}{2 I_2}, \quad X_{CA} = \frac{U_3}{2 I_3} \quad (1)$$

Pri tome neka je položaj rotora prema sl.3-47 općenito takav, da njegova os zatvara s osi A-B kut φ . Ako zadržimo indekse 1,2,3 kao gore za mjerenje na stezaljkama A-B, B-C, C-A, bit će kutovi za sva tri mjerenja :

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \varphi \\ \varphi_2 &= \varphi - 120 \\ \varphi_3 &= \varphi + 120 \end{aligned} \quad (2)$$



Sl.3-47

slučaju, gdje imamo jednofazni sistem, uvrstiti umjesto struje I svega vrijednost $\frac{2}{3} \cdot I$. Osim toga imamo 2 faze spojene u seriju, pri čemu je namotni faktor posao $\sqrt{3}/2$ -puta manji, ali je broj zavoja dvostruk. Zbog svih tih razloga djelotvorno je protjecanje, izraženo kao struja statora :

$$I_\theta = \frac{2}{3} \cdot I \cdot 2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \frac{2}{3} \sqrt{3} \cdot I \quad (4)$$

Ovu struju rastavimo na uzdužnu komponentu i poprečnu komponentu :

$$I_{\theta d} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (5)$$

$$I_{\theta z} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{3} \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (6)$$

Uslijed ovolikog uzdužnog odnosno poprečnog protjecanja inducirao bi se u namotu u uzdužnoj osi napon :

$$U_d = I_{\theta d} \cdot X_d'' \quad (7)$$

a u poprečnoj osi :

$$U_z = I_{\theta z} \cdot X_z'' \quad (8)$$

Kako je os namota pomaknuta prema uzdužnoj osi za kut φ , i kako se u obe faze inducira napon za $2 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3}$ -puta veći, bit će ukupni napon na stezaljkama :

$$\begin{aligned} U_i &= U_d \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi + U_z \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi = \\ &= \frac{2}{3} \sqrt{3} I_1 \cdot \cos \varphi \cdot X_d'' \cdot \sqrt{3} \cdot \cos \varphi + \frac{2}{3} \sqrt{3} I_1 \sin \varphi \cdot X_z'' \cdot \sqrt{3} \cdot \sin \varphi = \\ &= 2 I_1 (X_d'' \cdot \cos^2 \varphi + X_z'' \sin^2 \varphi) \end{aligned} \quad (9)$$

Prema tome je :

$$X_{AB} = \frac{U_i}{2 I_1} = X_d'' \cdot \cos^2 \varphi + X_z'' \sin^2 \varphi \quad (10)$$

i analogno :

$$X_{BC} = \frac{U_2}{2 I_2} = X_d'' \cdot \cos^2 (\varphi - 120) + X_z'' \sin^2 (\varphi - 120) \quad (11)$$

$$X_{CA} = \frac{U_3}{2 I_3} = X_d'' \cdot \cos^2 (\varphi + 120) + X_z'' \sin^2 (\varphi + 120) \quad (12)$$

Promotrimo li bilo koji od tih izraza, npr. X_{AB} , vidjeti ćemo da se daje prikazati u obliku :

$$X_{AB} = \frac{X_E'' + X_d''}{2} - \frac{X_E'' - X_d''}{2} \cdot \cos 2\varphi = X_{med} - \Delta X \cos 2\varphi \quad (13)$$

tj. kao neka srednja vrijednost $X_{med} = \frac{X_E'' + X_d''}{2}$, neovisna o kutu φ , kojoj se pridodaje ili oduzima drugi član, koji varira od $-\Delta X$ do $+\Delta X$. Očito će krajnje vrijednosti odgovarati traženim početnim reaktancijama, tj.

$$X_d'' = X_{med} - \Delta X \quad (14)$$

$$X_E'' = X_{med} + \Delta X \quad (15)$$

Potrebno je samo izraziti vrijednosti X_{med} i ΔX s pomoću izmjerenih vrijednosti X_{AB} , X_{BC} i X_{CA} . Da bi to postigli, napišimo sve tri mjerene reaktancije u gornjem obliku :

$$X_{AB} = X_{med} - \Delta X \cdot \cos 2\varphi \quad (16)$$

$$X_{BC} = X_{med} - \Delta X \cdot \cos (2\varphi + 120) \quad (17)$$

$$X_{CA} = X_{med} - \Delta X \cdot \cos (2\varphi - 120) \quad (18)$$

i saberimo sva tri izraza. Pošto je $\cos 2\varphi + \cos (2\varphi + 120) + \cos (2\varphi - 120) = 0$, slijedi :

$$X_{med} = \frac{X_{AB} + X_{BC} + X_{CA}}{3} \quad (19)$$

Ako sada eliminiramo kut φ tako da izrazimo iz jednadžbi :

$$\cos 2\varphi = \frac{X_{med} - X_{AB}}{\Delta X}; \quad \cos (2\varphi + 120) = \frac{X_{med} - X_{BC}}{\Delta X}; \quad \cos (2\varphi - 120) = \frac{X_{med} - X_{CA}}{\Delta X} \quad (20)$$

i uvrstimo u jednadžbu

$$\cos^2 2\varphi + \cos^2 (2\varphi + 120) + \cos^2 (2\varphi - 120) = \frac{3}{2} \quad (21)$$

dobivamo kvadratnu jednadžbu :

$$(X_{med} - X_{AB})^2 + (X_{med} - X_{BC})^2 + (X_{med} - X_{CA})^2 = \frac{3}{2} \cdot \Delta X^2 \quad (22)$$

iz koje slijedi :

$$\Delta X = \frac{2}{3} \sqrt{X_{AB}(X_{AB} - X_{BC}) + X_{BC}(X_{BC} - X_{CA}) + X_{CA}(X_{CA} - X_{AB})} \quad (23)$$

Kod svih ovih statičkih mjerenja treba voditi računa o tome, da će se uslijed narinutog izmjeničnog napona u polnim nastavcima i prigušnim namotima rotora inducirati visoke struje. Zagrijavanje uslijed tih struja može se pokazati opasnim osobito kod turbogeneratorsa s masivnim rotorom. Zato treba prije mjerenja ocijeniti prilike, i odabrati napon, koji nije odviše visok, a tokom mjerenja kontrolirati temperaturu. Samo mjerenje treba izvesti što brže. Kod mjerenja potrebno je zaključiti rotor, kako se ne bi pod djelovanjem magnetskih sila zakrenuo.

3.4.23 Korekcija zbog radnog otpora. Budući da su početne reaktancije često dosta malene, može se dogoditi, da radni otpor ne bude zanemariv. U tom slučaju treba uz struju i napon mjeriti vatmetrom snagu P , pa izračunati impedanciju i $\cos \varphi$:

$$Z = \frac{U}{I} \quad (1)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI} \quad (2)$$

iz čega slijedi reaktancija:

$$X = Z \cdot \sin \varphi \quad (3)$$

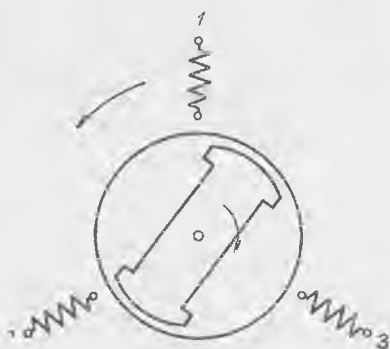
Dalje se s reaktancijama računa kako je gore izvedeno.

3.4.24 Prolazna reaktancija. Ona se u poprečnom položaju podudara kod strojeva s istaknutim polovima s poprečnom sinhronom reaktancijom:

$$X_2' = X_2 \quad (1)$$

U koliko nema prigušnog namota, onda se poprečna početna reaktancija također podudara s ovom vrijednošću. Kod lameliranih polnih nastavaka i bez prigušnog namota podudaraju se početna i prolazna reaktancija i za uzdužni položaj.

3.4.25 Inverzna reaktancija X_2 suprotstavlja se strujama inverznog



sistema, tj. simetričnom sistemu struja u sve tri faze, koje daju okretno polje suprotnog smjera od smjera vrtnje rotora (sl.3-48). Pošto se kod toga statosko okretno polje obzirom na rotor mijenja dvostrukom frekvencijom, bit će tok potisnut iz rotora, pa će reaktancija odgovarati početnim vrijednostima, a pošto rotor naizmjenice dolazi u uzdužni i poprečni položaj, bit će:

$$X_2 \approx \frac{X_{d1}'' + X_2''}{2} \quad (1)$$

Sl.3-48

Svaki nesimetrični sistem struja može se rastaviti u dva simetrična sistema, direktni i inverzni, koji daju okretno polje u smjeru vrtnje i nasu-

prot smjeru vrtnje rotora. Ako je opterećeno i zvjezdište generatora, onda pridolazi i treći, nulti sistem, kod kojega su struje u sve tri faze istofazne. Vrijedi dakle:

	faza	1	2	3
direktni sistem		J_d	αJ_d	$\alpha^2 J_d$
inverzni sistem		J_i	$\alpha^2 J_i$	αJ_i
nulti sistem		J_o	J_o	J_o

$$J_1 = J_d + J_i + J_o$$

$$J_2 = \alpha J_d + \alpha^2 J_i + J_o$$

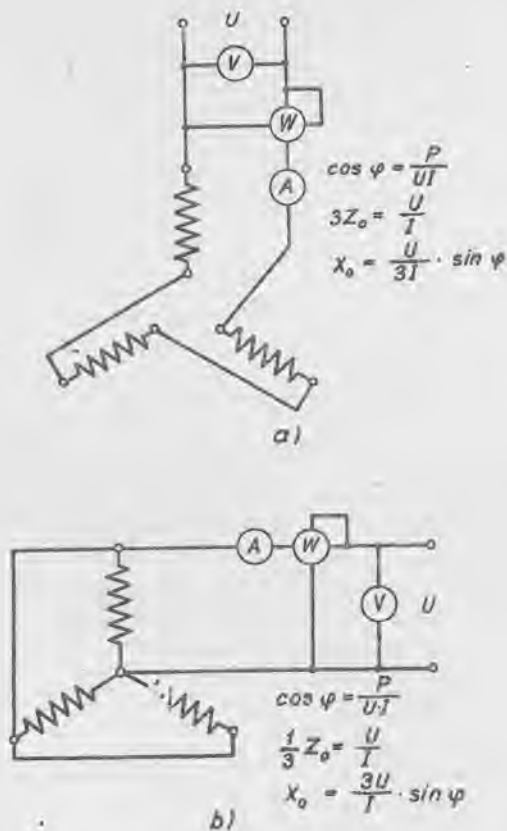
$$J_3 = \alpha^2 J_d + \alpha J_i + J_o$$

gdje je α označen operator :

$$\alpha = \varepsilon^{-j \cdot 120^\circ}$$

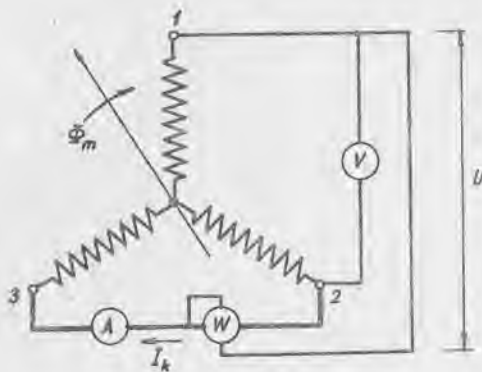
tj. zakret za 120° bez promjene veličine.

Za nulti sistem vrijedi nulreaktancija X_o , koju možemo izmjeriti tako, da kroz sve tri faze u seriju ili sve tri faze paralelno šalje-mo izmjeničnu struju normalne frekvencije (sl.3-49). Omjer napona i



struje za jednu fazu jednak je nultoj impedanciji, koja je približno jednaka nultoj reaktanciji. Ako treba uzeti u obzir i radni otpor, mjerimo osim napona i struje snagu vatmetrom, i računamo prema 3.4.23 odnosno prema sl. 3-49. Rotor može pri tome rotirati ili mirovati, ili pak biti izvadjen, a da to ne utječe mnogo na rezultat.

3.4.26 Dvopolni kratki spoj. Tipičan primjer nesimetričnog opterećenja, kod kojega se pojavljuje i inverzni sistem struje, je dvopolni kratki spoj (sl. 3-50). Budući da ovdje nema struje iz zvjezdista, to je struja nultog sistema $J_0 = 0$. Za fazne struje se može napisati:



$$J_0 = J_d + J_i = 0$$

$$J_2 = \alpha \cdot J_d + \alpha^2 J_i = I_k \quad (1)$$

$$J_3 = \alpha^2 J_d + \alpha J_i = -I_k$$

$$J_i = -J_d \quad (2)$$

$$J_d(\alpha - \alpha^2) = I_k$$

$$J_d = \frac{j}{\sqrt{3}} \cdot I_k \quad (3)$$

Ako uvažimo, da je fazni napon u praznom hodu uz nepromijenjenu uzbudu bio u prvoj fazi :

$$U_0 = j\omega \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

onda za f e napone kod 2-polnog kratkog spoja vrijedi :

$$U_1 = U_0 - J_d Z_d - J_i Z_2$$

$$U_2 = \alpha U_0 - \alpha J_d Z_d - \alpha^2 J_i Z_2 \quad (5)$$

$$U_3 = \alpha^2 U_0 - \alpha^2 J_d Z_d - \alpha J_i Z_2$$

Očito naponi u međusobno kratko spojenim fazama moraju biti jednaki:

$$U_2 = U_3 \quad (6)$$

iz čega slijedi

$$U_0(\alpha - \alpha^2) - J_d Z_d(\alpha - \alpha^2) + J_i Z_2(\alpha - \alpha^2) = 0$$

$$U_0 - J_d(Z_d + Z_2) = 0$$

$$J_d = \frac{U_0}{Z_d + Z_2} \approx \frac{U_0}{j(X_d + X_2)} \quad (7)$$



Sl. 3-50

Uvrstimo direktnu komponentu izraženu s pomoću izmjerene struje I_k , i prijedjimo na apsolutne iznose :

$$I_d = \frac{I_k}{\sqrt{3}} = \frac{U_o}{X_d + X_2} \quad (8)$$

$$I_k = U_o \cdot \frac{\sqrt{3}}{X_d + X_2} \quad (9)$$

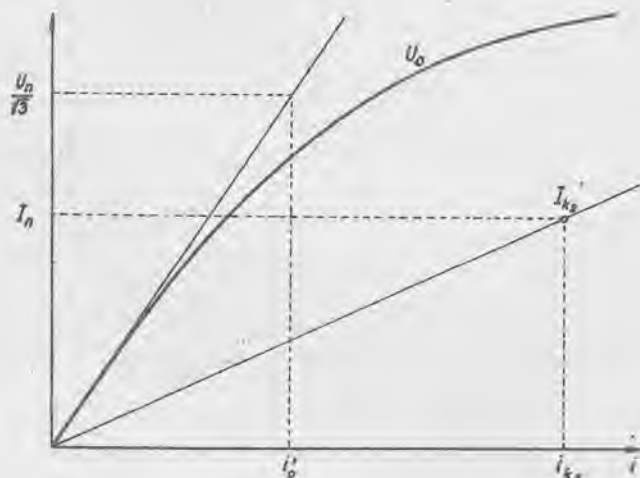
$$X_2 = \frac{U_o \cdot \sqrt{3}}{I_k} - X_d \quad (10)$$

Pošto je stroj u kratkom spoju nezasićen, to i vrijednost fiktivnog napona U_o treba uzeti s karakteristike zračnog raspóra, a ne sa stvarne karakteristike praznog hoda. Ako smo snimili i karakteristiku dvopolnog kratkog spoja $i_{k2} = f(i)$, pa ako odgovara nominalnoj struji $i_{k2} = I_n$ uzbuda i'_{k2} , dok nominalnom naponu $U_n / \sqrt{3}$ odgovara i'_o , onda vrijedi (sl.3-51)

$$i_{k2} : i'_o = I_n : I_k \cdot \frac{U_n}{U_o \cdot \sqrt{3}} \quad (11)$$

Omjer $\frac{U_o}{I_k}$ izlazi odatle

$$\frac{U_o}{I_k} = \frac{i_{k2}}{i'_o} \cdot \frac{U_n}{I_n \cdot \sqrt{3}} \quad (12)$$



Sl.3-51

Ako izraz za inverznu reaktanciju izrazimo relativno, tj. podijelimo nominalnom reaktancijom $U_n / I_n \sqrt{3}$, dobivamo :

$$x_2 = \frac{i_{k2}}{i'_o} \cdot \sqrt{3} - x_d \quad (13)$$

Može se, međutim, inverzna reaktancija odrediti i direktnim mjerenjem napona između slobodne faze i kratko spojenih faza. Taj je napon naime jednak :

$$U = U_1 - U_2 \quad (14)$$

$$U = U_0(1-\alpha) - J_d Z_d(1-\alpha) - J_i Z_2(1-\alpha^2) \quad (15)$$

Uvrstimo ovamo $J_i = -J_d$ i $U_0 = J_d(Z_d + Z_2)$, pa dobivamo:

$$U = (1-\alpha) J_d(Z_d + Z_2) - (1-\alpha) J_d Z_d + (1-\alpha^2) J_d Z_2 \quad (16)$$

Uvrstimo također :

$$J_d = \frac{j}{\sqrt{3}} \cdot I_k \quad (17)$$

što daje :

$$\begin{aligned} U &= \frac{j}{\sqrt{3}} \cdot I_k (1-\alpha)(Z_d + Z_2 - Z_d + Z_2 + \alpha Z_2) = \\ &= \frac{j}{\sqrt{3}} \cdot I_k (1-\alpha)(2+\alpha)Z_2 = j \cdot \sqrt{3} \cdot I_k \cdot Z_2 \end{aligned} \quad (18)$$

jer je

$$(1-\alpha)(2+\alpha) = (1-\alpha)(1-\alpha^2) = 1-\alpha-\alpha^2+\alpha^3 = 3$$

Odatle je impedancija koju mjerimo :

$$Z_2' = j Z_2 = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_k} \quad (19)$$

Pošto je impedancija Z_2 bila po definiciji :

$$Z_2 = R + jX_2 = Z \cdot e^{j\varphi} \quad (20)$$

biti će ova mjerena impedancija :

$$Z_2' = j Z_2 = -X_2 + jR_2 = Z \cdot e^{j(\varphi + \frac{\pi}{2})} \quad (21)$$

Kut između napona U i struje I_k odgovara dakle kutu $\varphi + \frac{\pi}{2}$.

Ako vatmetrom izmjerimo snagu prema sl.3-50, biti će :

$$P = UI \left| \cos\left(\varphi + \frac{\pi}{2}\right) \right| = UI \left| \sin \varphi \right| \quad (22)$$

dok su po iznosu Z_2' , Z_2 jednaki, pa se može računati:

$$\sin \varphi = \frac{P}{U I_k} \quad (23)$$

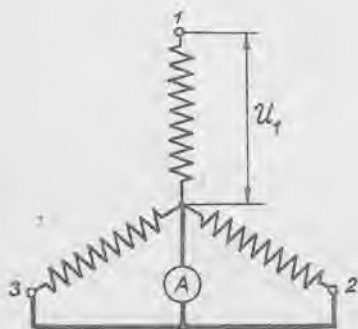
$$Z_2 = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_k} \quad (24)$$

$$X_2 = Z_2 \cdot \sin \varphi = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_k} \cdot \frac{P}{U \cdot I_k} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot I_k^2} \quad (25)$$

3.4.27 Odredjivanje inverzne reaktancije iz dvopolnog udarnog kratkog spoja. Obe prethodne metode često nisu provedive, ako postoji opasnost pregrijavanja uslijed inverznog protjecanja, koje daje struje dvostruke frekvencije u rotoru. Osim toga, ove struje u rotoru daju opet inverzno i direktno protjecanje, koje rotira dvostrukom sinhronom brzinom nasuprot odnosno u smjeru vrtnje obzirom na rotor, a sinhronom brzinom nasuprot, odnosno trostrukom sinhronom brzinom u smjeru vrtnje obzirom na stator. Vidi se, da će se međusobnim uplivom statora i rotora stvoriti niz viših harmoničkih članova u naponu i struji, dok su se naša razmatranja odnosila samo na osnovne harmoničke članove. Zato će često biti potrebno oscilografski snimiti mjereni napon i struju, i dalje računati samo s osnovnim harmoničkim članom napona odnosno struje. Ako su polni nastavci masivni, ili stroj ima prigušni namot, onda to ne će biti potrebno, jer se viši harmonički članovi praktički posve prigušuju. Da bi izbjegli pregrijavanje rotora, možemo upotrebiti dvopolni udarni kratki spoj, kod kojega u prvom času vrijedi relacija (7), iz 3.4.26, samo što mjesto sinhronne reaktancije X_d treba uvrstiti početnu reaktanciju X_d'' , a mjesto struje trajnog dvopolnog kratkog spoja početnu vrijednost I_{d2}'' dobivenu razradom oscilograma dvopolnog udarnog kratkog spoja na isti način kako je to pokazano kod trolejnog kratkog spoja, tako da je :

$$X_2 = \frac{U_0 \sqrt{3}}{I_k''} - X_d'' \quad (1)$$

3.4.28 Nul-reaktancija. Nul-reaktancija može se jednostavno odrediti iz pokusa dvopolnog kratkog spoja prema zvjezdištu (sl.3-52). Ampermetrom mjerimo ukupnu struju prema zvjezdištu



Sl.3-52

$$I = |J_2 + J_3| \quad (1)$$

a voltmetrom napon na slobodnoj fazi:

$$U = U_1 \quad (2)$$

Pošto je ovdje i zvjezdište opterećeno, pojavljuje se i nulta komponenta, pa izrazi za fazne struje glase :

$$\begin{aligned} J_1 &= J_d + J_i + J_o = 0 \\ J_2 &= \alpha J_d + \alpha^2 J_i + J_o \\ J_3 &= \alpha^2 J_d + \alpha J_i + J_o \end{aligned} \quad (3)$$

Ako saberemo sve tri jednačbe, dobivamo :

$$J_o = \frac{J_2 + J_3}{3} \quad (4)$$

Ako prvu jednačbu pomnožimo sa α , a treću sa α^2 , dobivamo :

$$J_d = \frac{\alpha^2 J_2 + \alpha J_3}{3} \quad (5)$$

Pomnožimo li prvu jednadžbu sa α^2 , a treću sa α , dobivamo :

$$J_i = \frac{\alpha J_2 + \alpha^2 J_3}{3} \quad (6)$$

Naponske jednadžbe glase :

$$\begin{aligned} U_1 &= U_0 - j J_d \cdot X_d - j J_i \cdot X_2 - j J_0 \cdot X_0 \\ U_2 &= \alpha U_0 - j \alpha J_d X_d - j \alpha^2 J_i X_2 - j J_0 X_0 = 0 \\ U_3 &= \alpha^2 U_0 - j \alpha^2 J_d X_d - j \alpha J_i X_2 - j J_0 X_0 = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Sabiranjem ovih triju jednadžbi dobivamo :

$$-3 j J_0 X_0 = U_1 \quad (8)$$

pa uvrštavanjem izraza za J_0 slijedi :

$$-j (J_2 + J_3) \cdot X_0 = U_1$$

$$X_0 = \frac{U_1}{|J_2 + J_3|} \quad (9)$$

Sveli smo dakle odredjivanje X_0 na mjerenje napona slobodne faze i ukupne struje zvjezdišta.

Uvrstimo li u naponske jednadžbe izraze za J_d , J_i i J_0 , dobivamo konačno kao iznos struje jedne faze :

$$I_n = I_0 = U_0 \cdot \frac{|X_2 - \alpha X_0| \cdot \sqrt{3}}{X_d X_2 + X_d X_0 + X_2 X_0} \quad (10)$$

a kao iznos ukupne struje zvjezdišta :

$$I_{k20} = |J_2 + J_3| = U_0 \cdot \frac{3 X_2}{X_d X_2 + X_d X_0 + X_2 X_0} \quad (11)$$

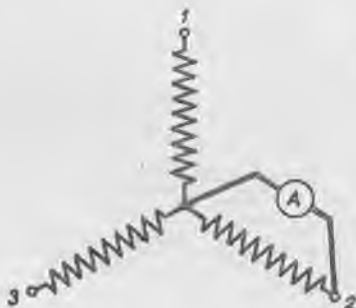
3.4.29 Jednopolni kratki spoj prema zvjezdištu. Upotpunimo još sliku razmatranjem jednopolnog kratkog spoja prema zvjezdištu (sl.3-53).

Strujne jednadžbe ovdje glase :

$$\begin{aligned} J_1 &= J_d + J_i + J_0 = 0 \\ J_2 &= \alpha J_d + \alpha^2 J_i + J_0 = I_k \\ J_3 &= \alpha^2 J_d + \alpha J_i + J_0 = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Zbrajanjem jednadžbi dobivamo :

$$J_0 = \frac{I_k}{3} \quad (2)$$



Množenjem prve sa α , a treće sa α^2 i zbrajanjem slijedi :

$$J_d = \frac{I_k}{3\alpha} = \frac{I_k}{3} \cdot \alpha^2 \quad (3)$$

Iz prve jednačbe dobivamo napokon :

$$J_i = -J_d - J_o = -\frac{I_k}{3} \cdot (1 + \alpha^2) = -\frac{I_k}{3} \cdot \alpha \quad (4)$$

Postavimo još naponsku jednačbu :

$$U_2 = \alpha U_o - j\alpha J_d X_d - j\alpha^2 J_i X_2 - jJ_o X_o = E \quad (5)$$

i uvrstimo izraze za J_d , J_i i J_o , pa dobivamo :

$$I_{k1} = U_o \cdot \frac{3}{X_d + X_2 + X_o} \quad (6)$$

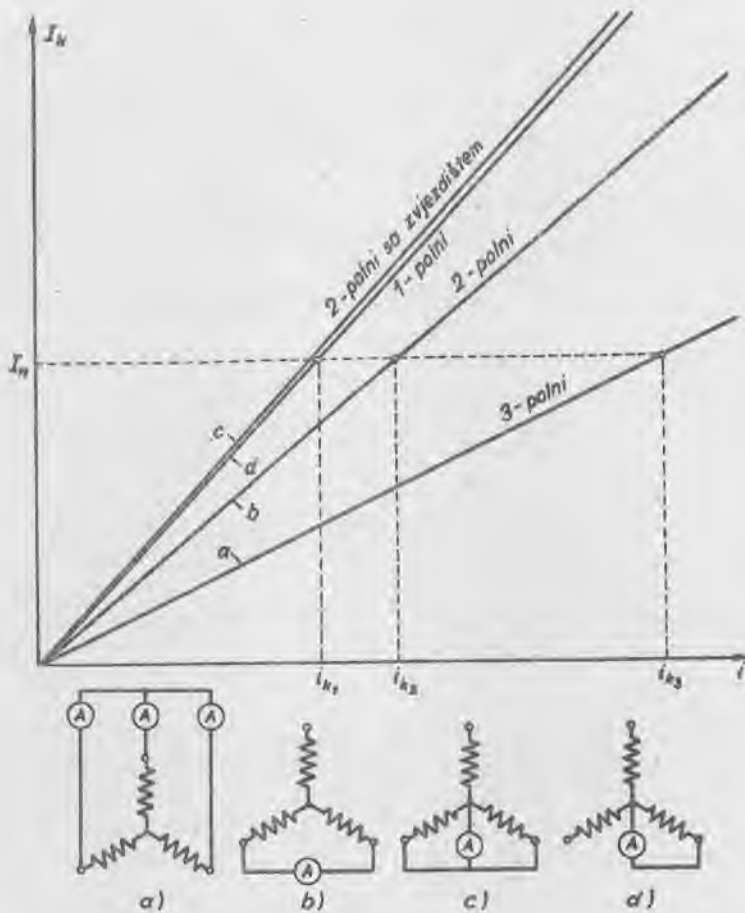
3.4.30 Karakteristike trajnog kratkog spoja. Ako sada skupimo razmatranja trofaznog, dvofaznog, dvofaznog sa zvjezdištem i jednofaznog kratkog spoja, dobivamo slijedeći pregled reaktancija kao kvocijenata napona faze u praznom hodu (uzetog po nezasićenoj karakteristici) i struje kratkog spoja :

Kratki spoj	$\frac{U_o}{I_k}$
3-polni	X_d
2-polni	$\frac{X_d + X_2}{\sqrt{3}}$
2-polni za zvjezdištem (struja zvjezdišta)	$\frac{X_d X_2 + X_d X_o + X_2 X_o}{3X_2}$
1-polni	$\frac{X_d + X_2 + X_o}{3}$

Uzmimo kao primjer hidrogenerator sa $x_d = 120\%$, $x_2 = 30\%$ i $x_o = 15\%$, pa izračunajmo struje kratkog spoja uzevši struju 3-polnog kratkog spoja kao jedinicu. Za ostale slučajeve onda izlazi :

	I_k
3-polni kratki spoj	1
2-polni kratki spoj	1,4
2-polni sa zvjezdištem	1,85
1-polni sa zvjezdištem	1,8

Karakteristike trajnog kratkog spoja izgledale bi kao na sl.3-54.



Sl.3-54

Vrijednost uzbudne struje, koje odgovaraju nominalnoj struji, označavamo sa $i_{k3} = i_k$, i_{k2} i i_{k1} , a omjer tih vrijednosti i uzbudne struje nominalnog napona u praznom hodu za nezasićeno stanje predstavlja relativnu vrijednost pripadne reaktancije, kao što je to u 3.4.18 prikazano za sinhronu reaktanciju :

$$\frac{i_k}{i_o'} = x_d \quad (1)$$

$$\frac{i_{k2}}{i_o'} = \frac{1}{\sqrt{3}} (x_d + x_2) \quad (2)$$

$$\frac{i_{k1}}{i_o'} = \frac{1}{3} (x_d + x_2 + x_0) \quad (3)$$

3.4.31 Udarni i trajni kratki spoj. Početna struja udarnog kratkog spoja određuje maksimalnu momentanu vrijednost struje koja se može pojaviti pri udarnom kratkom spoju. Pošto se ova brzo prigušuje, ona nije mjerodavna ni za udešavanje zaštite, ni rasklopnu moć sklopki, ni za termička naprezanja stroja. No ako razmatramo mehanička naprezanja, onda će maksimalnoj momentanoj vrijednosti struje odgovarati maksimalna vrijednost sile među vodičima. Sa stanovišta mehaničkih naprezanja najinteresantnija je dakle početna struja udarnog kratkog spoja. Sklopka će isklopiti kratki spoj tek nakon nekog vremena, u kojem vremenu je početna struja već prešla u prolaznu. Za razmatranje isklapanja kratkog spoja važna je dakle prolazna struja udarnog kratkog spoja i njena vremenska konstanta. Termičko djelovanje dosiže bitnije razmjere tek nakon dužeg vremena, pa treba računati s trajnom strujom kratkog spoja. Ne treba zaboraviti na ulogu automatskog regulatora napona, koji može znatno podići uzбудu za vrijeme kratkog spoja, pa će struja trajnog kratkog spoja odgovarati sasvim drugoj vrijednosti uzbuđeno što je bila neposredno prije kratkog spoja. Velika mehanička naprezanja i udarci na temelje razlog su što se udarni kratki spoj nerado ponavlja, a pogotovo s punim iznosom napona. Zbog toga se mjerenja trajnog kratkog spoja, za koja je potreban drugačiji instrumentarij, izvode zasebno, pri čemu se izbjegava udarni kratki spoj na taj način, što se stroj razbudi, stezaljke kratko spoje, i onda stroj polako opet uzbuđi. Na taj način izbjegli smo udarac pri kratkom spajanju uzbuđenog stroja.

Kod snimanja karakteristike kratkog spoja $I_k = f(i)$ nije važno da se održava tačno nominalna frekvencija f_n . Kako uzbuđna struja određuje tok, a inducirani napon je direktno proporcionalan s tokom i brzinom vrtnje - dakle frekvencijom - dok su reaktancije također linearne ovisne o frekvenciji, to će struja I_k kao kvocijent inducirano napona i reaktancije biti neovisna o frekvenciji, u koliko ona nije toliko niska, da radne otpore više ne možemo zanemariti u usporedbi s reaktancijama.

Kod svih nesimetričnih kratkih spojeva - 2-polnih i 1-polnih - treba voditi računa o inverznom polju i zagrijavanju u površini rotora i prigušnom kavezu. Ovo zagrijavanje treba kontrolirati, a pokus u svakom slučaju provesti što brže.

3.4.32 Rasipna reaktancija X_σ . Prije ugradnje rotora narinemo na statorski namot napon iznosa U_f (fazna vrijednost), i izmjerimo faznu struju I_f koju stator uzima. Lako je izračunati dio napona, koji otpada na tok u provrtu ;

$$U_{prf} = \frac{1}{6,63} \cdot \left(\frac{w \cdot \xi}{100} \right)^2 \cdot \frac{f}{50} \cdot \frac{1}{2p} \cdot \left(l_a - \frac{1}{2} l_{kv} + \frac{\tau_p}{6} \right) \cdot I_f \quad (1)$$

gdje znači :

w, ξ = broj zavoja po fazi i faktor namatanja

f, p = frekvencija i broj pari polova

l_a = dužina željeznog paketa u (cm)

l_{kv} = ukupna širina svih ventilacionih kanala u (cm)

τ_p = polni korak u (cm)

Na rasipanje samog statora otpada prema tome napon :

$$U_{\sigma f} = U_f - U_{prf} \quad (2)$$

a tome odgovara reaktancija u omima :

$$X_{\sigma} = \frac{U_{\sigma f}}{I_f} \quad (3)$$

Može se također izvršiti mjerenje inducirano napona u rasporu pomoću posebno ugrađenog pokusnog svitka s poznatim brojem zavoja w_1 i faktorom namatanja ξ_1 . Ako mjerimo u kratkom spoju struju I_k i napon induciran u pokusnom svitku E_1 , onda je napon induciran po fazi statorskog namota :

$$E = I_k \cdot X_{\sigma} = E_1 \cdot \frac{w \cdot \xi}{w_1 \cdot \xi_1} \quad (4)$$

Mjerenje je nešto neprilično, jer snimljeni napon treba prvo podvrgnuti analizi, i računati s njegovim osnovnim harmoničkim članom.

Često se upotrebljava rasipna reaktancija po Potieru, tzv. Potier-ova reaktancija, koja se dobiva iz snimljenih karakteristika praznog hoda, kratkog spoja i induktivnog opterećenja, kako će biti поближе opisano u 3.5.2.

3.4.33 Gubici u kratkom spoju. Gubici u kratkom spoju mogu se prikazati na sljedeći način:

$$P_k = P_{R_{\Sigma}} + P_{\text{dod}} + P_{tr,v} \quad (1)$$

gdje su : $P_{R_{\Sigma}} = 1,5 \cdot I^2 \cdot R_{st}$ - gubici strujne topline u statorskom namotu, izračunati na osnovu otpora namota mjerenog istosmjernom strujom ;

P_{dod} -dodatni gubici, koji se sastoje od dodatnih gubitaka u samim vodičima zbog toga što ih protječe izmjenična struja, pa je otpor zbog skin-efekta povišen, zatim gubitaka vrtložnih struja, u namotu i bližim konstruktivnim dijelovima, te gubitaka koji u željezu uzrokuju rasipna polja ;

$P_{tr,v}$ gubici trenja i ventilacije, isti kao u praznom hodu.

Gubitke u željezu P_{Fe} možemo zanemariti, jer je glavno polje vrlo malo, a onaj dio gubitaka, koji nastaje od rasipnih polja, uzet je već u račun u dodatnim gubicima. Uzbudne gubitke ne mjerimo i ne iskazujemo posebno u kratkom spoju.

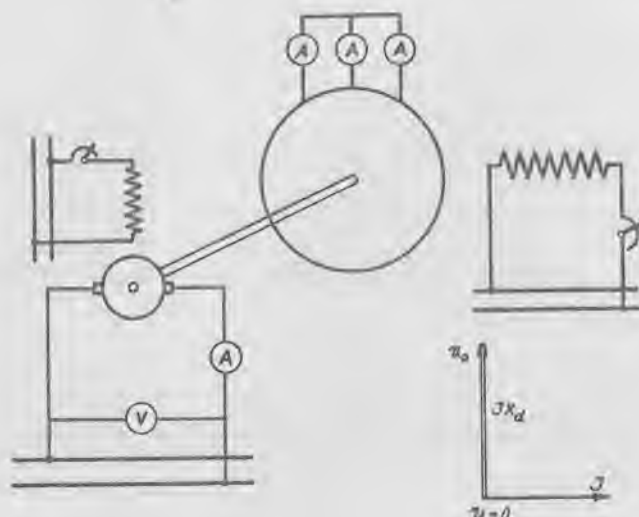
Pri odredjivanju gubitaka treba pridržavati nominalnu struju i nominalnu frekvenciju. Ako izmjerimo ukupne gubitke P_k , i izračunamo gubitke $P_{R_{\Sigma}}$, te uzmemo gubitke trenja i ventilacije $P_{tr,v}$ iz rezultata mjerenja u praznom hodu, možemo izračunati dodatne gubitke :

$$P_{\text{dod}} = P_k - P_{R_{\Sigma}} - P_{tr,v} \quad (2)$$

Može se uzeti, da zbroj gubitaka $P_{R_{\Sigma}} + P_{\text{dod}}$ ne ovisi o temperaturi, tj. da se jednako smanjuju s povećanjem temperature dodatni gubi-

oi, koliko se povećavaju gubici strujne topline. Zato izmjerene gubitke P_k ne treba preračunavati na pogonski toplo stanje, već se navodi izmjerena vrijednost. Ako se posebno navodi P_R , onda se uzima vrijednost pri $75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

3.4.34 Mjerenje gubitaka. Mjerenje ukupnih gubitaka može se izvršiti generatorskim postupkom s baždarenim motorom (sl.3-55). Mjerimo napon



Sl.3-55

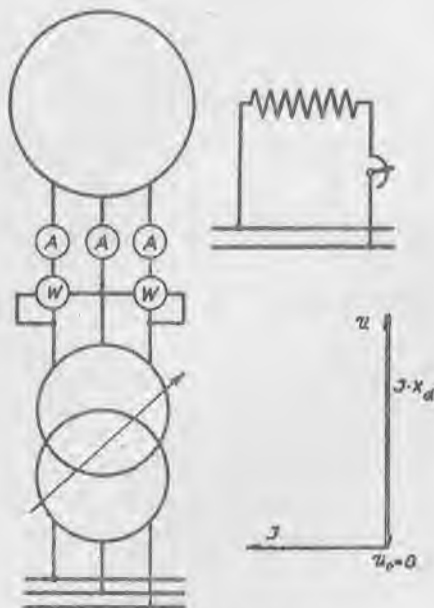
i struju, koju uzima iz mreže pogonski istosmjerni motor pri nominalnoj brzini i nominalnoj struji I_n sinhronog generatora. Iz krivulje baždarenja izvadimo gubitke pogonskog stroja P_{gp} , pa računamo :

$$P_k = UI - P_{gp} \quad (1)$$

Može se postupak i obrnuti prema sl.3-56, pa provesti mjerenje motorskim postupkom. U ovom slučaju stroj sinhroniziramo kao motor, a onda mu uzbudu snizimo toliko, da se još može održati u sinhronom radu. Istovremeno reguliranjem narinutog izmjeničnog napona na stazaljkama udesimo struju na nominalni iznos. Ako je uzbudna struja dovoljno niska, tako da možemo zanemariti gubitke u željezu, onda možemo na uključenim vatmetrima direktno očitati gubitke kratkog spoja P_k .

Gubici kratkog spoja često se mjere i metodom zaustavljanja, o čemu će biti govora u poglavlju 6.

3.5. Uzbuda



Sl.3-56

Poznavanje vrijednosti uzbudne struje za različita pogonska stanja važno je zbog dimenzioniranja uzbudnog namota i uzbudnika, te regulatora napona. Mjerenjem na gotovom stroju provjeravamo, da li se stvarne vrijednosti podudaraju s unaprijed proračunatima.

3.5.1 Karakteristične vrijednosti. Uzbudna struja praznog hoda i_0 je ona uzbudna struja, koja u praznom hodu pri nazivnoj brzini vrtnje daje na stezaljkama generatora nazivni napon. Kod prikazivanja uzbudne struje relativnim ili postotnim iznosima uzima se i_0 kao jedinica odnosno kao 100 %. Ova vrijednost se dobiva s karakteristike praznog hoda (sl.3-26, 3.3.1).

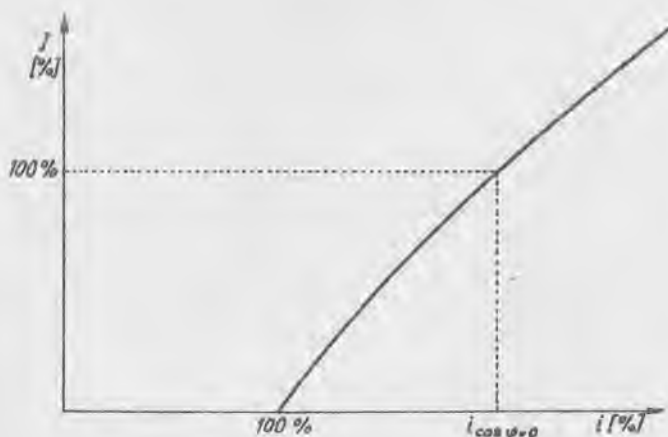
Uzbudna struja kratkog spoja i_k je ona uzbudna struja, koja pri tropskom trajnom kratkom spoju daje u statorskom namotu nazivnu struju. Izražena u postocima ova struja je jednaka:

$$i_k \% = \frac{i_k}{i_0} \cdot 100 = x_{d \text{ zos}} \cdot 100 \quad (1)$$

Što je prema 3.4.18 upravo jednako zasićenoj vrijednosti uzdužne sinhronne reaktancije izraženoj u postocima. Vrijednost i_k očitava se s karakteristike 3-polnog trajnog kratkog spoja (sl.3-54, 3.4.30). Umjesto zasićene sinhronne reaktancije često se navodi karakteristični "kratkospojni omjer" :

$$\epsilon = \frac{i_0}{i_k} = \frac{1}{x_{d \text{ zos}}} \quad (2)$$

Uzbudna struja za posve induktivno opterećenje $i_{\cos \varphi = 0}$ je ona uzbudna struja, kod koje generator priključen na mrežu nazivnog napona



Sl.3-57

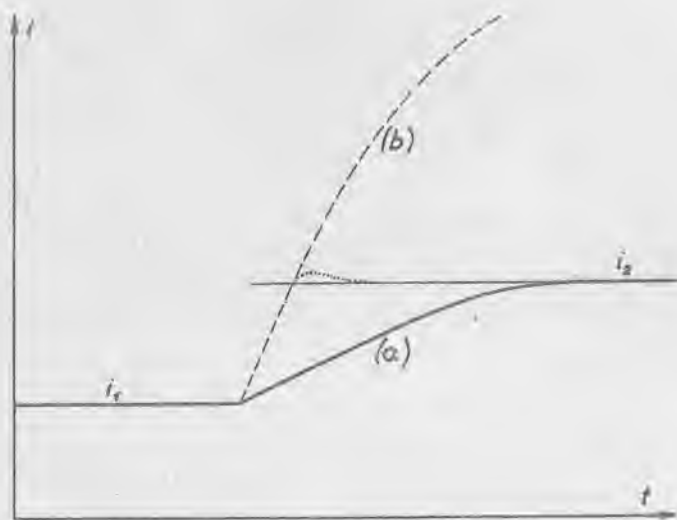
i frekvencije daje u mrežu čisto induktivnu struju po iznosu jednaku nominalnoj struji. Ova vrijednost može se snimiti pokusom induktivnog opterećenja na mrežu nominalnog napona.

Povećanjem uzbudne struje povećava se i induktivna struja. Rezultate uertavamo u dijagram sa strujom statora u ordinatnoj osi, a uzbudnom strujom u apscisnoj osi. Ako nanosimo relativne vrijednosti, tj.

I/I_n odnosno i/i_0 , onda za $I = 100\%$ možemo očitati relativnu vrijednost $i \cos \varphi = 0 / i_0$ (sl.3-57).

Nazivna uzbudna struja je ona struja, koja odgovara nazivnom opterećenju stroja, tj. opterećenju nazivnom strujom pri nazivnom faktoru snage, nazivnom naponu i frekvenciji. Izražava se također relativno, uz i_0 kao 100% .

Nazivni napon uzbuđe je napon na stezaljkama uzbuđnog namota pri nazivnom pogonu. Uzbuđnik redovito ima znatno viši "plafon" napona od ove vrijednosti, kako bi se postigla brža regulacija napona kod smetnji. Ako je uzbuđna struja bila i_1 , a nakon provedene regulacije treba da bude i_2 , onda bi - ako ovdje zanemarimo tromost uzbuđnika, koja je svakako manja od tromosti uzbuđnog kruga generatora -

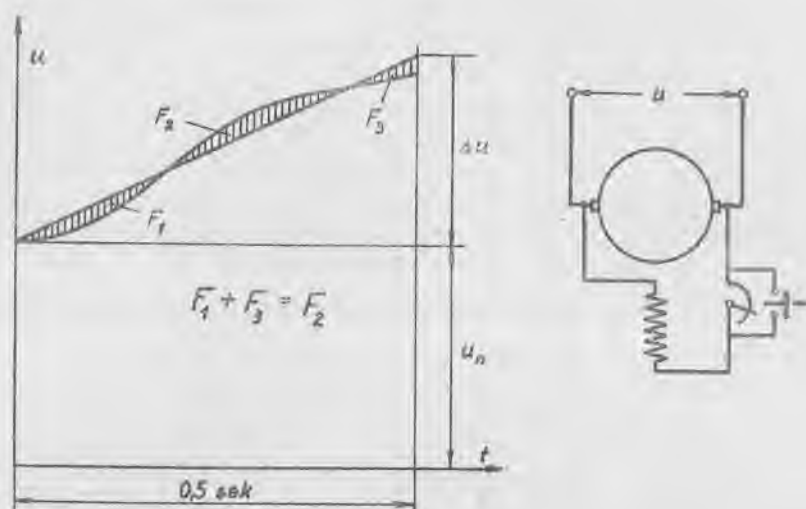


Sl. 3-58

podizanjem napona uzbuđnika od vrijednosti $u_1 = i_1 \cdot R$ na vrijednost $u_2 = i_2 \cdot R$ dobili porast struje od i_1 na i_2 po eksponencijalnoj krivulji (a) na sl. 3-58. Ako, međutim, napon uzbuđnika dignemo na znatno veći iznos, struja će znatno brže rasti po krivulji (b). Zadaća je regulatora, da taj porast na vrijeme prekine, ali se vidi, da viši "plafon" uzbuđnika omogućuje bržu regulaciju.

Brzina uzbuđe uzbuđnika definira se kao porast napona na otvorenim stezaljkama uzbuđnika izmjeren u 0,5 sek, i preračunat na 1 sek, ako kratko spojimo regulacioni organ. Prije kratkog spajanja mora biti

udešen nazivni napon uzbude, na stezaljkama uzбудnika. Snimljenu krivu-

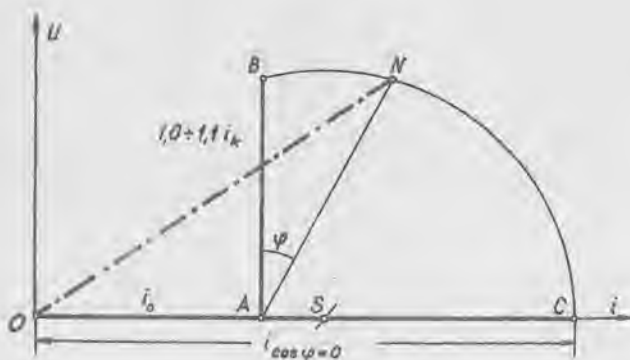


Sl.3-59

lju porasta napona u ovisnosti od vremena (sl.3-59) treba nadomjestiti pravcem, i očitati relativni iznos prirasta napona $\Delta u/u_n$ u 0,5 sekunti. Brzina uzbude je onda :

$$V_u = \frac{\Delta u/u_n}{0,5} \quad (1/\text{sek}) \quad (3)$$

3.5.2 Odredjivanje nazivne uzbudne struje. Pravu vrijednost nazivne struje moramo izmjeriti pri nazivnom naponu na stezaljkama generatora, nazivnoj struji i nazivnom faktoru snage. Sve ove uslove nije lako ostvariti, jer bi trebalo vršiti udešavanje na čitavoj mreži. Osim toga, nazivnu uzbudnu struju želimo odrediti i upisati na natpisnu pločicu još u ispitnoj stanici, prije postavljanja stroja na lice mjesta. Pri iole većoj snazi ne može se stroj u ispitnoj stanici opteretiti nazivnim radnim opterećenjem, jer nema pogonskog stroja tolike snage. Redovito se, međutim, mogu izmjeriti karakteristične vrijednosti uzbudne struje u praznom hodu, u kratkom spoju, i pri $\cos \varphi = 0$. Iz ovih podataka možemo prilično dobro ocijeniti nazivnu vrijednost uzbudne struje kojim od aproksimativnih postupaka, koji se oslanjaju s jedne strane na pojednostavljeni vektorski dijagram sinhronog stroja, a s druge strane na korekcije uzete iz praktičkog iskustva.



Sl.3-60

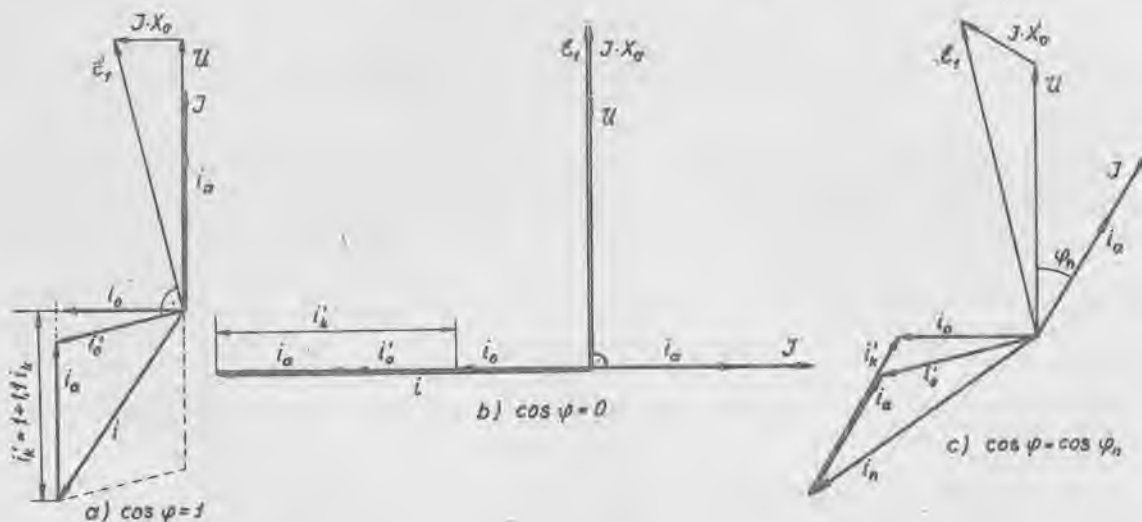
Najviše se upotrebljava metoda opisana u švedskim propisima, a nazvana u praksi "švedski dijagram". Postupak se vidi na sl.3-60. Horizontalno od ishodišta O nanesemo uzbudu praznog hoda i_0 . Iz točke A, koju smo time dobili, nanesemo okomito uzbudu kratkog spo-

ja i_k , povećanu za 10 % kod strojeva do 100 kVA, za 5% kod strojeva do nekoliko stotina kVA, a za 0-2 % kod velikih strojeva, te dobijemo tačku B. Horizontalno iz O nanesimo još uzbudu pri nominalnoj struji i faktoru snage nula $i_{\cos \varphi = 0}$, te dobijemo tačku C. Kroz tačke B i C povučemo kružnicu takovu, da joj je središte S na horizontali kroz D. Povučemo pravac pod kutom φ prema AB, i odredimo sjecište N s kružnicom. Dužina ON predstavlja uzbudu za nazivno pogonsko stanje. Naravno da možemo istim postupkom odrediti uzbudu za bilo koje drugo pogonsko stanje. Treba samo uzeti uzbudu praznog hoda za napon U' , koji promatramo, a isto tako snimiti karakteristiku $i_{\cos \varphi = 0}$ za taj napon U' . Uzbudu kratkog spoja treba uvrstiti za struju I' koju promatramo, a isto tako i uzbudu $i_{\cos \varphi = 0}$. Općenito vrijedi

$$i'_k = i_k \left(\frac{I'}{I_n} \right) \quad (1)$$

dok struju $i'_{\cos \varphi = 0}$ treba očitati s dijagrama prema sl.3-57 za odgovarajuću vrijednost I' na ordinatnoj osi. U ovako konstruiranom dijagramu ucrtamo kut φ koji nas zanima, i očitamo uzbudu i' .

Razmatranje na kojem se zasniva švedski dijagram je prikazano na sl.3-61a) do c). Ako sa i_0 označimo uzbudnu struju, koja odgovara naponu U u praznom hodu, onda će uzbuda i' , koja odgovara po krivulji praznog hoda induciranom naponu E_1 , ovisiti o razlici iznosa



Sl.3-61

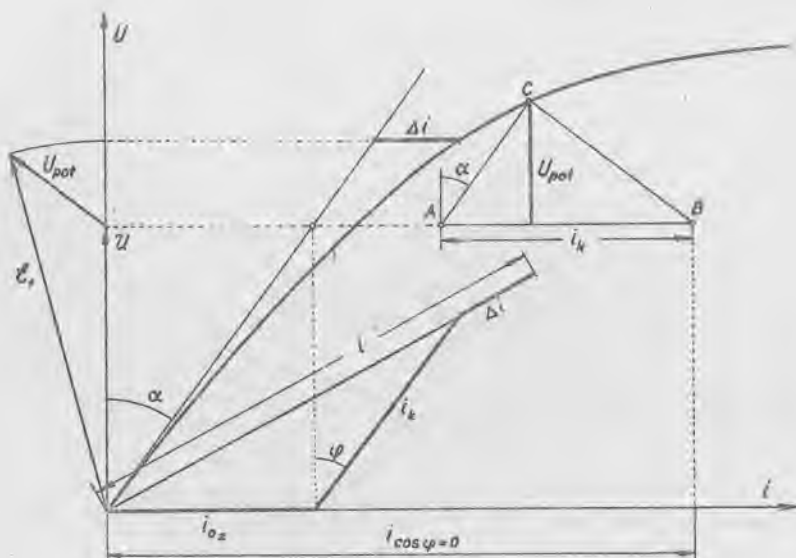
E_1 i U . Ako uzmemo da je $U = \text{konst}$, $I = \text{konst}$, onda će pri $\cos \varphi = 1$ (na sl.3-61a) biti $E_1 \approx U$, pa će i uzbuda i'_0 biti tek nešto malo veća od i_0 . No povećanje vektora E_1 prema U dovodi uslijed zasićenja do povećanja uzbudne struje i'_0 koje je veće no što bi proporcionalno odgovaralo povećanju E_1 . Zato se u švedskom dijagramu tačka B dobiva tako, da se i_k množi faktorom 1 do 1,1, prema podacima iz iskustva.

Drugi krajnji slučaj je $\cos \varphi = 0$, gdje je razlika između E_1 i U velika, a pogotovo je velika razlika između i'_0 i i zbog zasićenja (sl. 3-61b). Pošto je za ovaj slučaj moguće direktno mjeriti

uzbudu pokusom induktivnog opterećenja, to odredjujemo tačku C direktnim mjerenjem uzbuđene struje $i \cos \varphi = 0$.

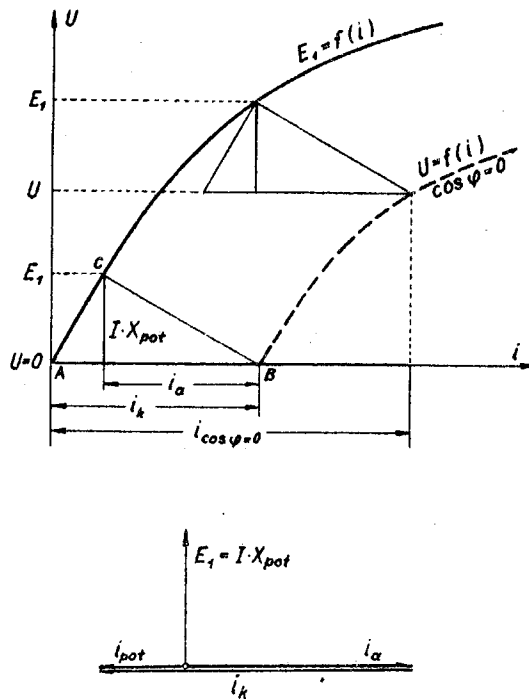
Pravi pogonski slučaj (sl.3-61c) leži negdje između prva dva slučaja. Vektorski dijagram sastavlja se iz vektora $\vec{i}'_0$ i $\vec{i}_s$ koji zatvara kut φ_s s okomicom na $\vec{i}_0$, i rezultante $\vec{i}_n$. U švedskom dijagramu uzima se umjesto toga $\vec{i}_0$ i korigirana vrijednost $\vec{i}'_k$, koja će dati istu rezultantu. Korekcija je tačna za $\cos \varphi = 1$ i $\cos \varphi = 0$, a između toga se kontinuirano mijenja, što je predloženo kružnicom kroz B i C, sa središtem S na sl.3-60.

Po američkim normama određuje se uzbuđna struja jednostavnim vektorskim sabiranjem uzbuđne praznog hoda nezasićenog stroja i_{0z} , i



Sl. 3-62

uzbuđe kratkog spoja i_k s time, da se rezultanta poveća za onaj iznos, koji je potreban da pokrije zasićenje u željezu pri induciranim naponu E_1 (sl.3-62). Da bi dobili inducirani napon E_1 , treba odrediti tzv. "Potierov napon", U_{pot} , koji u stvari predstavlja pad napona $I \cdot X_{pot}$ u rasipnoj reaktanciji pogonski zasićenog stroja X_{pot} . Prema sl.3-63, uzbuđ i_k pri kratkom spoju pokriva reakciju armature iznosom i_a , dok ostatak i_{pot} inducira napon E_1 , koji šalje struju I kroz rasipnu Potierovu reaktanciju X_{pot} . Na pcu na stezaljkama je pri tome $U = 0$. Ako stroj teretimo na mrežni napon U isto tolikom induktivnom strujom I , kretati će se vrh C Potierovog trokuta po karakteristici praznog hoda $E_1 = f(i)$, a tačka B po krivulji $U = f(i)$ za $\cos \varphi = 0$. Odatle možemo odrediti Potierov napon prema sl.3-62 tako, da smislimo $i \cos \varphi = 0$ za nominalni napon stezaljki U , unesemo tačku B, odbijemo iznos i_k da bi dobili tačku A, i povučemo kroz A paralelu s karakteristikom praznog hoda u ishodištu. Sjecište te paralele s karakteristikom praznog hoda daje nam tačku C. Potierov napon U_{pot} nanesimo na vektor napona U okomito na smjer struje opterećenja I , pa dobijemo inducirani napon E_1 . Za iznos tog napona E_1 karakteristika praznog hoda daje ukupnu uzbuđnu struju, a tangenta na tu karakteristiku



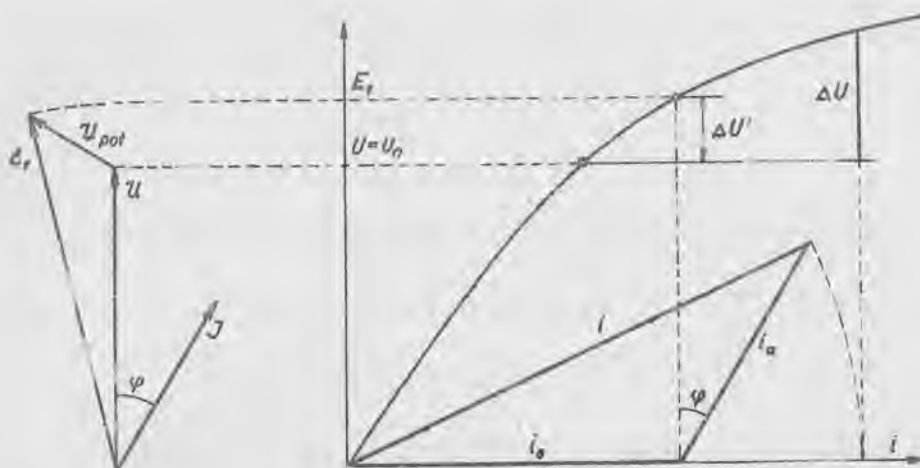
Sl.3-63

u ishodištu daje uzбудnu struju nezasićenog stroja. Razlika Δi otpada na zasićenje. Uzmemo li s karakteristike nezasićenog stroja uzбудu i_{0z} za napon U , podignemo okomicu, i pod kutom φ prema okomici nanesimo i_k , onda treba rezultantu još produžiti za Δi da bi dobili uzбудnu struju i .

3.5.3 Promjena napona. Prema sl.3-64 dijagram uzbudnih struja nacrtan za slučaj turborotora pokazuje, da od ukupne uzbuđe i uslijed reakcije armature i_a djeluje samo iznos i_0 , koji stvara tok dovoljan za induciranje napona E_1 . Uslijed rasipanja na stezaljkama se pojavljuje još manji napon U . Posve analogno razmatranje vrijedi i kod istaknutih polova. Ako dodje do naglog rasterećenja stroja odvajanjem od mreže, rasipni tok će vrlo brzo nestati, i na stezaljkama će se pojaviti napon E_1 . Ovaj porast napona $\Delta U'$ vrlo je brz, i ne može se predusresti nikakvom regulacijom. Istovremeno nestala je i reakcija armature i_a , pa djeluje na stvaranje magnetskog toka uzbuđi i umjesto i_0 . Magnetski tok ne može se momentano promijeniti, već raste vremenskom konstantom, koja ovisi uglavnom o induktivitetu i otporu rotorskog kruga. Uslijed toga uzbudna struja će tek postepeno porasti na vrijednost i , a napon na pripadnu vrijednost po karakteristici praznog hoda, koja je za ΔU veća od početne vrijednosti U_n . Ova promjena napona ΔU ne smije biti za $\cos \varphi = 0,8$ veća od 50 %, tj.

$$\frac{\Delta U}{U_n} \cdot 100 \leq 50 \%$$

(1)



Sl.3-64

U stvari napon ne će nikada porasti za punu vrijednost ΔU , jer će u međuvremenu stupiti u akciju automatski regulator napona, koji će smanjiti uzбудnu struju.

3.5.4 Obilatoost uzbude. Sinhroni generator mora biti sposoban da trajno radi pri nazivnoj struji i faktoru snage uz napon koji je za 5 % veći od nazivnoga. Osim toga on mora biti tako gradjen, da može u toplom stanju kratkotrajno dati nazivni napon uz 1,25-struku nazivnu struju i nazivni $\cos \varphi$. Ovaj potonji zahtjev ne odnosi se na zagrijavanje uzbudnog namota, već na njegov otpor, odnosno visinu napona uzbuđnika, dok prvi zahtjev treba zadovoljiti i u trajnom pogonu a da se uzbudni namot ne pregrije.

3.6. Mehaničke karakteristike

U mehaničkom pogledu važno je znati, da li stroj može odoliti preopterećenjima pri pobjegu, pri kratkom spoju i pri povećanom teretu. Osim toga treba poznavati zamašni moment M_D stroja, kao i karakteristične vrijednosti zakretnog momenta. Često je važno ustanoviti svojstva stroja u pogledu njihova pri paralelnom radu, osobito ako je tjeran pogonskim strojem čiji moment pulzira.

3.6.1 Čvrstoća sinhronog stroja. Čvrstoća prema mehaničkim naprezanjima kod pobjega turbine provjerena je pokusom vitlanja (3.1.10). Udarni kratki spoj predstavlja također znatno mehaničko naprezanje namota pri prvim visokim šiljcima struje. Nakon udarnog kratkog spoja ne smije biti nikakvih deformacija na stroju - osobito na glavama namota - a stroj mora izdržati naponske pokuse. Osim ovih pokusa zahtijevamo kod sinhronih generatora, da izdrže kroz 15 sekundi pogon sa strujom koja za 50 % premašuje nazivnu, uz napon što bliži nazivnome, a kod sin-

hronih motora zahtjevamo da kroz 15 sekundi izdrže moment 50 % veći od nazivnoga, uz uzbudu koja odgovara nazivnom opterećenju.

Kod generatora hladjenih vodikom ispituje se prije ugradnje statorskih limova rotora samo kućište pritiskom od 10 atp (tj. pretlakom od 10 kp/cm²). Kućište se u tu svrhu sastavi sa štitovima i potpuno zatvori. Pri ispitivanju ne smiju nastati nikakve deformacije kućišta.

3.6.2 Zamašni moment mD^2 . Odredjivanje zamašnog momenta mD^2 može se provesti računski na osnovu konstrukcionih nacрта rotora, tako da računamo za čitav rotor sumu umnoška mase i kvadrata promjera na kojemu se ta masa nalazi :

$$mD^2 = \sum \Delta m \cdot d^2 \quad (\text{kg} \times \text{m}^2) \quad (1)$$

To je u stvari veličina, koja je uobičajena u strojarstvu, kada treba izraziti moment tromosti :

$$I = \sum \Delta m r^2 = \sum \Delta m \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \frac{mD^2}{4} \quad (\text{kg} \times \text{m}^2) \quad (2)$$

Kod odredjivanja zamašnog momenta mjerenjem sjetimo se, da moment tromosti povezuje zakretni moment i kutno ubrzanje kod kružnog gibanja na isti način kao što masa povezuje silu i akceleraciju kod pravoortnog gibanja :

$$M = I \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (\text{N} \times \text{m})$$

Kod malih rotora - do nekoliko desetaka kVA, kao i kod malih asinhronih i istosmjernih strojeva - zavjesimo rotor na čeličnu žicu prema sl.3-65. Zakret rotora za kut α izazvat će moment u suprotnom smjeru veličine $K \cdot \alpha$, gdje je K konstanta upotrebljenog zavješnja, jednaka momentu po jedinici kuta otklona:

$$M = -K \cdot \alpha \quad (4)$$

Prema jednadžbi (3) imamo :

$$-K\alpha = I \frac{d\omega}{dt}$$

Deriviranje po t daje - uz $d\alpha/dt = \omega$:

$$-K\omega = I \cdot \frac{d^2\omega}{dt^2}$$

Rješenje ove diferencijalne jednadžbe uz početne uvjete $t = 0$, $\omega = 0$,

$\alpha = \alpha_m$, daje :

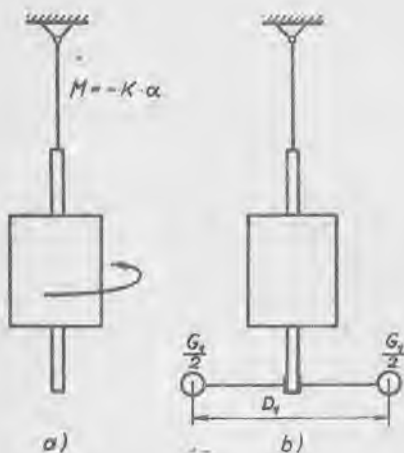
$$\sin \sqrt{\frac{K}{I}} \cdot t = \omega \cdot \frac{I}{K \cdot \alpha_m} \quad (5)$$

a odavle slijedi trajanje jednog punog titraja :

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{I}{K}} \quad (6)$$

odnosno frekvencija torzionog njihanja :

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{I}} \quad (7)$$



Sl.3-65

Frekvenciju njihanja lako je odrediti, ako izmjerimo vrijeme t za N punih njihaja

$$f = \frac{N}{t} \quad (8)$$

pa se može izračunati moment tromosti I , ako je poznata konstanta zavješanja K - npr. mjerenjem potrebnog momenta M_1 , da bi rotor zakrenuli za 1 puni okret:

$$K = \frac{M_1}{2\pi} \quad (9)$$

$$I = \frac{K}{4 \cdot \pi^2 \cdot f^2} = \frac{M_1}{8 \pi^2 \cdot f^2} \quad (\text{kg} \times \text{m}^2) \quad (10)$$

Iz jednadžbe (2) možemo sada odrediti i mD^2 . Odredjivanje konstante K možemo izbjeći, ako na osovinu pričvrstimo prema sl.3-65b) prečku sa 2 simetrična utega za koju možemo lako izračunati iznos $m_1 \cdot D_1^2$. Frekvencija njihanja odnosit će se prema frekvenciji bez dodatnih utega:

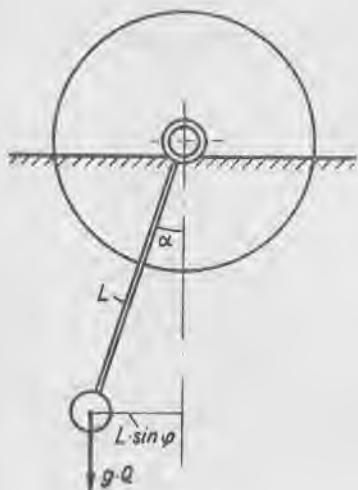
$$f_0 : f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K \cdot 4}{mD^2 + m_1 D_1^2}} : \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K \cdot 4}{mD^2}} \quad (11)$$

a odavle slijedi:

$$\frac{mD^2 + m_1 D_1^2}{mD^2} = \frac{f}{f_0}$$

$$mD^2 = m_1 D_1^2 \cdot \frac{f}{f - f_0} \quad (12)$$

Slično možemo sastaviti titrajni sistem, ako položimo oba kraja osovine na dvije vrlo glatke i tvrde horizontalne tračnice, a na kraj osovine pričvrstimo njihalo kraka L i mase Q (sl.3-66). Pri malom odklonu α njihalo djeluje na rotor momentom:



$$M = -gQL \cdot \sin \alpha \approx -gQL \cdot \alpha \quad (\text{N} \times \text{m}) \quad (13)$$

Vrijede dakle svi gore izvedeni izrazi, s time da je elastičnu konstantu

$$K = gQL \quad (\text{N} \times \text{m}) \quad (14)$$

sada lako izračunati.

Kod većih rotora teže je provesti ovakva mjerenja, pa se zamašni moment mD^2 odredjuje ili računski, ili iz pokusa zaustavljanja. Pri pokusu zaustavljanja potrebno je poznavati veličinu momenta koji koči rotor. Budući da i ovdje vrijedi:

$$M_k = -I \frac{d\omega}{dt} = -\frac{mD^2}{38,3} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (\text{N} \times \text{m}) \quad (15)$$

Sl.3-66

možemo mjerenjem krivulje brzine vrtnje u ovisnosti o vremenu $n = f(t)$ odrediti grafičkim deriviranjem dn/dt , i odavle uz poznatu veličinu kočnog momenta M_k izračunati mD^2 .

3.6.3 Pokus zaustavljanja. Pokus zaustavljanja započinjemo određivanjem gubitaka. Ako ispitujemo sinhroni stroj bez pogonskog stroja, npr. tako da ga pustimo da se zaleti priključen na mrežu, te podižemo napon i frekvenciju mreže dok ne uskoči u korak, onda mjerimo gubitke očitavanjem vatmetara između mreže i ispitivanog stroja. Gubitke mjerimo pri sinhronoj brzini i pri nekoliko vrijednosti brzine u blizini sinhrona. Različite brzine postižemo regulacijom frekvencije mreže. Uzbudu pri tome udesimo tako, da bude $\cos \varphi = 1$, tj. struja statora minimalna, a ne diramo je više, kako bi kasnije za vrijeme zaustavljanja imali nepromijenjene gubitke. Ako stroj tjeramo istosmjernim pogonskim motorom, onda očitamo napon i struju pogonskog motora kod svake brzine, pa računamo ukupne gubitke agregata:

$$P_g = \frac{(U-2) \cdot I}{1000} \quad (1)$$

Od napona smo pri tome odbili 2 V pada napona na četkicama, jer gubitaka zbog ovog pada napona pri zaustavljanju ne će biti. Gubici strujne topline u armaturi su redovito vrlo maleni, i možemo ih zanemariti. Uzbudu pogonskog stroja, i eventualno ispitivanog sinhronog stroja, jednom udesimo i ne diramo je više za vrijeme pokusa zaustavljanja, kako se ne bi promijenili gubici u željezu. Brzinu mijenjamo visinom narinutog napona. Kad smo odredili snagu P_g , koja u stvari zaustavlja stroj, jer bi se on bez ikakvih gubitaka isključen vrtio dalje nepromijenjenom brzinom, potjeramo stroj - ne dirajući uzbudu - oko 20 % iznad nazivne brzine, i isključimo ga s mreže. U toku zaustavljanja mjerimo u određenim vremenskim razmacima, npr. 3 - 5 sekundi, brzinu vrtnje. U tu svrhu možemo se poslužiti tahometrom, ili možemo npr. snimiti oscilografski napon uzбудnika na istoj osovinu, ili napon pogonskog stroja, koji je pri konstantnoj uzbudi proporcionalan brzini vrtnje. Na taj način dobivamo dijagram brzine vrtnje u ovisnosti o vremenu (sl.3-67), koji je određen izrazom (15) iz 3.6.2. Da bi odredili kolika snaga gubitaka odgovara kočnom momentu M_k , sjetimo se da je:

$$\frac{M_k \cdot \omega}{1000} = P_g \quad (kW) \quad (2)$$

gdje je M_k izražen u (N x m). Uvrštenjem svih veličina dobivamo napokon:

$$P_g = - \frac{mD^2}{365000} \cdot n \cdot \frac{dn}{dt} \quad (3)$$

Derivaciju dn/dt najzgodnije je odrediti tako, da povučemo u tački brzine n_1 tangentu, i očitamo vrijednost subtangente T_1 u sekunda, tzv. "fiktivno trajanje zaustavljanja". To je u stvari ono vrijeme, nakon kojega bi se stroj zaustavio, kad bi kočni moment M_k ostao nepromijenjen. Stvarno kočni moment pada s padajućom brzinom, dok kod male brzine ne zakaže podmazivanje, i stroj se naglo zaustavi. Derivacija se daje prikazati kao:

$$- \frac{dn}{dt} = \frac{n_1}{T_1} \quad (4)$$

što uvršteno u izraz (3) daje zamašni moment:

možemo mjerenjem krivulje brzine vrtnje u ovisnosti o vremenu $n = f(t)$ odrediti grafičkim deriviranjem dn/dt , i odavle uz poznatu veličinu kočnog momenta M_k izračunati mD^2 .

3.6.3 Pokus zaustavljanja. Pokus zaustavljanja započinjemo odredjivanjem gubitaka. Ako ispitujemo sinhroni stroj bez pogonskog stroja, npr. tako da ga pustimo da se zaleti priključen na mrežu, te podižemo napon i frekvenciju mreže dok ne uskoči u korak, onda mjerimo gubitke očitavanjem vatmetara između mreže i ispitivanog stroja. Gubitke mjerimo pri sinhronoj brzini i pri nekoliko vrijednosti brzine u blizini sinhrona. Različite brzine postižemo regulacijom frekvencije mreže. Uzbudu pri tome udesimo tako, da bude $\cos \varphi = 1$, tj. struja statora minimalna, a ne diramo je više, kako bi kasnije za vrijeme zaustavljanja imali nepromijenjene gubitke. Ako stroj tjeramo istosmjernim pogonskim motorom, onda očitamo napon i struju pogonskog motora kod svake brzine, pa računamo ukupne gubitke agregata:

$$P_g = \frac{(U-2) \cdot I}{1000} \quad (1)$$

Od napona smo pri tome odbili 2 V pada napona na četkicama, jer gubitaka zbog ovog pada napona pri zaustavljanju ne će biti. Gubici strujne topline u armaturi su redovito vrlo maleni, i možemo ih zanemariti. Uzbudu pogonskog stroja, i eventualno ispitivanog sinhronog stroja, jednom udesimo i ne diramo je više za vrijeme pokusa zaustavljanja, kako se ne bi promijenili gubici u željezu. Brzinu mijenjamo visinom narinutog napona. Kad smo odredili snagu P_g , koja u stvari zaustavlja stroj, jer bi se on bez ikakvih gubitaka isključen vrtio dalje nepromijenjenom brzinom, potjeramo stroj - ne dirajući uzbudu - oko 20 % iznad nazivne brzine, i isključimo ga s mreže. U toku zaustavljanja mjerimo u određenim vremenskim razmacima, npr. 3 - 5 sekundi, brzinu vrtnje. U tu svrhu možemo se poslužiti tahometrom, ili možemo npr. snimiti oscilografski napon uzбудnika na istoj osovinu, ili napon pogonskog stroja, koji je pri konstantnoj uzbudi proporcionalan brzini vrtnje. Na taj način dobivamo dijagram brzine vrtnje u ovisnosti o vremenu (sl.3-67), koji je određen izrazom (15) iz 3.6.2. Da bi odredili kolika snaga gubitaka odgovara kočnom momentu M_k , sjetimo se da je:

$$\frac{M_k \cdot \omega}{1000} = P_g \quad (kW) \quad (2)$$

gdje je M_k izražen u (N x m). Uvrštenjem svih veličina dobivamo napokon:

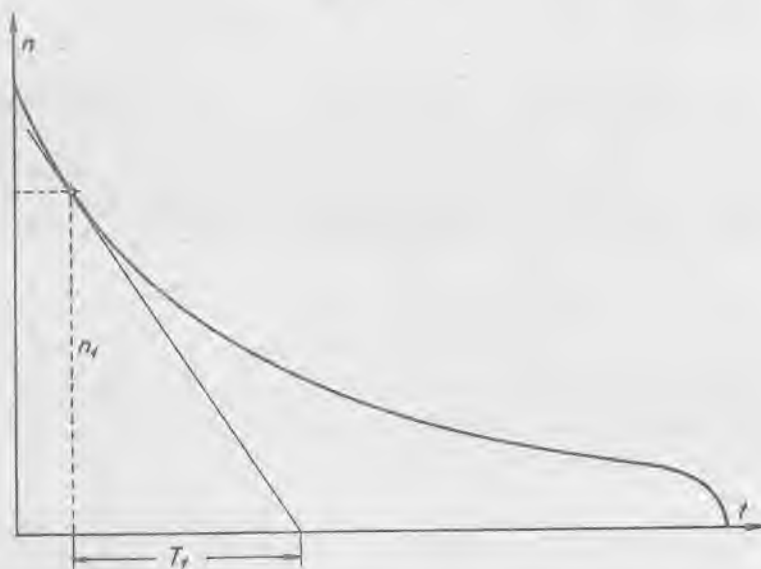
$$P_g = - \frac{mD^2}{365000} \cdot n \cdot \frac{dn}{dt} \quad (3)$$

Derivaciju dn/dt najzgodnije je odrediti tako, da povučemo u tački brzine n_1 tangentu, i očitamo vrijednost subtangente T_1 u sekundama, tzv. "fiktivno trajanje zaustavljanja". To je u stvari ono vrijeme, nakon kojega bi se stroj zaustavio, kad bi kočni moment M_k ostao nepromijenjen. Stvarno kočni moment pada s padajućom brzinom, dok kod male brzine ne zakaže podmazivanje, i stroj se naglo zaustavi. Derivacija se daje prikazati kao:

$$- \frac{dn}{dt} = \frac{n_1}{T_1} \quad (4)$$

Što uvršteno u izraz (3) daje zamašni moment:

$$mD^2 = \frac{365000 \cdot P_g \cdot T_g}{n_g^2} \quad (\text{kg} \times \text{m}^2) \quad (5)$$



Sl.3-67

Zbog veće tačnosti rezultata provedemo ovaj račun za nekoliko tačaka u blizini nazivne brzine vrtnje, pa dobivamo nekoliko vrijednosti mD^2 , koje se razlikuju od srednje vrijednosti za manje od $\pm 5\%$. Srednju vrijednost uzimamo kao rezultat mjerenja. Ako je pokus zaustavljanja izvršen zajedno s pogonskim motorom, onda je izmjereni zamašni moment zbroj zamašnih momenata obaju strojeva u agregatu:

$$(mD^2)_{mj} = mD^2 + (mD^2)_{pog} \quad (6)$$

pa moramo od rezultata odbiti zamašni moment pogonskog stroja, koji se može, ukoliko nije poznat, odrediti zasebnim pokusom.

Ako je poznata veličina mD^2 , možemo iz pokusa zaustavljanja odrediti gubitke

$$P_g = \frac{mD^2}{365000} \cdot \frac{n_g^2}{T_g} \quad (7)$$

Krivulja zaustavljanja može se registrirati i na taj način, da svaki okret osovine registriramo znakom na papirnatoj traci, koja se jednolično odvija. Razmak između dva znaka predstavlja onda vrijeme

$\Delta t_1, \Delta t_2, \dots$ potrebno za 1 okret. Ako uzmemo dva intervala $\Delta t'$ i $\Delta t''$, jedan neposredno prije, a drugi neposredno poslije prolaza kroz brzinu n_1 , biti će prosječne brzine u tim intervalima:

$$n' = \frac{1}{\Delta t'} \cdot 60, \quad n'' = \frac{1}{\Delta t''} \cdot 60 \quad (8)$$

Te brzine odgovaraju sredini intervala $\Delta t'$ odnosno $\Delta t''$, između kojih je vremenski razmak

$$\Delta t = \frac{1}{2} \cdot \Delta t' + \frac{1}{2} \cdot \Delta t'' \quad (9)$$

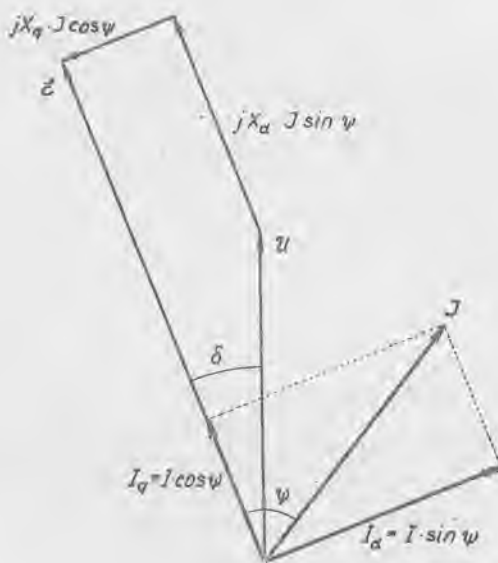
Umjesto n i dn/dt u izrazu (3) možemo dakle pisati :

$$n \cdot \frac{dn}{dt} \approx \frac{n' + n''}{2} \cdot \frac{n' - n''}{\Delta t} = 3600 \frac{\left(\frac{1}{\Delta t'}\right)^2 - \left(\frac{1}{\Delta t''}\right)^2}{\Delta t' + \Delta t''} \quad (10)$$

3.6.4 Momenti sinhronog stroja. U motornom i generatorskom pogonu sinhronog stroja zanima nas kako stroj reagira na promjene opterećenja. Moment kojim stator djeluje na rotor, i obrnuto, rotor na stator, pri pogonu sinhronom brzinom, zovemo sinhronim momentom. Pošto je kod sinhronog pogona brzina konstantna, to je snaga proporcionalna momentu :

$$P = M \omega \quad (1)$$

tako da se često mjesto momenta navodi snaga. Na vektorskom dijagramu stroja s istaknutim polovima (sl.3-68) označen je sa σ kut zakreta ro-



Sl.3-68

tora prema položaju praznog hoda, a sa ψ fazni kut zaostajanja struje I prema vektoru uzbude E tj. vektoru onog napona, koji bi se pojavio na stezaljkama stroja, kad bi ga odvojili od mreže i pustili da s nepromijenjenom uzбудnom strujom rotira istom brzinom dalje. Snaga u rasporu - ako izostavimo iz razmatranja gubitke - može se prikazati iz faznih vrijednosti U i I kao :

$$P = 3 UI \cos(\psi - \sigma) = 3 UI (\cos \psi \cdot \cos \sigma + \sin \psi \cdot \sin \sigma) \quad (2)$$

Dalje slijedi iz vektorskog dijagrama :

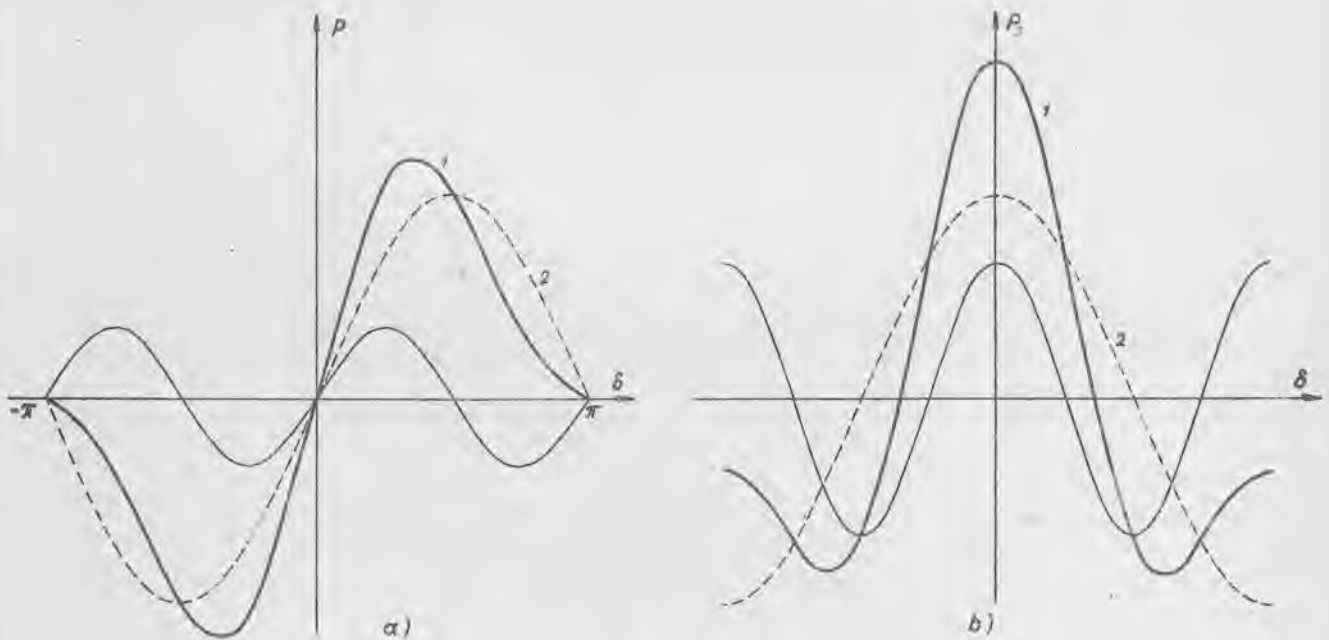
$$X_q \cdot I \cdot \cos \psi = U \cdot \sin \sigma \quad (3)$$

$$X_d \cdot I \cdot \sin \psi = E - U \cdot \cos \sigma \quad (4)$$

Relacije (3) i (4) uvrštene u izraz za snagu (2) omogućuju eliminiranje faznog kuta opterećenja ψ , pa dobivamo nakon sredjivanja :

$$P = \frac{3UE}{X_d} \cdot \sin \sigma + 3U^2 \cdot \frac{X_d - X_q}{2 X_d X_q} \cdot \sin 2\sigma = M \cdot \omega \quad (5)$$

Vidimo, da sinhrona snaga, a time i sinhroni moment, ovise o naponu mreže U_1 , o naponu E , koji je određen uzbudom, o sinhronim reaktancijama X_d i X_q , te o $\sin \sigma$ i $\sin 2\sigma$. Ovisnost sinhronne snage odnosno momenta o kutu zakreta rotora σ vidi se na sl.3-69a), krivulja 1. Utjecaj nejednakih reaktancija u uzdužnom i u poprečnom



Sl.3.69

smjeru prikazuje drugi član u izrazu (5), uz $\sin 2\sigma$, koji će biti to veći, što je manja vrijednost X_q . To je "reaktivni moment", koji i bez uzbude, tj. i pri $E = 0$, djeluje na rotor i nastoji ga zadržati u sinhronizmu. U slučaju cilindričkog rotora, tj. $X_q = X_d$, taj član nestaje, pa krivulja sinhronne snage prelazi u sinusoidu prema sl.3-69a), krivulja 2.

Ovaj sinhroni moment bit će uvijek jednak momentu opterećenja, jer će se kut σ sam postaviti na potrebnu vrijednost. No ako rotor izbacimo iz pravog položaja pod kutom σ , koji odgovara opterećenju, u neki novi položaj σ_1 , nastati će ili pretičak momenta, ili manjak momenta, uvijek takovog djelovanja, da se rotor vraća u svoj pravi položaj σ . Prirast momenta podijeljen s prirastom kuta $d\sigma$ nazivamo "sinhronizacionim koeficijentom" momenta, a isto tako prirast snage, koji tome odgovara, podijeljen s prirastom kuta $d\sigma$ "sinhronizacionim koeficijentom" snage :

$$M_s = \frac{dM}{d\sigma} \quad (6)$$

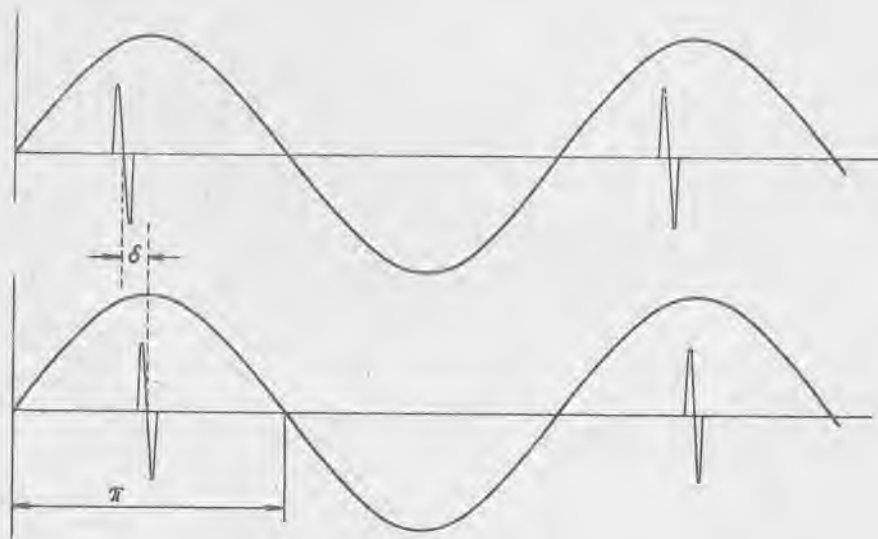
$$P_s = \frac{dP}{d\sigma} = \omega \cdot M_s \quad (7)$$

Pošto kut mjerimo u radijanima, to je dimenzija sinhronizacionih koeficijenata ($N \times m$) odnosno (W), pa se često govori i o "sinhronizacionom momentu" i "sinhronizacionoj snazi". Ne treba zaboraviti, da moment odnosno snagu u stvari dobivamo tek množenjem s prirastom kuta $d\delta$.

Deriviranjem izraza (5) dobivamo za sinhronizacioni koeficijent:

$$P_s = \omega M_s = \frac{dP}{d\delta} = \frac{3UE}{X_d} \cos \delta + 3 U^2 \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \cos 2\delta \quad (8)$$

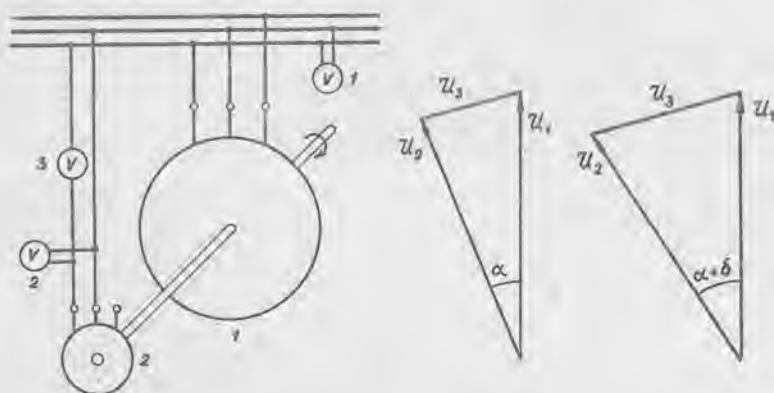
U slučaju cilindričkog rotora vrijednost P_s za $\delta = 0$ numerički je jednaka vrijednosti sinhrone snage P za $\delta = \pi/2$ (krivulja 2 na sl.3-69b). Kod istaknutih polova drugi član izraza za P_s pri $\delta = 0$ dva puta je veći od amplitude toga člana u izrazu (5) za P . Osim toga, amplitude se u izrazu za P_s pri $\delta = 0$ direktno zbrajaju. Vidi se, da je utjecaj istaknutih polova na sinhronizacioni koeficijent još znatno veći, nego na sinhroni moment pri određenom kutu δ . Sinhronu snagu mjerimo vatmetrima, a vrijednost kuta otklona rotora δ treba odrediti npr. stroboskopskim promatranjem, tj. rasvjetom rotora stroboskopskom bljeskalicom priključenom na napon mreže, koja kratko, ali snažno bljesne u svakoj poluperiodi, tako da vidimo rotor kao da miruje, i možemo promatrati i mjeriti njegov kut zakreta prema početnom položaju u praznom hodu. Drugi je način, da s pomoću magneta pričvršćenog na osovinu induciramo naponski impuls pri svakom okretu, i superponiramo te impulse na oscilogramu naponu stezaljki (sl.3-70).



Sl.3.70

Usporedbom slike u praznom hodu i pod opterećenjem dobivamo kut zakreta δ , pri čemu je mjerilo određeno poluperiodom napona, kojoj odgovara vrtnja rotora za kut π . Slično se može impulse davati i električnim kontaktom na osovinu. Ako raspoložemo još jednim pomoćnim generatorom, koji se može spojiti na istu osovinu, mjerenje kuta se može svesti na mjerenje napona jednog i drugog generatora, koji treba da budu slič-

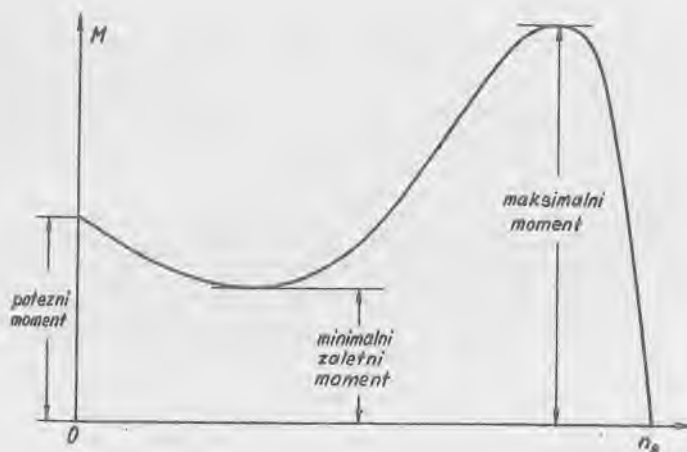
ni i mjerenje vektorske razlike obaju napona. U tu svrhu se dvije korrespondentne stezaljke obaju strojeva međusobno spoje, a između druge dvije se mjeri napon. Napone U_1 i U_2 najbolje je odabrati tako, da bude u praznom hodu kut α između njih što manji. Kod opterećenja je onda lako snimiti novi kut $\alpha + \delta$, i odrediti otklon rotora δ (sl.3-71). Mjerenjem snage i kuta δ dobivamo krivulju sinhrona



Sl.3-71

snage ili momenta u ovisnosti o kutu δ . Grafičkom derivacijom ove krivulje ili direktnim mjerenjem prirasta kuta $d\delta$ pri određenom prirastu opterećenja, dobivamo i krivulje sinhronizacionih koeficijenata.

Osim ovih momenata kod svih sinhronih motora sa samozaletom važno je poznavati nekoliko drugih vrijednosti momenta. Priključen na napon motor kreće u asinhronom radu. Pri tome uzimamo kao potezni moment najmanji moment - obzirom na položaj rotora i statora međusobno - koji možemo izmjeriti na mirnom rotoru pri nazivnom naponu i frekvenciji. Minimalni zaletni moment je najmanja vrijednost momenta od mirovanja do maksimalnog momenta u asinhronom pogonu (sl.3-72).



Sl.3-72

Sve ove vrijednosti mogu se snimiti na isti način kao kod asinhronog motora. Osobito je ovdje prikladna metoda snimanja momentne karakteristike u pokusu zaleta.

Uskočni moment definiran je kao onaj najveći moment tereta, s kojim motor može nakon asinhronog zaleta i priključene uzbude uskočiti u korak. O momentu tereta ovisi, koliko će biti klizanje prije uključivanja uzbude. Kad uključimo uzbudu, stroj prelazi iz asinhronog u sinhroni pogon. Da li će pri tome svladati moment tereta i ubrzati vlastite mase i mase tereta tako da bude klizanje nula, to ovisi također i o ukupnom zamašnom momentu mD^2 stroja i tereta zajedno. Zato se uz podatak o uskočnom momentu mora navesti i karakteristika tereta, i ukupni mD^2 . Mjeri se s nekoliko uzastopnih pokusa sinhronizacije uz postepeno povećanje momenta opterećenja.

Zbog bolje usporedbe različitih strojeva definiran je nazivni uskočni moment kao onaj moment, koji stroj razvija pri nazivnom naponu i frekvenciji u asinhronom pogonu pri 95 % sinhronne brzine.

Moment ispadanja iz koraka je u stvari maksimalni sinhroni moment. Mjerenjem se određuje kao onaj moment, koji će stroj još izdržati kroz 1 min pri nazivnom naponu i frekvenciji, a da ne ispadne iz koraka.

3.6.5 Pokus zaleta. Kao što je pri pokusu zaustavljanja promjenljivi kočni moment pri različitim brzinama uzrokovao različite retardacije, tako kod zaleta promjenljivi zakretni moment uzrokuje pri različitim brzinama različite akceleracije. Razlika je samo u tome, da je kod zaleta smjer momenta i kutne brzine isti, dok je kod zaustavljanja bio suprotan. Umjesto relacije (15) iz 3.6.2 vrijedi dakle ovdje :

$$M = I \cdot \frac{d\omega}{dt} = \frac{mD^2}{38,3} \cdot \frac{dn}{dt} \quad (N \times m) \quad (1)$$

Ako je poznat zamašni moment mD^2 , i ako snimimo krivulju $n = f(t)$, možemo za svaku brzinu n grafičkim deriviranjem odrediti zakretni moment M . U tu svrhu nanese se prema sl.3-73a na lijevo od ishodišta koordinatnog sistema dužinu k , i vučemo iz tako dobivene tačke K paralele s tangentom na krivulju $n = f(t)$ u pojedinim tačkama $a, b, c, \dots$. U tom je slučaju :

$$m_n \cdot \overline{OA} = \Delta n_a \quad (2)$$

$$m_t \cdot k = \Delta t \quad (3)$$

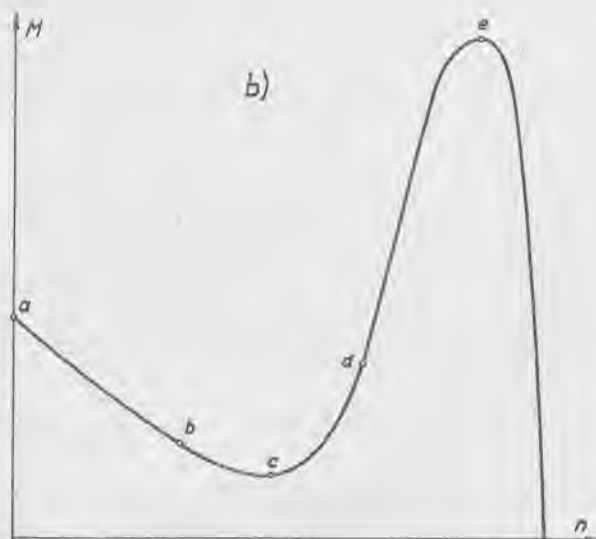
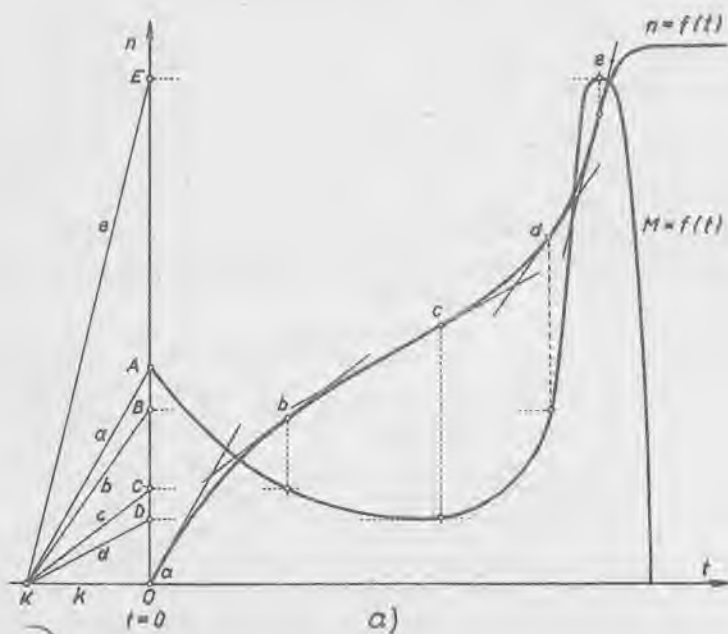
tako da konačno dobivamo :

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\Delta n}{\Delta t} = \frac{m_n}{m_t \cdot k} \cdot \overline{OA} \quad \left(\frac{1/\text{min}}{s} \right) \quad (4)$$

gdje znači : m_n = mjerilo za brzinu vrtnje $\left(\frac{1/\text{min}}{\text{mm}} \right)$
 m_t = mjerilo za vrijeme (sek/mm)
 k = nanesena dužina u (mm)

$\overline{OA}, \overline{OB}, \overline{OC}, \dots$ = očitani odsječak na ordinatnoj osi u (mm) za promatranu tangentu u tački $a, b, c, \dots$

Zakretni moment npr. u tački a bit će sada :



Sl.3-73

$$M = \frac{mD^2}{38,3} \cdot \frac{m_n}{m_t \cdot k} \cdot \overline{OA} = m_H \cdot \overline{OA} \quad (5)$$

gdje je m_M = mjerilo za zakretni moment $\left(\frac{N \times m}{mm} \right)$.

Ako želimo postići određeno mjerilo m_M pri crtanju krivulje momenta, onda treba dužinu k odabrati tako, da bude :

$$k = \frac{mD^2}{38,3} \cdot \frac{m_n}{m_t \cdot m_H} \quad (6)$$

Nanošenjem odsječaka $\overline{OA}$, $\overline{OB}$, $\overline{OC}$... iznad tačaka a, b, c, ... prema

dijagramu na sl.3-73a dobivamo krivulju $M = f(t)$. Na oscilogramu zaleta imamo istovremeno krivulju $n = f(t)$. Ako za svako vrijeme t očitamo pripadne vrijednosti M i n , dobivamo parove vrijednosti, iz kojih možemo nacrtati dijagram $M = f(n)$ prema sl. 3-73b.

Ako se dogodi, da je vrijeme zaleta odviše kratko, tako da krivulju zaleta ne možemo snimiti kako treba, možemo si pomoći na dva načina. Jedan način je dodavanje zamašnih masa, npr. još jednog velikog stroja na istoj osovinu, što usporava zalet u omjeru povećanja mD^2 . Drugi je način da snizimo priključni napon U ispod nazivne vrijednosti. Pri tome treba voditi računa o tome, da se razvijeni moment mijenja kod asinhronog pogona u omjeru kvadrata napona, ali da moment uslijed trenja i ventilacije ostaje isti. Ako vrijednosti pri mjerenju označimo indeksom "mj", a pri nazivnom naponu pišemo bez indeksa, vrijedit će :

$$M_{mj} = M_{razv\ mj} - M_{tr,v} \quad (7)$$

$$M = M_{razv} - M_{tr,v} \quad (8)$$

Pošto je :

$$M_{razv} = \left(\frac{U}{U_{mj}} \right)^2 \cdot M_{razv\ mj} \quad (9)$$

dok je $M_{tr,v}$ uvijek isti kod iste brzine, slijedi konačno :

$$M = M_{mj} \left(\frac{U}{U_{mj}} \right)^2 + \frac{U^2 - U_{mj}^2}{U_{mj}^2} \cdot M_{tr,v} \quad (10)$$

Potrebno je dakle odvojiti gubitke trenja i ventilacije, i snimiti paralelno s oscilogramom $n = f(t)$ još i oscilogram $U = f(t)$. Sa snimljene krivulje zaleta može se rekonstruirati čitava momentna karakteristika, no može se isto tako očitati direktno samo one vrijednosti momenta, koje nas osobito zanimaju, kao potezni moment u času $t = 0$, minimalni zaletni moment, koji odgovara najpoložitijoj tangenti, i maksimalni asinhroni moment, koji odgovara najstrmijoj tangenti.

3.6.6 Vlastita frekvencija titranja. Sinhroni stroj sa svojim zamašnim momentom mD^2 i sinhronizacionim koeficijentom M_s predstavlja isto takav elastični sistem, kakav je opisan u 3.6.2 i prikazan na sl.3-65. Kao što je tamo konstanta zavješanja K pomnožena kutom α davala moment, koji je rotor vraćao u ishodni položaj, tako ovdje sinhronizaciona konstanta M_s predstavlja faktor elastičnosti, koji pomnožen kutom δ daje moment :

$$M = -\delta \cdot M_s \quad (1)$$

Pošto je otklon δ obično dovoljno malen, možemo uzeti da je $M_s = \text{konst.}$ Električkom kutu δ odgovara prostorni kut zakreta :

$$\alpha = \delta / p \quad (2)$$

gdje je p = broj pari polova stroja.

U izvodu frekvencije titranja u 3.6.2 uvedena je konstanta K kao derivacija momenta po prostornom kutu zakreta. U slučaju gdje moment nastaje zbog sinhronizacione konstante M_s odgovarala bi derivaciji po prostornom kutu zakreta vrijednost :

$$\frac{dM}{d\alpha} = \frac{dM}{d(\frac{\sigma}{p})} = p \cdot \frac{dM}{d\sigma} = p \cdot M_s \quad (3)$$

Uvrštavanjem ove vrijednosti umjesto K u izraz (7) iz 3.6.2 dobivamo vlastitu frekvenciju titranja :

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{pM_s}{I}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{4pM_s}{mD^2}} \quad \left(\frac{1}{s}\right) \quad (4)$$

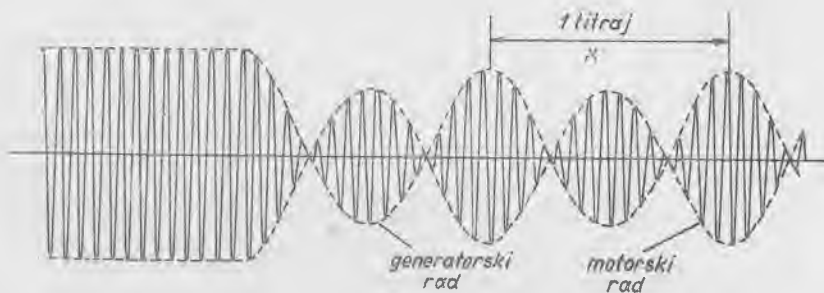
Uvedimo sinhronizacioni koeficijent snage $P_s = \frac{\omega M_s}{1000} \quad (\text{kW/rad})$,

uvrstimo $p = \frac{60f}{n_1}$ i $\omega = \frac{2\pi n_s}{60}$, te preračunajmo vlastitu

frekvenciju njihanja u $(1/\text{min})$, kao što je uobičajeno :

$$f = \frac{60}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 60 \cdot f \cdot P_s \cdot 1000 \cdot 60}{n_s \cdot 2\pi \cdot n_s \cdot mD^2}} = \frac{14460}{n_s} \cdot \sqrt{\frac{P_s \cdot f}{mD^2}} \quad \left(\frac{1}{\text{min}}\right) \quad (5)$$

Ova frekvencija mijenja se s veličinom uzbude, jer se mijenja P_s . Mjerenjem možemo odrediti vlastitu frekvenciju titranja na taj način, da stroj na mreži naglo rasteretimo pri određenom malom opterećenju, i oscilografski snimimo struju statora (sl.3-74). Kako rotor njiše



Sl.3-74

između položaja gdje prethodi i položaja gdje zaostaje za okretnim poljem statora, tako amplituda struje pulzira između maksimalne vrijednosti u generatorskom radu i maksimalne vrijednosti u motorskom radu. Ova posljednja je uvijek nešto **veća**, jer struja u motorskom radu pokriva i gubitke. Razmak između dva istovrsna maksimuma predstavlja trajanje jednog punog titraja, u mjerilu vremena snimljenog oscilograma m_t (sek/mm) :

$$T = x \cdot m_t \quad (6)$$

a vlastita frekvencija titranja iznosi :

$$f_t = \frac{60}{T} \quad \left(\frac{1}{\text{min}}\right) \quad (7)$$

3.7. Rad na mrežu

Sinhroni stroj, kao generator ili kao motor, normalno radi na mrežu konstantnog napona i konstantne frekvencije. Zbog toga promatramo karakteristike rada na mrežu redovito uz $U = \text{konst}$, i $n = \text{konst}$. Parametri koji se mijenjaju jesu radna snaga P_r , koja ovisi o privodu snage na osovini generatora, odnosno o mehaničkom opterećenju na osovini motora, i uzbuđna struja i , koju možemo po volji udesiti regulatorom u uzbuđnom krugu. S ove dvije veličine, uz $U = \text{konst}$, i $n = \text{konst}$, potpuno je određeno pogonsko stanje stroja, i sve veličine koje to stanje karakteriziraju, kao struja I , jalova snaga P_j , faktor snage $\cos \varphi$ i druge.

3.7.1 Područja rada i geometrijska mjesta karakterističnih veličina.

Ako nacrtamo vertikalno vektor konstantnog faznog napona mreže U , i pod kutom φ vektor fazne struje I (sl.3-75a), pa ako zamislimo mjerilo vektora struje pomnoženo s $3 \cdot U$, onda će vektor struje predstavljati ujedno prividnu snagu stroja:

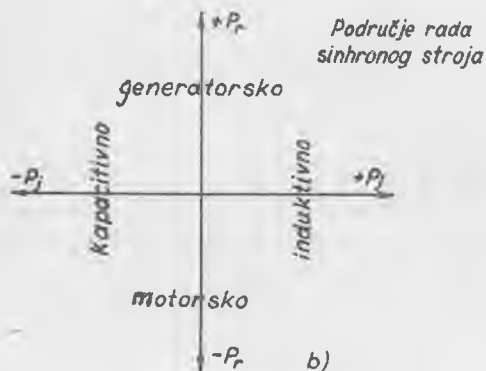
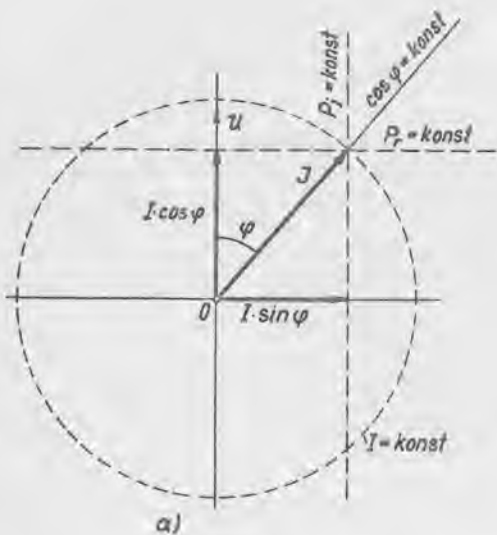
$$P = 3 \cdot U \cdot I \quad (1)$$

Projekcija tog vektora u smjer napona U predstavljati će radnu snagu:

$$P_r = 3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2)$$

a projekcija u smjer okomit na U jalovu snagu:

$$P_j = 3 \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (3)$$

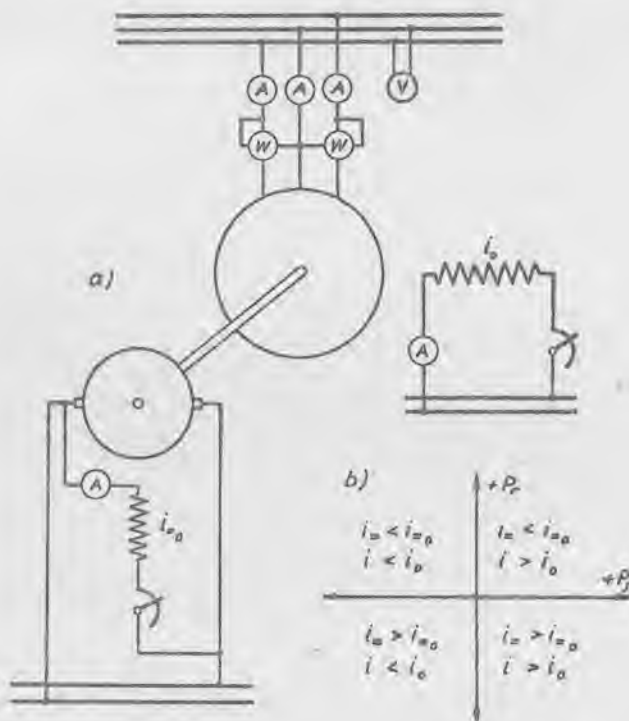


Iz toga odmah slijedi, da je za svaki horizontalni pravac u ovakvom dijagramu radna snaga konstantna, tj. da su geometrijska mjesta konstantne radne snage horizontalni pravci. Isto tako geometrijska mjesta konstantne jalove snage su vertikalni pravci. Kružnice iz ishodišta O predstavljaju geometrijska mjesta konstantne prividne snage, a ujedno i konstantne struje statora I . Pravci iz ishodišta O predstavljaju geometrijska mjesta konstantnog faktora snage $\cos \varphi$.

Sl.3-75

Uz odabrani način promatranja tzv. "generatorskog sistema" možemo čitavo područje rada podijeliti na 4 kvadranta prema sl.3-75b). Dva gornja predstavljaju generatorsko

područje, dva donja motorsko područje. Dva desna kvadranta predstavljaju područje induktivnog, a dva lijeva područje kapacitivnog opterećenja. U ispitnoj stanici obično tjeramo sinhroni stroj istosmjernim strojem. Ako su oba stroja napajana iz mreže čvrstog napona (sl.3-76a), onda može i jedan i drugi raditi bilo kao motor, bilo kao generator. Neka je potrebna uzbudna struja za prazni hod jednaka i_0 kod sinhro-

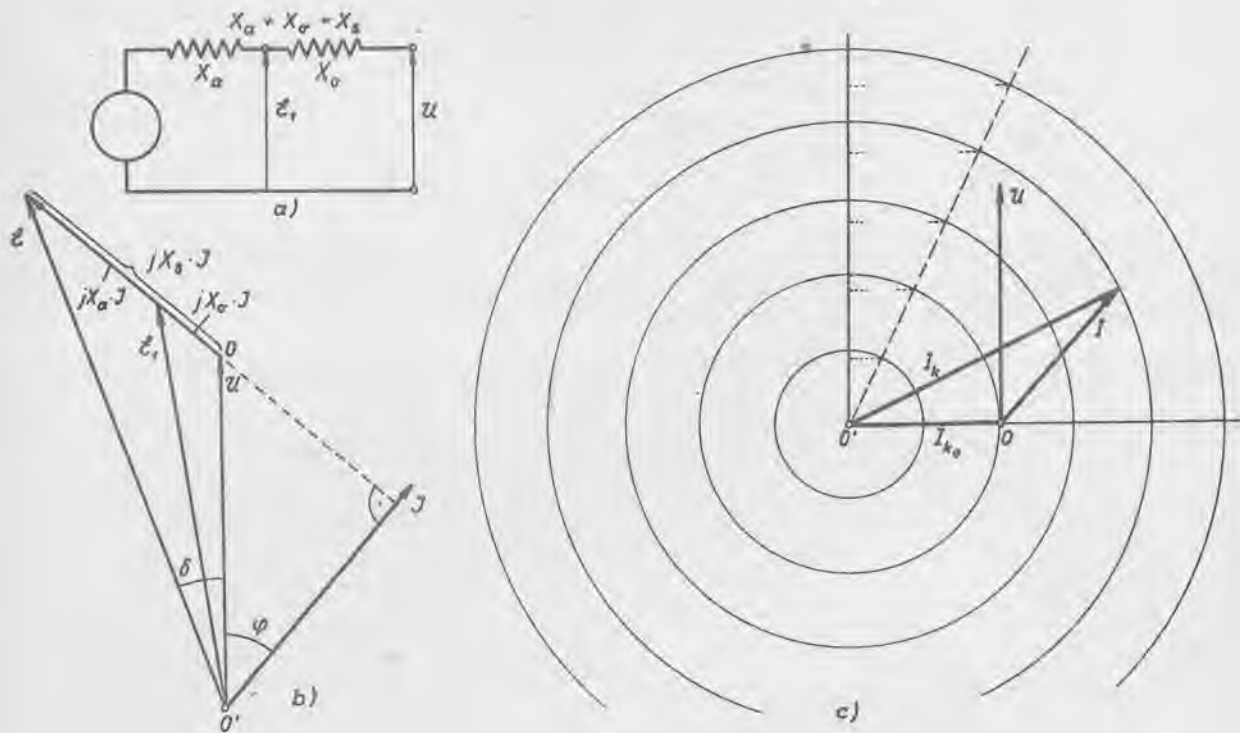


Sl.3-76

nog stroja, a i_{f0} kod istosmjernog stroja. Smanjivanje uzbude i_f ispod i_{f0} povećalo bi brzinu vrtnje, što ne dozvoljava sinhroni stroj. Nastali zakret rotora za kut δ naprijed uzrokovati će predavanje radne snage u izmjeničnu mrežu, tj. generatorski rad. Isto tako, povećanje uzbude i_f iznad i_{f0} uzrokovati će motorski rad. Povećanje uzbude sinhronog stroja i_f iznad i_{f0} , dakle preuzbuda, uzrokovati će predavanje induktivne snage u mrežu, a poduzbuda, tj. $i_f < i_{f0}$, uzrokovati će oduzimanje induktivne, ili što je isto, predavanje kapacitivne snage mreži. Na taj način može se vrlo jednostavno ostvariti svako pogonsko stanje u bilo kojem kvadrantu prema sl.3-76b) .

3.7.2 Uzbudna struja u dijagramu. Sinhroni stroj s cilindričkim rotorom možemo, uz zanemarenje radnog otpora i gubitaka, prikazati namjenskom shemom prema sl.3-77a), gdje reaktancija reakcije armature X_a i rasipna reaktancija X_e zajedno daju sinhronu reaktanciju X_s .

Vektorski dijagram prikazan je na sl.3-77b). Vektor uzbude E jednak je vektorskom zbroju konstantnog napona na stezaljkama U , i pada



Sl.3-77

napona na sinhronoj reaktanciji $j X_s \cdot I$. Ako naponu U odgovara uzbuđno protjecanje Θ_0 (ili uzbuđna struja i_0), a naponu $\mathcal{E}$ protjecanje Θ odnosno uzbuđna struja i , onda se i djelovanje struje I može prikazati uzbuđnim protjecanjem Θ , ili uzbuđnom strujom i . Mjerilo dobivamo iz mjerenja u kratkom spoju, gdje je nominalnoj struji I_n odgovarala uzbuđna struja i_k . Moramo dakle za bilo koju struju I uzeti uzbuđnu struju

$$i_I = \frac{I}{I_n} \cdot i_k \quad (1)$$

No možemo isto tako zadržati statorsche struje kao mjerilo za uzbuđne amperzavoje. U tom slučaju odgovara uzbuđnoj struji i_0 statorsche struja kratkog spoja uz tu istu uzbuđu :

$$\frac{U}{X_s} = I_{k0} \quad (2)$$

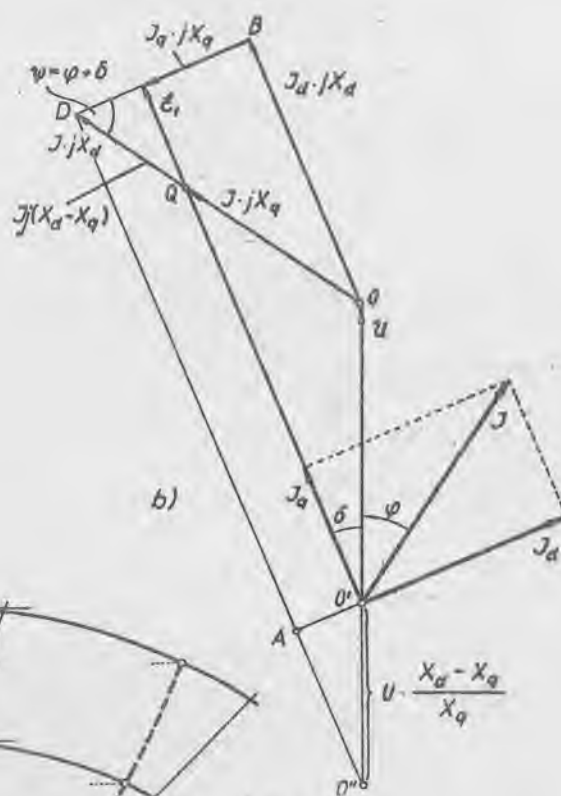
a uzbuđnoj struji i statorsche struja :

$$\frac{E}{X_s} = I_k \quad (3)$$

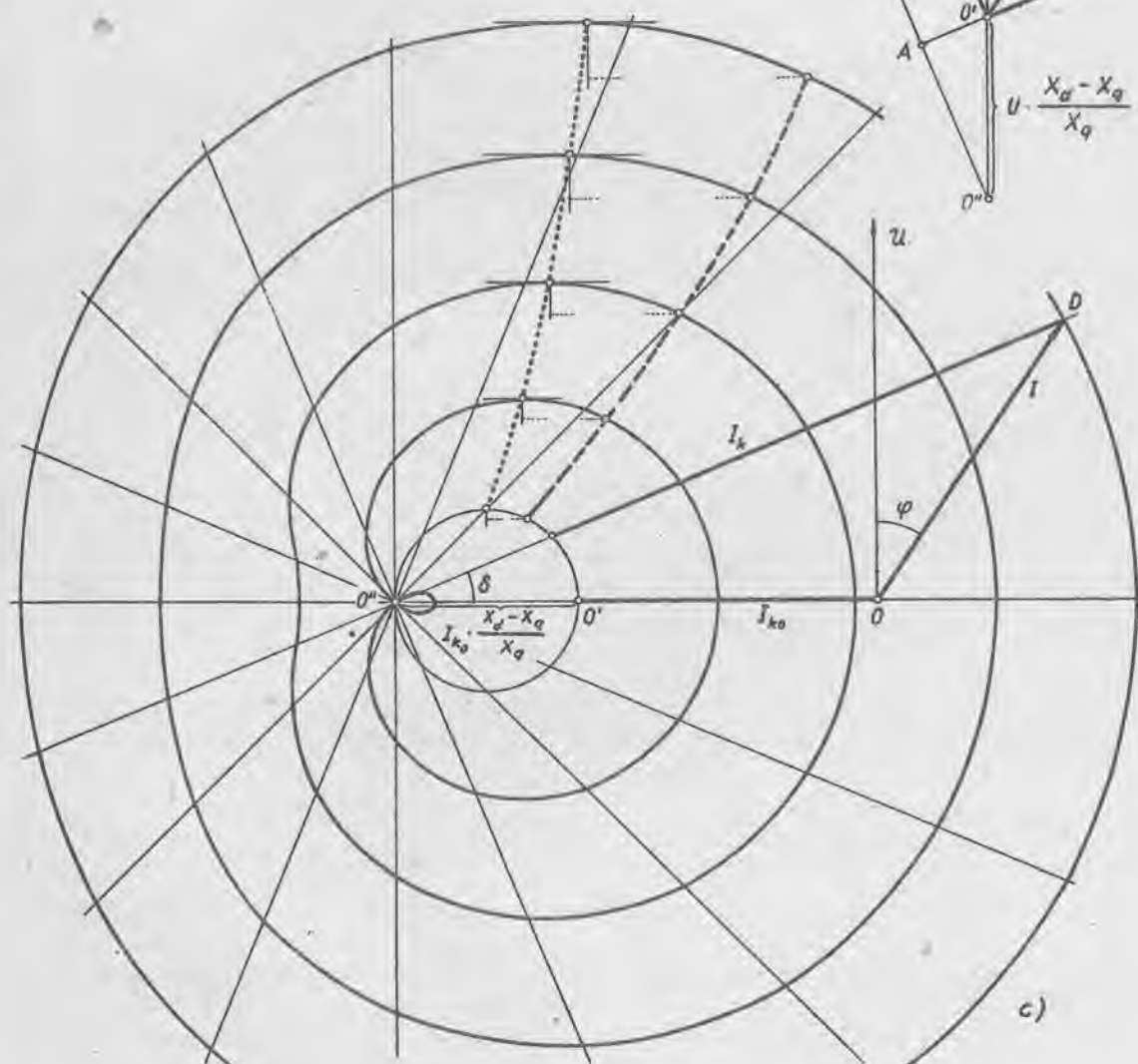
Prema tome možemo trokut uzbuđnih struja pretvoriti u trokut statorskih struja prema sl.3-77c). Struju I_{k0} nanesimo na lijevo od ishodišta O , i dobijemo novo ishodište O' . Kao što su geometrijska mjesta konstantne struje I kružnice sa središtem u O , tako su kružnice konstantne uzbuđne struje i identične s kružnicama $E = \text{konst}$ odnosno $I_k = \text{konst}$, tj. središte im je u O' .



a)



b)



c)

Druga je slika kod istaknutih polova. Reaktancija X_d za protje-
canje kojemu se os podudara s osi pola rotora, i reaktancija X_q
za os koja leži između polova, različite su. Prema tome možemo i
struju podijeliti u dvije komponente, uzdužnu I_d i poprečnu I_q ,
koje se superponiraju i daju struju I . Za prvu struju vrijedi re-
aktancija X_d , a za drugu X_q (sl.3-78a). Vektor uzbu-
de tako, da naponu na stezaljkama U dodamo padove napona u uzduž-
noj reaktanciji $I_d \cdot jX_d$ i u poprečnoj reaktanciji $I_q \cdot jX_q$
(sl.3-78b). Pošto smjer vektora E nije unaprijed poznat, već je poz-
nat samo fazni kut φ , provodimo konstrukciju tako, da dodamo vek-
toru U pad napona $I \cdot jX_d = \overline{OQ}$ okomito na struju I . Spoj isho-
dišta stom tačkom Q određuje smjer vektora E . Ako u istom smjeru
OQ nanesimo na napon U pad napona $I \cdot jX_d = \overline{OD}$, projekcija tačke D
u smjer vektora E određuje njegovu veličinu. Ova konstrukcija slije-
di iz jednostavnih geometrijskih razmatranja, ako se uzme u obzir da
je $\angle ODB = \varphi + \sigma = \psi$, te da je $I_d = I \cdot \sin \psi$ i $I_q = I \cdot \cos \psi$.

Povučemo li kroz tačku D paralelu sa smjerom vektora E , sje-
cište sa vertikalom O'' udaljeno je od ishodišta za :

$$\overline{O'O''} = U \cdot \frac{X_d - X_q}{X_q} \quad (4)$$

što odmah slijedi iz razmjera $\overline{O'O''} : \overline{OO'} = \overline{QD} : \overline{OQ}$.

Okomica od O' na $O''D$ određuje tačku A. Dužina $\overline{AD}$ jednaka
je iznosu vektora uzbu-
de E . Tačka A kod bilo kakove promjene
struje opterećenja ostaje na kružnici kroz tačke O' i O'' , promjera

$U \cdot \frac{X_d - X_q}{X_q}$. Ako sada sve veličine dijagrama podijelimo sa jX_d , do-
bivamo dijagram prema sl.3-78c), gdje je napon U nadomješten stru-
jom kratkog spoja I_{ko} , vektor uzbu-
de E odgovarajućom strujom krat-
kog spoja I_k , a pad napona $I \cdot jX_d$ strujom tereta I . Struja I_k pred-
stavlja uzбудnu struju kod struje tereta I u istom mjerilu, u kojemu
Iko predstavlja uzбудnu struju praznog hoda i_0 . Odatle slijedi jed-
nostavna konstrukcija geometrijskih mjesta konstantneuzbudne struje
i prema sl.3-78c). Od ishodišta O na lijevo nanesimo iznos I_{ko} ,

i nadovežemo dužinu $I_{ko} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_q} = \overline{O'O''}$. Iznad te dužine povučemo

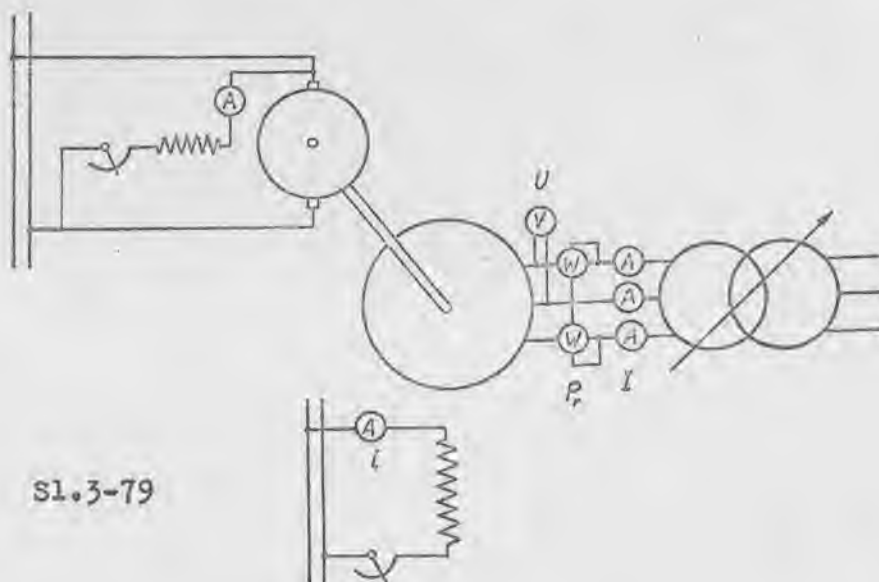
kružnicu, koja predstavlja $i = 0$. Za bilo koju vrijednost struje I
i kuta φ spojimo vrh D vektora struje I s tačkom O'' , pa dobi-
vamo odsječak $\overline{AD} = I_k$, odnosno uzбудnu struju :

$$i = i_0 \cdot \frac{I_k}{I_{ko}} \quad (5)$$

Obrnuto, ako vučemo iz O'' zrake u različitim smjerovima, i od sjeciš-
ta A s kružnicom nanosimo konstantne iznose I_k , dobivamo geome-
trijska mjesta konstantnih uzbudnih struja, koja su predstavljena tzv.
Pascalovim krivuljama (sl.3-78c). Pri tome nije uzeto u obzir zasiće-
nje, koje će povećati uzbudne struje prema ovim nezasićenim vrijednos-
tima. Zbog toga karakteristike rada na mrežu ne konstruiramo iz vektor-
skih dijagrama, već ih direktno snimamo. Razmatranje vektorskih dija-
grama pruža nam ipak uvid u ponašanje stroja, i daje nam orijentaciju
pri snimanju karakteristika.

3.7.3 Granica stabilnosti. Uz konstantnu uzбудnu struju promjena radnog opterećenja izazvati će promjenu struje opterećenja i faznog kuta (sl.3-77c). Vrh vektora struje kreće se po odgovarajućoj krivulji $i = \text{konst}$. Kad radna snaga toliko poraste, da horizontalni pravac $P_r = \text{konst}$ upravo tangira krivulju $i = \text{konst}$, dosegli smo granicu stabilnosti. Veću snagu stroj uopće ne može dati bez povećanja uzbude. U koliko bi snagu i najmanje povećali, stroj bi ispao iz koraka. To je tzv. "teoretska granica stabilnosti". Uslijed neizbježivih nemirnosti u pogonu ne možemo čak niti kod statičkog opterećenja računati s ovom granicom, već ostavljamo oko 10 % rezerve, pa pogonska stanja s radnim teretom 10 % ispod teoretske granice stabilnosti nazivamo "praktičkom granicom stabilnosti". Za generator s punim polovima prikazana je praktička granica stabilnosti crtkanim pravcem na sl.3.77c), dok je teoretska granica vertikalna kroz O' . Kod generatora s istaknutim polovima prikazana je teoretska granica stabilnosti točkanom krivuljom, a praktička granica stabilnosti crtkanom krivuljom na sl.3-78c). Zbog reaktivnog momenta granica stabilnosti je ovdje nešto povišena. Mjerenje granice stabilnosti može se provesti snimanjem momenta ispadanja iz koraka pri različitim uzбудama prema 3.6.4.

3.7.4 Karakteristike konstantne uzbude. Prema sl.3-79 za snimanje karakteristika potrebno je mjeriti uzбудnu struju sinhronog stroja, te

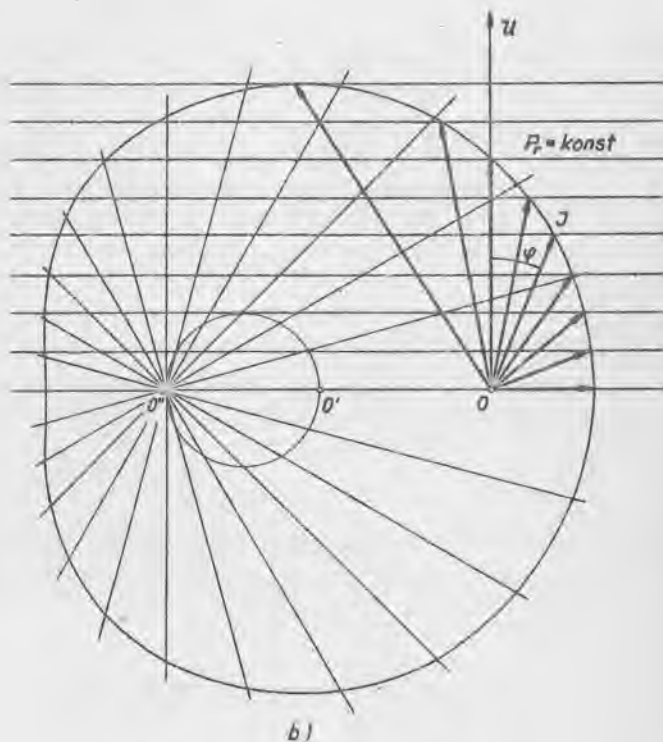
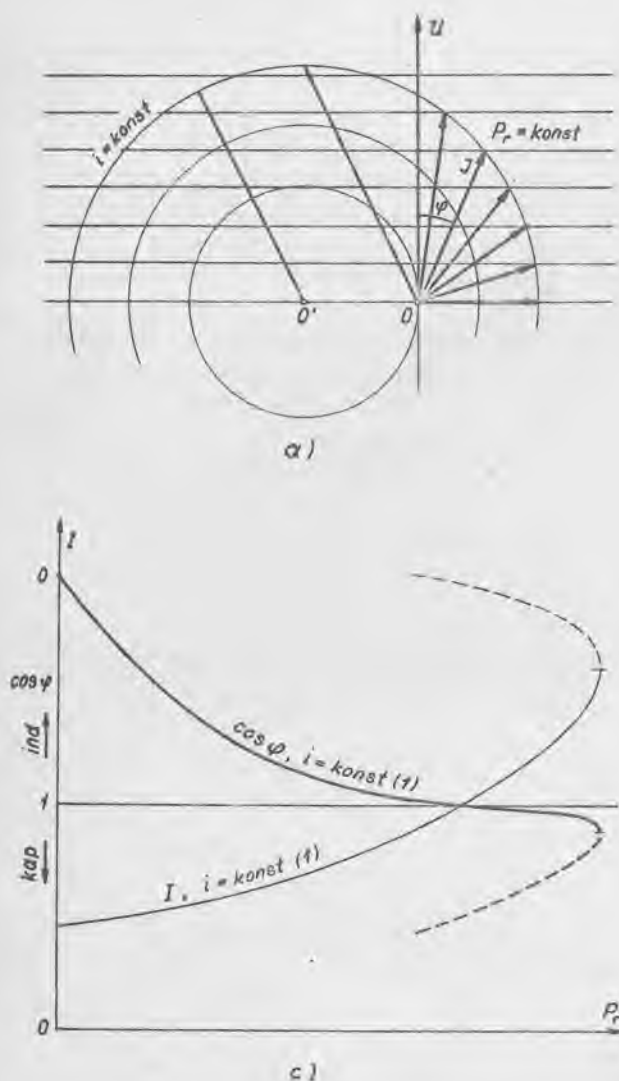


Sl.3-79

struju i snagu koju on daje ili prima. Napon mreže držimo za vrijeme mjerenja konstantnim. Radnu snagu po volji udešavamo otpornikom u uzбудnom krugu pogonskog istosmjernog stroja. Može se mijenjati i napon na stezaljkama istosmjernog stroja, ali je u tom slučaju potrebno uzбудu priključiti na poseban izvor konstantnog napona. Pošto smo udesili konstantnu vrijednost uzbude sinhronog stroja i , mijenjamo pogonsku snagu, i očitavamo na vatmetrima snagu P_r , a na ampermetrima pripadnu struju I . Odatle možemo izračunati faktor snage

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} UI}$$

U dijagram nanosimo struju I i faktor snage $\cos \varphi$ u ovisnosti od radne snage P_r , s naznakom uzbudne struje i za koju je pojedina krivulja snimljena. Na sl.3-80 a) i b) prikazano

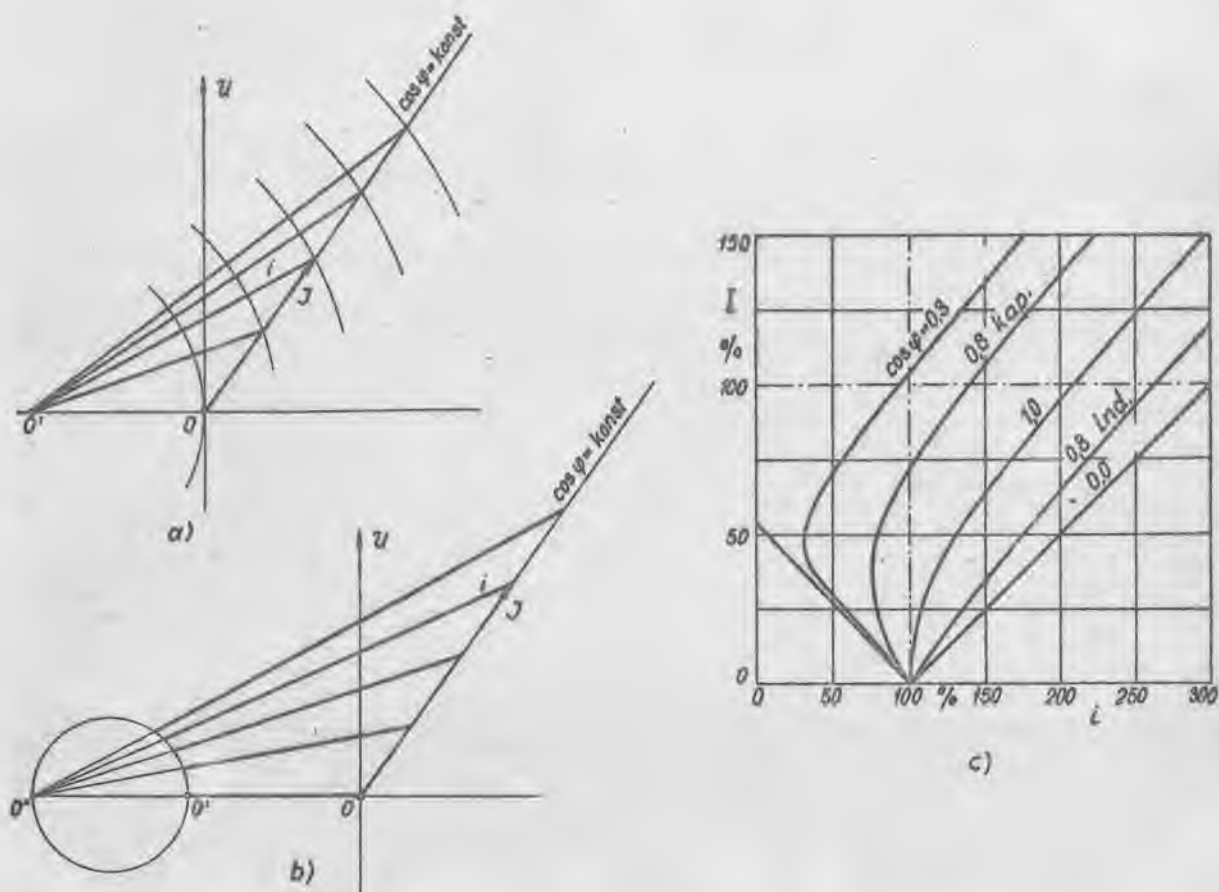


Sl.3-80

je u vektorskom dijagramu kako se mijenja I i $\cos \varphi$ u ovisnosti od P_r kod cilindričkog rotora i kod rotora s istaknutim polovima, dok sl.3-80c) daje krivulje $I = f(P_r)$ i $\cos \varphi = f(P_r)$ za jednu određenu vrijednost uzbudne struje i . Crtkani dio krivulje odnosi se na nestabilno područje iza granice stabilnosti.

3.7.5. Karakteristike regulacije. Karakteristikama regulacije obično nazivamo krivulje za koje vrijedi $\cos \varphi = \text{konst}$. Ako je napon U pri tome konstantan, onda će svakoj uzbudnoj struji i uz konstantan faktor snage odgovarati određena vrijednost struje I . U dijagramu dakle crtamo struju I u ovisnosti od uzbuđe i , i to po jednu krivulju za svaku vrijednost $\cos \varphi$. Na sl.3-81a) i b) vidi se ovisnost uzbuđe i struje opterećenja za jednu konstantnu vrijednost $\cos \varphi$ u vektorskom dijagramu za stroj s cilindričkim rotorom i za stroj s istaknutim polovima. Na sl.3-81c) vide se krivulje regulacije za različite vrijednosti $\cos \varphi$. Pošto je strujom I i faktorom

snage $\cos \varphi$ jednoznačno određena i radna snaga P , nije je potrebno posebno unositi u dijagram. Pri mjerenju krivulja regulacije



Sl.3-81

služimo se istim spojem instrumenata prema sl.3-79, a time da sada mijenjamo uzbudu i , a držimo konstantnim faktor snage $\cos \varphi$. To znači, da nakon promjene uzbude i moramo mijenjati pogonsku snagu, dok ne dobijemo opet isti $\cos \varphi$. Najjednostavnije je uključiti u mjerenje $\cos \varphi$ -metar s direktnim očitavanjem. Ako to nije moguće, onda je zgodno uzeti vatmetre u Aronovom spoju, gdje vrijedi:

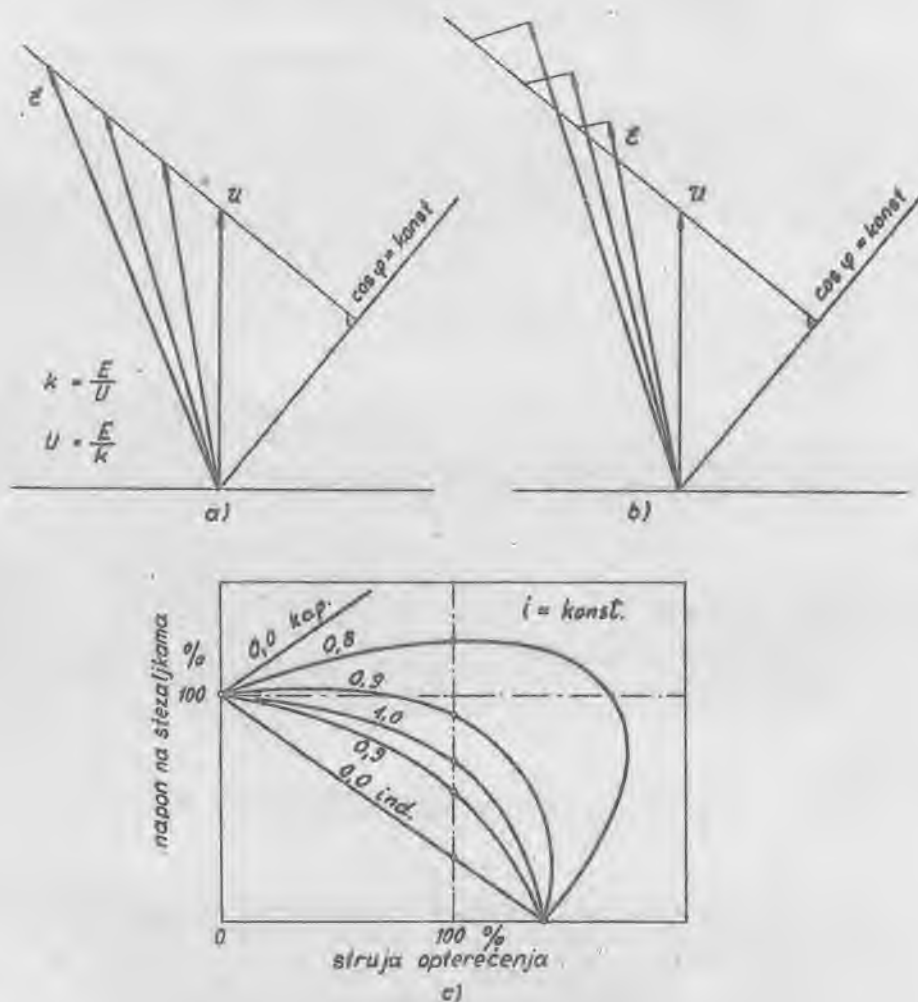
$$\lg \varphi = \sqrt{3} \cdot \frac{\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - 1}{\frac{\alpha_1}{\alpha_2} + 1} \quad (1)$$

Omjer većeg i manjeg otklona $\frac{\alpha_1}{\alpha_2}$ možemo odatle izračunati:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{\sqrt{3} + \lg \varphi}{\sqrt{3} - \lg \varphi} \quad (2)$$

Pri udešavanju pogonske snage unaprijed izračunamo taj omjer za odabranu vrijednost $\cos \varphi = \text{konst}$, i pri snimanju svih tačaka jedne krivulje održavamo taj omjer konstantnim.

3.7.6 Karakteristike regulacije uz konstantnu uzбудnu struju. Dok je normalno pri snimanju svih karakteristika napon mreže U konstantan, iznimno se može pojaviti slučaj, gdje nas zanima, kako će se ponašati napon U pri konstantnoj uzbudnoj struji. Obično snimamo nekoliko krivulja, za nekoliko vrijednosti $\cos \varphi = \text{konst}$. Prema sl.3-82a)



Sl.3-82-

možemo uz određeni $\cos \varphi$ i uz $U = \text{konst}$ nacrtati pripadne vektore uzbuđe E u ovisnosti o veličini struje opterećenja I . Na sl.3-82b pokazano je to isto za rotor s istaknutim polovima. Ako sada umjesto napona U držimo konstantnom uzбудu, biti će vektor E uvijek istog iznosa. Možemo uzeti, da se za svaku struju I promijenilo mjerilo vektorskog dijagrama, tako da je uvijek $E = \text{konst}$. Sa dijagrama treba očitati omjer :

$$k = \frac{E}{U} \quad (1)$$

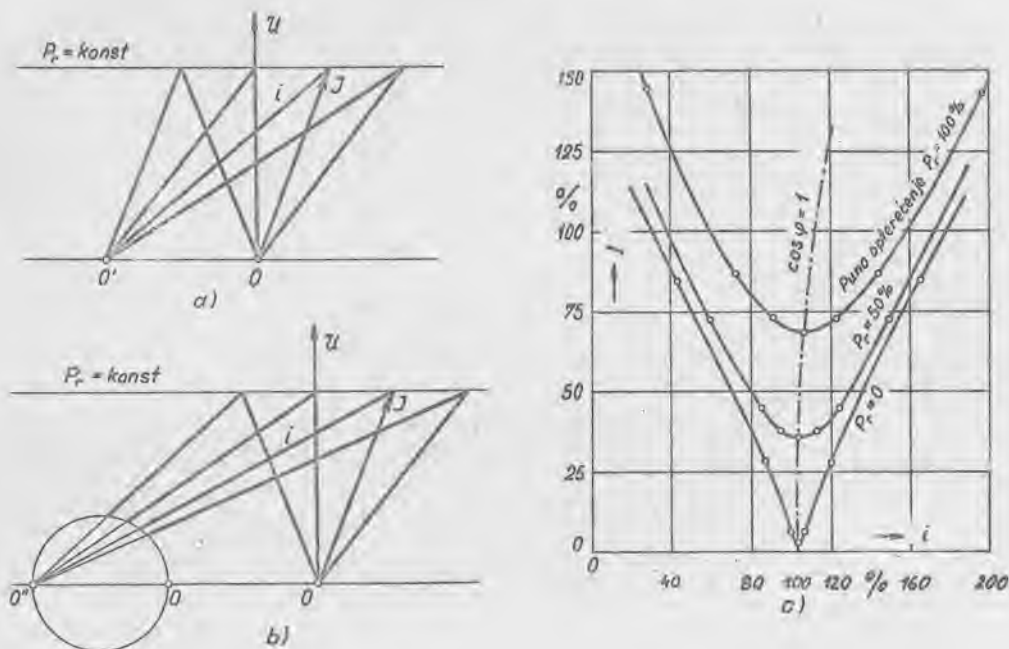
pa odmah dobivamo napon na stezaljkama uz konstantnu uzбудu i konstantno $\cos \varphi$:

$$U = \frac{E}{k} \quad (2)$$

Pošto faktorom k smanjujemo sve vektore u dijagramu, to je jasno, da ovaj napon U odgovara struji opterećenja I/k , a ne prvobitno postavljenoj struji I . Krivulje ovisnosti napona na stezaljkama o struji opterećenja prikazane su na sl.3-82c).

Snimanje vršimo prema sl.3-79, kao i kod krivulja regulacije uz $U = \text{konst}$, samo s tom razlikom, što sada ne mijenjamo uzbudu i od tačke do tačke, već je ostavljamo konstantnom, a mijenjamo napon mreže U , i udešavamo pogonski stroj tako dugo, dok uz novu vrijednost U ne postignemo opet odabrani $\cos \varphi = \text{konst}$. I ovdje ne ortamo u dijagram snagu P_r , jer je ona sa U , I , $\cos \varphi$ jednoznačno odredjena.

3.7.7 V-krivulje. Karakteristike koje prikazuju pri konstantnom naponu U struju opterećenja I u ovisnosti o uzbudi i , ali ovaj puta ne uz konstantno $\cos \varphi$, već uz konstantnu radnu snagu P_r , nazivamo - zbog njihova oblika - V-krivuljama. Na sl.3-83a) i b) prikazana je ovisnost $I = f(i)$ za $P_r = \text{konst}$ na vektorskim dija-



Sl.3-83

gramima za cilindrički rotor odnosno za rotor s istaknutim polovima, dok sl.3-83 c) prikazuje V-krivulje za puni teret, polovinu opterećenja, i teret $P_r = 0$. Tačke minimalne struje povezane daju karakteristiku za $\cos \varphi = 1$, a V-krivulja za $P_r = 0$ odgovara karakteristici regulacije za $\cos \varphi = 0$. Snimanje V-krivulja vršimo takodjer prema sl.3-79, s time da pogonsku snagu ne diramo, već mijenjamo uzbudu i , te očitavamo struju I . Faktor snage $\cos \varphi$ nije potrebno ucrtavati u dijagram, jer je za svaku tačku jednoznačno odredjen vrijednostima P_r i I uz konstantne U .

3.7.8 Medjusobna veza. Sve karakteristike kod kojih je $U = \text{konst.}$ prikazuju vezu izmedju 4 veličine : i , I , P_r , $\cos \varphi$. Jedna od njih služi kao parametar, tj. crtamo po jednu krivulju za svaku vrijednost parametra. Osim toga, čim su poznate dvije veličine od ukupno tri: P_r , I , $\cos \varphi$, onda je pri $U = \text{konst}$ poznata i treća. Kako god odabrali parametar, i koje god dvije veličine prikazali u medjusobnoj ovisnosti, odredili smo vezu izmedju svih četiriju veličina unutar prikazanog područja. Jedini je zahtjev, da uzbuda i bude bilo parametar, bilo jedna od mjerenih veličina. Tako npr. na V -krivulji $P_r = P_{r1}$ možemo odrediti tačku krivulje regulacije $\cos \varphi = \cos \varphi_1$, ako računamo :

$$I_1 = \frac{P_{r1}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi_1}$$

Potražimo tačku na krivulji $P_{r1} = \text{konst}$ sa $I = I_1$, pa možemo očitati pripadnu uzbudu i_1 , tj. imamo par vrijednosti $I = f(i)$ za krivulju regulacije $\cos \varphi_1 = \text{konst.}$ Na isti način možemo preračunati i ostale karakteristike, pa je dovoljno snimiti jednu grupu karakteristika, da bi iz nje mogli izvesti sve ostale.

3.8. Zagrijavanje i hlađenje

Osjetljivost izolacije prema visokim temperaturama iziskuje ograničenje temperature namota u pogonu, koje je definirano propisima. Pri ispitivanju dovršenog stroja treba ustanoviti, jesu li zagrijavanja ostala u dopuštenim granicama. Sigurnost pogona zahtijeva, da se i kasnije, tokom redovitog pogona, kontroliraju zagrijavanja na kritičnim mjestima.

Da bi zagrijavanje ostalo u dopuštenim granicama, a da se stroj i pak potpuno iskoristi, potrebno je da rashladni sistem dobro funkcioniра. Kontrola rashladnog sistema svodi se na mjerenje količine rashladnog sredstva, i eventualno kontrolu ispravne raspodjele strujanja.

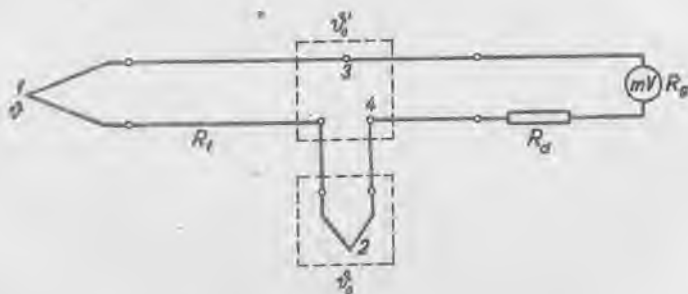
3.8.1 Termometri. Za određivanje temperature rashladnog zraka i vode, ulja u ležajima, te pristupačnih mjesta na stroju, često se služi-mo tekućinskim termometrima. To mogu biti alkoholni termometri, ili termometri sa živom. Nedostatak je ovih potonjih, što se u živi mogu inducirati vrtložne struje, ako mjerimo u području rasipnih polja, te što se živa teško ukloni, ako se termometar razbije. Kod mjerenja na stroju treba uvijek vezati termometar na vrpcu oko vrata, ili za kućište, kako se ne bi dogodilo da padne van dohvata, što bi moglo uzrokovati mnogo posla. Termometar treba odgovarajućim zaslonima zaštititi od eventualnog direktnog isijavanja od vrućih dijelova koje ne mjerimo, a isto tako treba spriječiti odvod topline s termometra. Kako bi termički kontakt s mjestom mjerenja bio što bolji, omotamo glavu termometra čvrsto staniolom, koji dolje previjemo, i čvrsto priljubimo na mjesto mjerenja, a zatim čitavu glavu termometra dobro zaštitimo pustom ili pamukom. Pri postavljanju termometra treba paziti, da se očitavanja mogu vršiti ne dirajući termometar, kako ne bi pokvarili dobar toplinski kontakt.

3.8.2 Termoelementi. Za mjerenje lokalne temperature, a pogotovo tamo gdje želimo registrirati relativno brze promjene temperature, najprikladniji su termoelementi, zbog svoje male mase i malih dimenzija. Upotreba termoelemenata bazira se na termoelektričkom principu: na spojištu dvaju različitih metala javlja se uvijek napon ovisan o temperaturi spojišta i vrsti upotrebljenih materijala. U zatvorenom krugu od različitih materijala uz jednaku temperaturu svih spojišta suma svih termonapona je nula :

$$\sum e_{i-konst} = 0 \quad (1)$$

Obično upotrebljavamo "termopar" sa dvije žice od različitih metala npr. bakar-konstantan, ili željezo-konstantan. Jedno spojište, tzv. "hladno spojište", nalazi se na poznatoj temperaturi ϑ_0 , bilo u termos-boci s ledom i vodom (0°C), bilo uz termometar u prostoriji, na kojemu možemo očitati ϑ_0 . Drugo, "toplo spojište", stavimo na mjesto na kojemu želimo izmjeriti temperaturu ϑ . Ostala spojišta, npr. dovoda na instrument, nalaze se na temperaturi prostorijske ϑ_2 (sl.3-84). Označimo spojišta s 1,2,3,4,..., a termonapone odgovarajućim indeksima. Kad bi svuda bila temperatura ϑ_0 vrijedilo bi :

$$(e_1 + e_2 + e_3 + e_4 + \dots)_{\vartheta_0} = 0 \quad (2)$$



Sl.3-84

Pri temperaturi ϑ iznosi prirast napona u spojištu 1 :

$$\Delta e_1 = |e_{1\vartheta}| - |e_{1\vartheta_2}| \quad (3)$$

a prirast u spojištu 2 pri temperaturi ϑ_0 iznosi :

$$-\Delta e_2 = |e_{2\vartheta_0}| - |e_{2\vartheta}| \quad (4)$$

Predznak je suprotan, jer je redoslijed materijala uz isti smjer obilaženja u krugu suprotan. Ukupni napon u krugu iznosi sada :

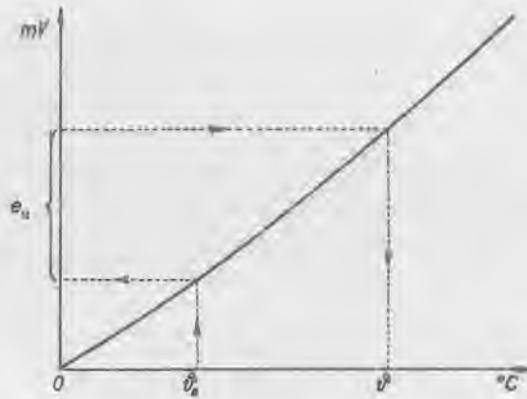
$$e_1 + \Delta e_1 + e_2 + \Delta e_2 + e_3 + e_4 + \dots = \Delta e_1 + \Delta e_2 \quad (5)$$

Ako uvrstimo za Δe_1 i Δe_2 izraze iz (3) i (4), i ako se sjetimo da je $|e_{1\vartheta_0}| = |e_{2\vartheta_0}|$ jer su 1 i 2 spojišta istih materijala, dobivamo konačno :

$$\Sigma e = e_{1\theta} - e_{2\theta} = e_u$$

(6)

t.j. ukupni napon u krugu, koji mjerimo milivoltmetrom, jednak je razlici termonapona toplog i hladnog spojišta, dok temperatura ϑ_2 ostalih spojišta uopće ne moramo poznavati. Na sl. 3-85 prikazana je krivulja baždarenja termoelementa, pri čemu je hladno spojište bilo na temperaturi 0°C . Ako je prilikom kasnijih mjerenja hladno spojište na



Sl.3-85

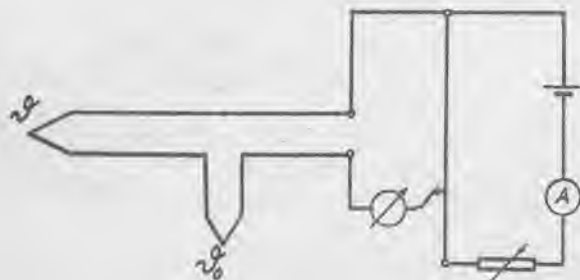
temperaturi ϑ_2 , a izmjereni napon iznosi e_u (mV), može se konstrukcijom prema sl.3-85 očitati temperatura toplog spojišta ϑ_1 .

Za mjerenje relativno niskih temperatura u električkim strojevima pogodan je termoelement s bakrom i konstantanom, koji daje napon od cca $4,2 \text{ mV}/100^\circ\text{C}$. Ova vrijednost ponešto varira od elementa do elementa, a i karakteristika $e = f(\vartheta)$ nije potpuno linearna, pa je potrebno za iole tačnija mjerenja svaki element baždariti. Najbolje je provesti baždarenje termoelementa zajedno s instrumentom koji ćemo mjeriti. Ako je naime R_t otpor termoelementa, R_d otpor dovođa, a R_g otpor galvanometra (sl.3-84), onda će uz napon u krugu e_u napon na galvanometru iznositi :

$$e_g = e_u \cdot \frac{R_g}{R_t + R_d + R_g} \quad (7)$$

t.j. razlikovati će se to više od ukupnog termonapona e_u , što je manji otpor R_g u usporedbi s ostalim otporima u krugu. Treba dakle upotrebljavati instrument što većeg vlastitog otpora, ili ga baždariti s termoelementom i svim dovodima. Mjesto galvanometra može se upotrebiti metoda kompenzacije prema sl. 3-86. U tom slučaju kod očitavanja ne teče kroz termoelement struja, pa otpori dovođa ne moraju biti baždareni.

3.8.5 Otpornički termometri. Za mjerenje zagrijavanja u stroju u toku pogona, ugrađuju se u stroj obično otpornički termometri. Ovi se izradjuju najčešće od tanke Nižice, koja se bifilarno namata na tra-



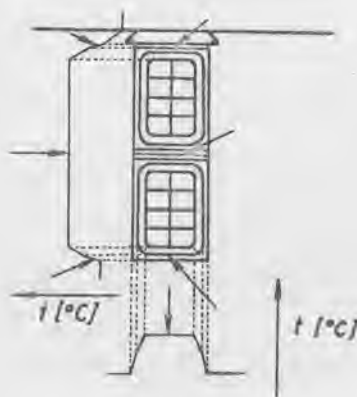
Sl.3-86

ku od pertinaksa, širine približno 10 mm i debljine 1 mm, koja se zatim bandažira uljnim platnom. Dužina trake uzima se:

12,5 cm	za duž.statora do 0,5 m
25 cm	"- 0,5 do 1 m
50 cm	"- preko 1 m

Kod stroja iznad 5 MVA snage, ili preko 1 m dužine, potrebno je ugraditi u stator bar 6 takovih termometara. Termometre ugradjujemo po 3 u paket limova,

i po 3 u utore, tako da budu smješteni između dvaju slojeva u utoru kod dvoslojnih namota. Sl.3-87 prikazuje približnu raspodjelu temperature po visini i po širini utora, gledano uvijek u srednjem presjeku,

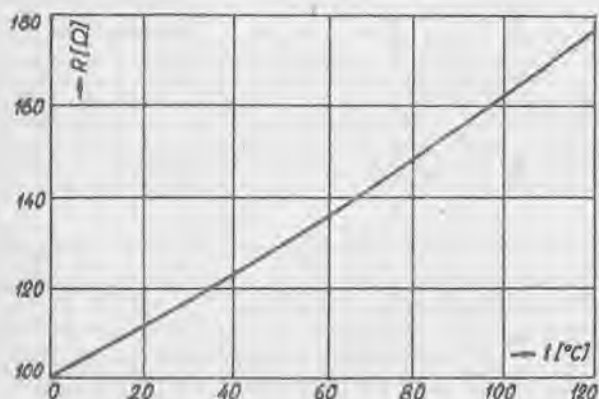


Sl.3-87

pa se vidi da je mjerenje temperature između slojeva najbliže stvarnoj temperaturi bakra.

Žica za termootpornik ne treba da bude tanja od 0,1 Ø, kako se ne bi zagrijavala uslijed struje mjerenja. Obično se namota tako, da otpor bude 100 oma pri 0 °C. Otpornički termometar treba zatim

baždariti. Za nikalj mijenja se otpor s temperaturom prema dijagramu na sl.3-88, no i tu treba provesti baždarenje od slučaja do slučaja, jer se pojedini uzorci mogu razlikovati.

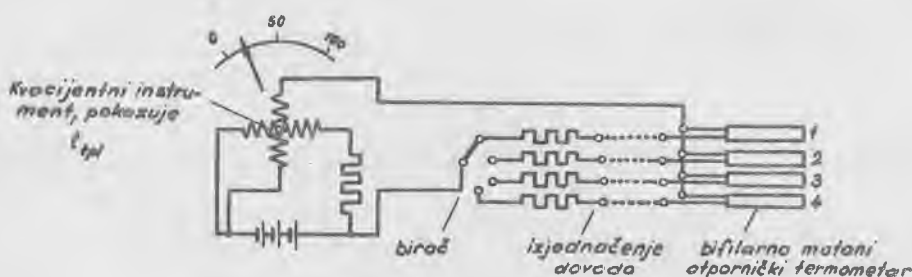


Sl.3-88

Ša (sl.3-89). Kvocijentni instrument pokazuje kvocijent struja u obe grane :

$$\alpha = k \cdot \frac{I_1}{I_2} = k \cdot \frac{U}{R} \cdot \frac{R_1}{U} = k \cdot \frac{R_1}{R} \quad (1)$$

pa je pokazivanje neovisno o naponu baterije U. Pošto su dužine dovoda različite, a svi otpornički termometri su jednaki, uključen je u svaki dovod komad žice za izjednačenje otpora dovoda. Instrument je



Sl.3-89

baždaren u °C, a korekcija otpora dovoda vrši se na licu mjesta na taj način, što se umjesto pojedinih otporničkih termometara redom priključuje tačno baždaren, temperaturno neosjetljiv otpornik, pa se korekciona žica toliko skraćuje ili produljuje, dok instrument ne pokaže odgovarajuću baždarnu temperaturu.

Kod preciznijih mjerenja upotrebljavaju se termootpornici s platinskom žicom, koja povećava otpor za 38,5 % na 100 °C.

3.8.4 Odredjivanje temperature iz otpora namota. Kao i kod transformatora, možemo i ovdje mjeriti srednju temperaturu namota iz povećanja otpora samog namota. Pri tome vrijedi sve što je rečeno u 2.9.4 i 2.9.5. Ekstrapolacija toplog otpora na čas isklapanja potrebna je samo onda, ako zaustavljanje stroja dugo traje, tako da se prvo mjerenje ne može izvršiti ranije od 2 min nakon rasterećenja. Ako se stroj brzo zaustavlja, dovoljno je u času rasterećenja i isklapanja istovremeno obustaviti hlađenje stroja.

Kao i kod transformatora, tako se i kod sinhronog stroja može mjeriti otpor namota bez prekidanja pogona upotrebom strujnih i naponskih filtara, kako je prikazano u 2.9.7.

Otpor rotora može se trajno kontrolirati u pogonu iz očitavanja uzbudne struje i napona na kliznim kolutima. Ovaj napon treba mjeriti direktno na kliznim kolutima s pomoću mjernih šiljaka, a ne na četkicama, jer bi u protivnom slučaju mjerili ne samo otpor rotorskog namota, nego i prelazni otpor na četkicama. Iz otpora rotorskog namota možemo u svako doba izračunati njegovu temperaturu, ako poznamo vrijednost otpora hladnog namota kod određene temperature.

3.8.5 Propisi. Prema preporukama Internacionalne elektrotehničke komisije (IEC) usvajaju se u propisima dopuštena zagrijanja za različite klase izolacije u rotacionim strojevima prema tabeli 3.8.1 :

Tabela 3.8.1

	A			E			B			F			H		
	T	R	ETD	T	R	ETD	T	R	ETD	T	R	ETD	T	R	ETD
1.	-	60	60	-	70	70	-	80	80	-	100	100	-	125	125
2.	50	60	-	65	75	-	70	80	-	85	100	-	105	125	-
3.							-	90	-	-	110	-			
4.a)	60	60	-	75	75	-	80	80	-	100	100	-	125	125	-
b)	65	65	-	80	80	-	90	90	-	110	110	-	135	135	-
5.	60	-	-	75	-	-	80	-	-	100	-	-	125	-	-
6.	Temperatura ograničena			ograničena			samo utjecajem na okolne			dijelove					
7.	"-"			"-"			"-"			"-"			"-"		
8.	60	-	-	75	-	-	80	-	-	100	-	-	125	-	-
9.	60	-	-	70	-	-	80	-	-	90	-	-	100	-	-

Dopuštena zagrijanja su navedena u °C, te se odnose na

T - mjerenje termometrom

R - odredjivanje iz povećanja otpora namota

ETD - mjerenje električkim temperaturnim detektorom (termosondom), tj. ugrađenim termoelementom ili otporničkim termometrom.

Ako je nazivni napon stroja veći od 11 000 V smanjuje se dopušteno zagrijanje za svakih 1000 V iznad 11 000 V po 1,5 °C.

Oznake stupaca A, E, B, F, H odnose se na klasu upotrebljene izolacije.

Oznake radaka znače :

1. Namoti za izmjenične struje i to
 - a) turbogenerators iznad 5 MVA
 - b) strojeva s istaknutim polovima iznad 5 MVA , ili dužine iznad 1 m
2. a) Namoti za izmjenične struje strojeva ispod 5 MVA
b) Uzbudni namoti, osim onih pod 3).
c) Namoti vezani s kolektorom
3. Uzbudni namoti turbogenerators
4. a) Višeslojni uzbudni namoti i kompenzacioni namoti
b) Neizolirani jednoslojni uzbudni namoti
5. Stalno kratko spojeni izolirani namoti
6. Stalno kratko spojeni neizolirani namoti
7. Željezna jezgra i drugi dijelovi bez kontakta s namotom
8. Željezna jezgra i drugi dijelovi u kontaktu s namotom
9. Kolektori i klizni koluti.

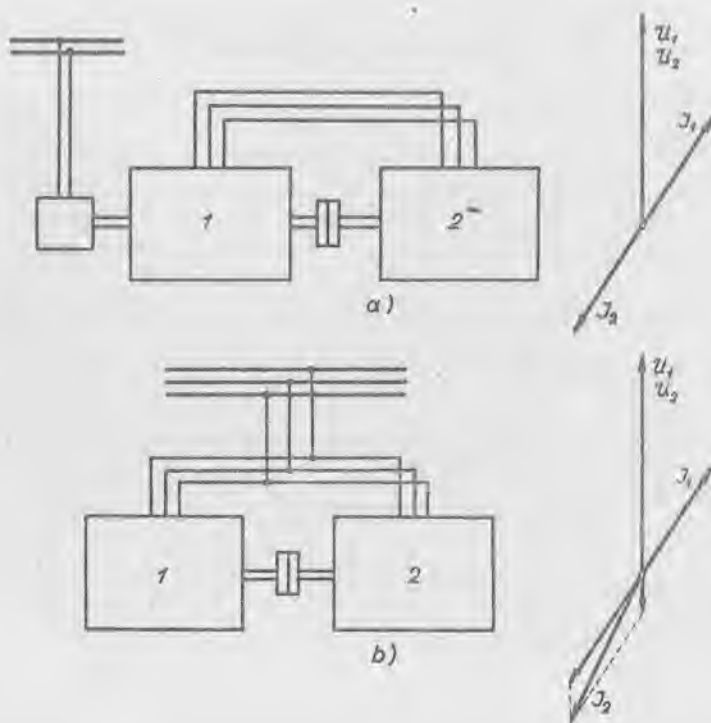
Sva ova dopuštena zagrijanja računaju se kao nadtemperature iznad temperature rashladnog zraka ili plina na ulazu u stroj, pri čemu ta temperatura ne smije premašiti 40°C . Prilikom mjerenja zagrijanja treba da bude temperatura rashladnog sredstva između 10°C i 40°C . Ako se uzima svježiji rashladni zrak iz strojarnice, treba mjeriti temperaturu rashladnog zraka s nekoliko termometara u polovini visine stroja i u udaljenosti 1 - 2 m. Ove termometre treba zaštititi od isijavanja topline i direktne ventilacije.

Ako su temperature rashladnog sredstva na mjestu rada znatno niže od navedene vrijednosti, može se dopustiti veće zagrijavanje uz izričiti dogovor i naznaku na natpisnoj pločici, ali tako da temperatura namota ne prekorači onu, koju bi dopustili uz normalne uslove. Obrnuto, pri povišenoj temperaturi rashladnog sredstva za 0 do 5°C mora se smanjiti dopušteno zagrijanje za 5°C , a za 5 do 10°C mora se smanjiti za 10°C . Iznad toga potrebno je posebno utanačenje. Mjerenje zagrijanja vrši se ili mjerenjem povećanja otpora, ili ugrađenim termosondama. Mjerenje termometrom na površini namota daje znatno niže temperature ($10 - 15^{\circ}\text{C}$), pa može samo iznimno poslužiti tamo gdje drugačije mjerenje nije provedivo.

3.8.6 Metode opterećenja. Zagrijanje stroja treba mjeriti u trajnom radu s nazivnim opterećenjem. Kod manjih jedinica nije teško u ispitnoj stanici ostvariti takav rad s istosmjernim strojem kao pogonskim strojem, ako ispitujemo generator, a kao teretom ako ispitujemo motor. Kod većih jedinica moguće je ostvariti prilike nazivnog opterećenja tek nakon postavljanja stroja na licu mjesta i priključka na mrežu.

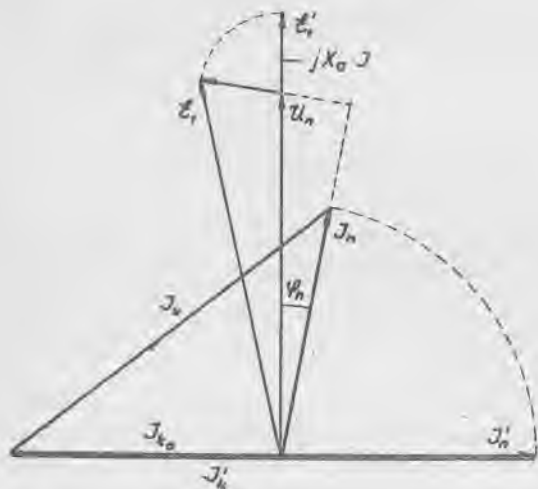
Umjetni spojevi za mjerenje zagrijavanja sinhronog stroja nikada se u praksi ne koriste. U koliko imamo na raspolaganju dva stroja slične veličine, od kojih je ispitivani manji, možemo ih povezati specijalnom spojkom, kojom se može tačno udesiti kut zakreta između

oba rotora. Kutom zakreta određeno je radno opterećenje, pri čemu stroj čiji je rotor pomaknut naprijed u smjeru vrtnje preuzima ulogu generatora, a drugi ulogu motora. Odgovarajućom preuzbudom jednoga i poduzbudom drugoga postizemo i nazivni faktor snage. Pogon pri tome daje manji pomoćni istosmjerni stroj, koji pokriva samo gubitke obaju strojeva prema sl. 3-90 a) ili mreža prema sl. 3.90 b) .



Sl. 3-90

Samim jednim strojem priključenim na mrežu može se ostvariti opterećenje uz $\cos \varphi = 0$, tj. čisto jalovom snagom. Pri tome možemo postići nazivni napon i nazivnu struju, ali će uzbudna struja uz $\cos \varphi = 0$ biti znatno veća od one kod nazivnog $\cos \varphi$ (sl.3-91) .



Sl.3-91

Osim toga biti će i gubici u željezu nešto veći, ukoliko umjesto nazivnog napona na stezaljkama ne udesimo takovu vrijednost, kod koje će inducirani napon biti jednak kao i pri nazivnim pogonskim prilikama. Pošto uzbudni gubici malo utječu na zagrijanje statora, može se takovo mjerenje provesti, s time da korigiramo zagrijanje rotora. U tu svrhu treba provesti dva do tri dodatna mjerenja pri sniženoj uzbudnoj struji, ili treba preračunati zagrijavanje proporcionalno s gubicima u rotorakom namotu na nižu uzbudnu struju. Kod brzih strojeva, oso-

bito turboatora, treba računati sa znatnim zagrijanjem rotora zbog gubitaka trenja i ventilacije čak i kod uzbudne struje $i = 0$.

3.8.7 Zagrijavanje iz praznog hoda i kratkog spoja. Kad bi toplinski otpori unutar stroja bili konstante, ovisilo bi zagrijavanje na bilo kojem mjestu stroja - npr. na najtoplijem mjestu statorskog namota - o gubicima na pojedinim mjestima u stroju, koja označimo indeksima $a, b, c, \dots$:

$$\Delta \vartheta_a = K_{aa} \cdot P_a + K_{ba} \cdot P_b + K_{ca} \cdot P_c + \dots \quad (1)$$

Faktori $K_{aa}, K_{ba}, K_{ca} \dots$ bili bi konstante, a $P_a, P_b, P_c \dots$ su gubici na odgovarajućim mjestima u stroju. Označimo indeksom 1 i indeksom 2 dva različita pogonska stanja, i napišimo gornju jednadžbu za svako od tih stanja, te zbrojimo jednadžbe:

$$\Delta \vartheta_{a1} + \Delta \vartheta_{a2} = K_{aa} (P_{a1} + P_{a2}) + K_{ba} (P_{b1} + P_{b2}) + K_{ca} (P_{c1} + P_{c2}) + \dots \quad (2)$$

Ako sada zamislimo pogonsko stanje 3, za koje vrijedi:

$$\begin{aligned} P_{a3} &= P_{a1} + P_{a2} \\ P_{b3} &= P_{b1} + P_{b2} \\ P_{c3} &= P_{c1} + P_{c2} \end{aligned} \quad (3)$$

vrijedit će očito i za zagrijanje:

$$\Delta \vartheta_3 = \Delta \vartheta_1 + \Delta \vartheta_2 \quad (4)$$

To se, naravno, može protegnuti i na zbroj zagrijanja iz više pojedinačnih mjerenja, za koja su sume gubitaka jednake odgovarajućim gubicima skupnog mjerenja prema (3). Ova metoda naziva se metodom superpozicije. Praktički se primjenjuje tako, da se mjere zagrijanja u praznom hodu pri nominalnom naponu, i u kratkom spoju pri nominalnoj struji. Ako zbrojimo gubitke u željezu iz oba pokusa, oni su jednaki gubicima u željezu pri nazivnom opterećenju. Isto vrijedi za gubitke ovisne o struji statora. Za rotorske gubitke to nije ispunjeno, ali rotorski gubici vrlo malo utječu na zagrijanje statora, kao i obrnuto. Prema zakonu superpozicije morao bi dakle zbroj zagrijanja iz praznog hoda i kratkog spoja biti jednak zagrijanju pri nazivnom opterećenju:

$$\Delta \vartheta_1 \approx \Delta \vartheta_0 + \Delta \vartheta_2 \quad (5)$$

Gubici trenja i ventilacije ušli su pri tome dva puta u račun, pa treba smanjiti zagrijanje za onoliko, koliko se u prosjeku zagrije rashladno sredstvo uslijed gubitaka trenja i ventilacije. Drugi izvori greške su razlika između dodatnih gubitaka uzbudjenog i neuzbudjenog stroja, razlika u otporu namota pri različitim temperaturama, a prije svega ovisnost koeficijenata prelaza topline o temperaturi. Ipak se metoda superpozicije primjenjuje tamo, gdje nije moguće opteretiti stroj. Prema iskustvu rezultati su obično za $\pm 5^\circ$ previsoki. Zagrijanje rotora određuje se preračunavanjem na

nazivnu uzbudnu struju, i to samo onog dijela zagrijanja, koji se dobije odbijanjem zagrijanja uslijed trenja i ventilacije :

$$\Delta \psi_{2n} = (\Delta \psi_2 - \Delta \psi_{tr,v}) \cdot \left(\frac{i_n}{i} \right)^2 + \Delta \psi_{tr,v} \quad (6)$$

Slično se može izvršiti mjerenje zagrijanja metodom intermitiranog pogona u praznom hodu i kratkom spoju. Unutar intervala $T = 15$ do 30 minuta treba tjerati stroj u praznom hodu kroz vrijeme t_1 , te zatim u kratkom spoju kroz vrijeme t_2 . Odnos ovih vremena prema trajanju jednog ciklusa T treba odabrati tako, da ukupna razvijena toplina unutar jednog ciklusa odgovara razvijenoj toplini kroz isto vrijeme pri nazivnom pogonu, i to zasebno za željezo, zasebno za statorski namot, i zasebno za rotorski namot. Ako s indeksom n označimo nazivni pogon, mora dakle biti :

$$P_{Fe} \cdot \frac{t_1}{T} = P_{Fe,n} \quad (7)$$

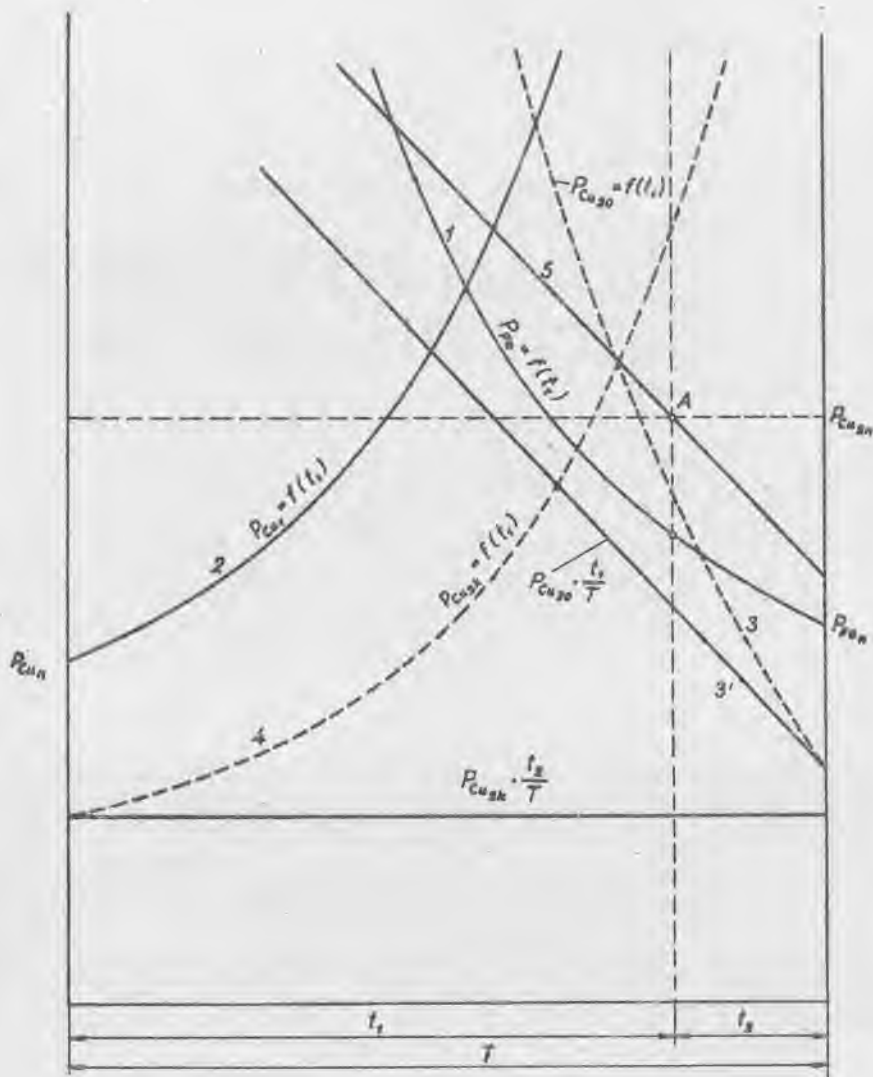
$$P_{Cu1} \cdot \frac{t_2}{T} = P_{Cu1,n} \quad (8)$$

$$P_{Cu2o} \cdot \frac{t_1}{T} + P_{Cu2k} \cdot \frac{t_2}{T} = P_{Cu2,n} \quad (9)$$

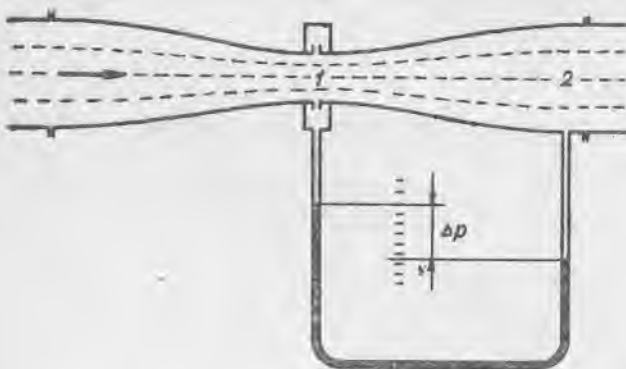
Što se tiče samih gubitaka u željezu, taj rezultat se daje postići različitim trajanjima praznog hoda t_1 , pri čemu svakom vremenu t_1 odgovaraju drugačiji gubici P_{Fe} (krivulja 1 na sl.3-92). Isto tako može se za svako vrijeme $t_2 = T - t_1$ odrediti gubitke u bakru P_{Cu1} , koji daju u vremenu T istu količinu topline kao nominalni gubici P_{Cu2n} (krivulja 2 na sl.3-92). Međutim, veličinom gubitaka P_{Fe} određena je uzbudna struja, a time i uzbudni gubici P_{Cu2o} za vrijeme praznog hoda (krivulja 3), a isto tako gubici P_{Cu1} određuju i uzbudne gubitke pri kratkom spoju (krivulja 4). Da dobijemo ukupnu toplinu u rotorskom namotu, treba ordinate krivulje 3 množiti sa t_1/T (krivulja 3'), a ordinate krivulje 4 sa t_2/T (krivulja 4'). Ovako određene vrijednosti zbrojimo, pa dobivamo krivulju 5. Tamo gdje krivulja 5 siječe vrijednost gubitaka u namotu rotora pri nazivnom pogonu (tačka A), očitamo vrijeme t_1 , i odredimo gubitke P_{Fe} , P_{Cu1} odnosno uzbudne struje i_{A0} i i_{Ak} s kojima treba izvršiti zagrijavanje.

3.8.8 Mjerenje protoka vode. U slučaju pristupačnog ispusta rashladne vode iz stroja najjednostavnije mjerenje protoka sastoji se u punjenju posude određenog volumena V uz istovremeno mjerenje vremena t stop urom. Količina vode u minuti izračunava se odatle kao :

$$V_k = \frac{V}{t} \cdot 60 \quad (m^3/min)$$



Sl.3-92



Sl.3-93

Ako nema mogućnosti da se rashladna voda ispušta na pristupačnom mjestu, ili bi to promijenilo prilike cirkulacije vode, moramo na pogodnom mjestu u cjevovod ubaciti dio cijevi s ugrađenim mjerilom količine tekućine. Vrsta mjerila ovisi o količini vode koju mjerimo. Kod malih količina to su instrumenti, koji pomicanjem klipa cilindra ili okretanjem rotora s pregradama registriraju protok. Kod većih količina mjerimo s pomoću Venturi-cijevi (sl.3-93). Ove

mjereno bazira se na promjeni pritiska pri promjeni brzine strujanja. Za presjeke 1 i 2 koji neka iznose S_1 i S_2 , Bernoullieva jednadžba glasi :

$$p_1 + \frac{\gamma v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\gamma v_2^2}{2} \quad (1)$$

gdje je p = pritisak u N/m^2

γ = specifična masa u kg/m^3

v = brzina u m/s

Pošto je strujanje kontinuirano, vrijedi :

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 \quad (2)$$

Što uvršteno u (1) daje :

$$p_2 - p_1 = \frac{\gamma}{2} \left(1 - \frac{S_1^2}{S_2^2} \right) v_1^2 \quad (3)$$

Iz mjerene razlike pritiska na manometru može se dakle izračunati brzina :

$$v_1 = \sqrt{\frac{2}{\gamma} \cdot \frac{1}{1-m^2}} \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (4)$$

gdje je m označen omjer manjeg i većeg presjeka. U praksi se pritisci obično izražavaju odgovarajućom visinom stupca vode u mm, pri čemu vrijedi :

$$1 \text{ mm s. v.} = 9,81 \text{ N/m}^2 \quad (5)$$

tako da izraz (4) uz $\Delta p'$ u mm s.v. i uz $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$ glasi :

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81}{1000(1-m^2)}} \cdot \sqrt{\Delta p'} = K \cdot \sqrt{\Delta p} \quad (6)$$

a količina vode u m^3/min može se odatle izračunati :

$$V_1 = 60 \cdot v_1 \cdot S_1 = K_1 \sqrt{\Delta p'} \quad (7)$$

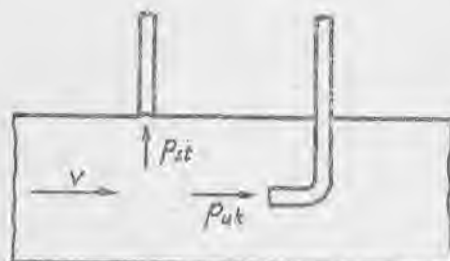
Najpogodnije je odrediti konstantu K_1 baždarenjem prije ugradnje Venturi-cijevi.

Slično se može mjeriti u većim presjecima ugradnjom zaslona, koji je izbaždaren tako, da mjerenjem razlike pritiska neposredno ispred i iza zaslona odredjujemo protok. Za vrlo velike količine vode, kao npr. kod mjerenja protoka turbine, ugrađuju se u cjevovod na mnogo mjesta tzv. Woltman-ova krila, tj. precizne tačno baždarene sprave u obliku vijka, koji se okreće u struji vode, i električkim impulsima signalizira lokalnu brzinu. Iz ovih podataka računa se srednja brzina koja pomnožena presjekom daje protok.

3.8.9 Mjerenje količine rashladnog zraka. Mjerenje količine rashladnog zraka svodi se na mjerenje brzine strujanja na više mjesta jednog te istog presjeka. Presjek se u tu svrhu podijeli tankim nitima, i ozna-



Sl.3-94



Sl.3-95

či npr. prema sl. 3-94. Mjerenje brzine zraka u sredini svakog polja daje srednju brzinu :

$$v_{sr} = \frac{\sum v}{n} \quad (1)$$

gdje je n ukupni broj polja, dok je količina rashladnog zraka u m^3/min pri ukupnom presjeku S jednaka :

$$V_k = 60 \cdot v_{sr} \cdot S \quad (2)$$

Da bi se ovakovo mjerenje moglo provesti, potreban je duži ravni dio ventilacionog kanala bez promjena presjeka, kako bi imali sredjeno strujanje.

Mjerenje brzine zraka vršimo direktno anemometrima, ili indirektno mjerenjem dinamičkog pritiska.

Anemometri su sprave, koje omogućuju direktno očitavanje brzine zraka. Anemometri s lopaticama imaju po obodu polukuglaste lopatice, i postavljaju se tako, da je os rotacije okomita na smjer strujanja. Anemometri s krilcima postavljaju se s osi rotacije u smjer strujanja. U jednom i u drugom slučaju vrtnja rotora se prenosi na brojilo, koje se može uključiti i isključiti, a pokazuje direktno, ili s pomoću krivulje baždarenja, put struje zraka s kroz anemometar u metrima. Podijeljen sa vremenom uključivanja t ovaj put određuje brzinu zraka :

$$v = s/t \quad (3)$$

Anemometri, a osobito onaj s krilcima, mehanički su vrlo osjetljivi, pa treba paziti, da se ne upotrebe pri brzini strujanja većoj od cca 10 m/s (s krilcima), odnosno cca 50 m/s (s lopaticama).

Anemometar s vrućom žicom mnogo je manjih dimenzija. Otporna žica se grije električki, a odvod topline, i prema tome temperatura žice, ovise o brzini kojom struji zrak oko žice. Mjerenjem temperature žice dobivamo preko krivulja baždarenja brzinu zraka.

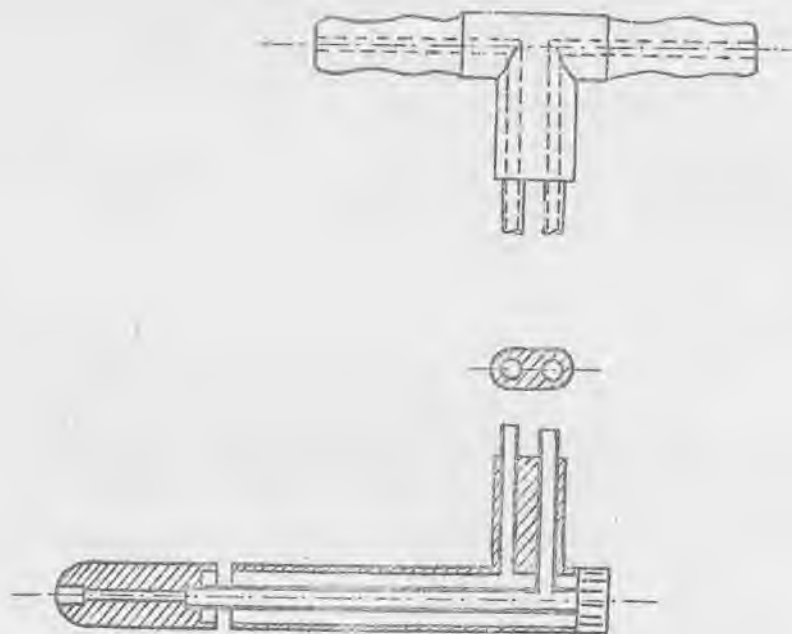
Indirektno odredjujemo brzinu strujanja mjerenjem pritiska. Mjerenje pritiska i inače je važno za proučavanje prilika strujanja rashladnog zraka kroz stroj. Treba pri tome razlikovati statički pritisak, koji djeluje na otvor priključenog manometra, uz koji zrak slobodno struji, i ukupni pritisak, koji djeluje na otvor manometra postavljen okomito nasuprot smjeru strujanja (sl.3-95). Ovaj pritisak je veći od statičkoga, jer se na otvoru manometra strujanje zaustavlja, i kinetička energija zraka pretvara u tlačnu energiju, kojoj odgovara "dinamički pritisak" p_d :

$$p_d = \frac{\rho v^2}{2} \quad (4)$$

Ukupni je pritisak zbroj statičkog i dinamičkog pritiska :

$$p_{uk} = p_{st} + p_d \quad (5)$$

Mjerenje izvodimo tzv. Prandtl-ovom cijevi (sl.3-96). Otvor na čeo-
noj strani cijevi mjeri ukupni pritisak, a otvori sa strane statički pritisak. Na dva otvora može se zasebno priključiti manometre za



Sl.3-96

p_{uk} i p_{st} , ili diferencijalni manometar, koji odmah pokazuje razliku :

$$p_{uk} - p_{st} = p_d \quad (6)$$

Obično se upotrebljavaju tekućinski manometri s alkoholom. Za vrlo male pritiske uzima se mikromanometar, s jednim krakom nagnutim za 1 : 8 do 1 : 30, što povećava dužinu očitavanja kod iste visinske razlike. Ako je očitana visina h , onda je pritisak u mm s.v.

$$p' = h \cdot \frac{\rho_m}{\rho} \quad (\text{mm s.v.}) \quad (7)$$

gdje je γ_m = specifična masa tekućine u manometru
 γ_v = specifična masa vode

Pošto je 1 mm s.v. = 9,81 N/m², to pritisak u N/m² iznosi :

$$p = 9,81 \cdot p' = 9,81 \cdot \frac{\gamma_m}{\gamma_v} \cdot h \quad \left(\frac{N}{m^2} \right) \quad (8)$$

Brzina zraka slijedi iz dinamičkog pritiska prema (4) :

$$v = \sqrt{\frac{2p_d}{\gamma}} = \sqrt{\frac{2gp'_d}{\gamma}} \quad (9)$$

Specifična masa zraka kod 20 °C i barometarskog pritiska od 1 apsolutne atmosfere (= 736 mm stupca žive) iznosi :

$$\gamma_0 = 1,116 \text{ kg/m}^3$$

Kod temperature ϑ i barometarskog pritiska b (mm s.ž.) biti će :

$$\gamma = \gamma_0 \cdot \frac{273 + 20}{273 + \vartheta} \cdot \frac{b}{736} \quad (10)$$

pa treba računati s ovako korigiranom vrijednošću. Kad uvrstimo sve konstante, dobivamo za brzinu izraz :

$$v = K \cdot \sqrt{h} \quad (11)$$

gdje je :

$$K = \sqrt{\frac{\gamma_m}{\gamma_v} \cdot \frac{2g}{\gamma_0} \cdot \frac{273 + \vartheta}{293} \cdot \frac{736}{b}} \quad (12)$$

Analogno se može Prandtlovom cijevi mjeriti i brzina tekućine. Metoda nije prikladna za uske cijevi i kanale, jer odviše remeti strujanje.

3.8.10 Kontrola rezultata. Količinu rashladne vode i rashladnog zraka propisuje projekt generatora. Odredimo ukupne gubitke iz korisnosti;

$$\eta = \frac{P_g}{P_n + P_g} \cdot 100 \quad (\%) \quad (1)$$

$$P_g = P_n \cdot \frac{100 - \eta}{\eta} \quad (2)$$

Pošto je 1 kWs = 0,239 kcal, to gubicima P_g (kW) odgovara toplina;

$$Q = P_g \cdot 0,239 \quad (\text{kcal/s}) \quad (3)$$

Ako je specifična toplina rashladnog sredstva jednaka c ($\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$), specifična masa γ (kg/m^3), a količina u minuti V_1 (m^3/min),

bit će prirast temperature rashladnog sredstva određen jednačinom:

$$Q = c \cdot \dot{V} \cdot \frac{V_1}{60} \cdot \Delta t \quad (4)$$

Za zrak kod 20°C i 760 mm s.ž. imamo :

$$c = 0,241 \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \right), \quad \dot{V} = 1,21 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

pa slijedi :

$$V_1 \cong \frac{P_g}{\Delta t} \cdot 50 \text{ (m}^3\text{/min)} \quad (5)$$

Na taj način može se iz prirasta temperature Δt uz poznate gubitke P_g (kW) ocijeniti količina rashladnog zraka. U stvari jedan dio gubitaka odlazi iz stroja direktno preko kućišta i temelja, i ne zagrijava rashladni zrak, pa izraz (5) daje nešto prevelike vrijednosti za V_1 .

Na isti način može se ocijeniti i količina rashladne vode. Uz $c = 1$ (kcal/kg, $^\circ\text{C}$), i $\dot{V} = 1000$ (kg/m³) izlazi :

$$V_1 \cong \frac{P_g}{\Delta t} \cdot 14,3 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^3\text{/min)} \quad (6)$$

Za uljno hladjenje ležajeva vrijedi slično :

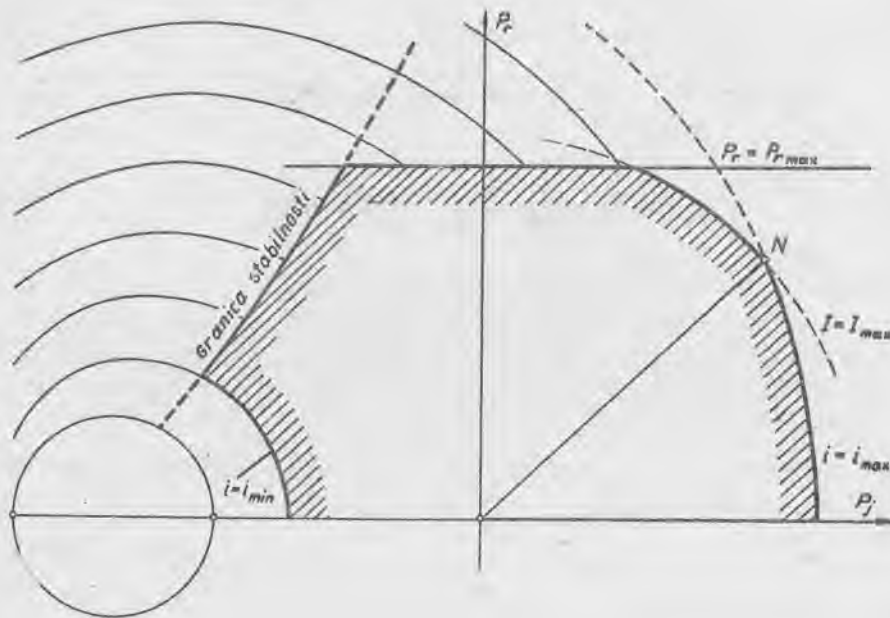
$$V_1 \cong \frac{P_g}{\Delta t} \cdot 35 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^3\text{/min)} \quad (7)$$

Obično se računa s prirastom temperature rashladnog zraka od $14-18^\circ$ čemu odgovara količina od 3 do $3,5\text{ m}^3\text{/min}$ po svakom kW gubitaka koje treba odvesti. Za rashladnu vodu uzima se prirast $4\text{ do }5^\circ$, pa je potreban protok 3 do $3,5\text{ l/min}$ po svakom kW gubitaka.

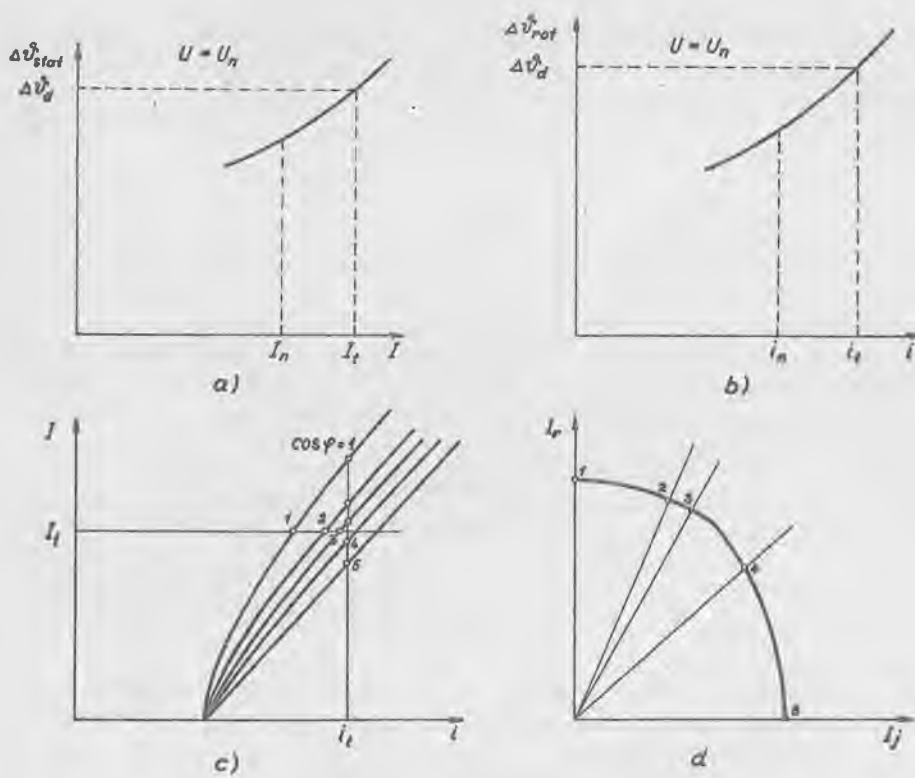
Pad statičkog pritiska u stroju, koji je potreban za svladavanje otpora strujanja, iznosi oko 30 do 50 mm s.v. , a kod intenzivno ventiliranih strojeva i do 120 mm s.v.

3.8.11 Pogonski dijagram. Područje rada sinhronog stroja ograničeno je maksimalnom snagom, koju može dati pogonski stroj, minimalnom uzbudnom strujom, koja se daje regulatorom udesiti, praktičkom granicom stabilnosti, maksimalnom strujom statora i maksimalnom strujom rotora, koje su dopuštene obzirom na zagrijavanje. Ako ova ograničenja prikažemo u koordinatnom sistemu radne i jalove snage, dobivamo tzv. pogonski dijagram prema sl.3-97. Rad stroja mora se odvijati uvijek unutar šrafiranog područja.

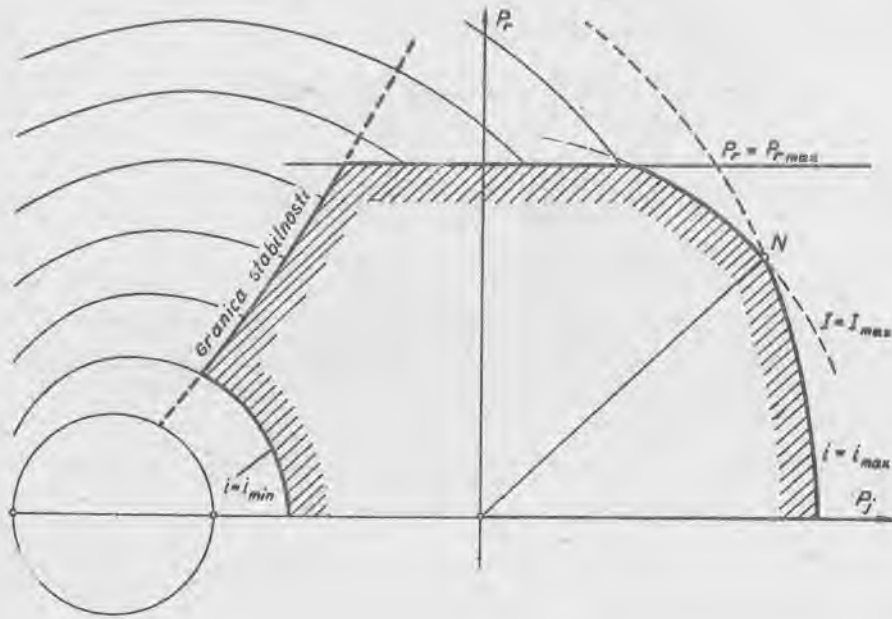
Potpuno iskorišten stroj postići će i u statoru i u rotoru zagrijavanje, koje je blizu dopuštene granice, pri nazivnom opterećenju. Tačka N na sl.3-97 odgovarala bi u tom slučaju nazivnoj struji statora i nazivnoj struji rotora. Ako se pokaže znatnija rezerva u zagrijavanju statora ili rotora, mogu se stvarne granice zagrijavanja unijeti u dijagram na osnovu dodatnih mjerenja. Pri tome se obično može uzeti, da gubici statora ne utječu mnogo na zagrijavanje rotora i obrnuto. U tom slučaju je dovoljno odrediti termički dopuštenu struju statora I_t (sl.3-98a), i rotora i_t (sl.3-98b). Ove struje unesemo kao dva pravca u dijagram s krivuljama regulacije (sl.3-98c). Tačke 1, 2, 3 određene su sjecištem pravca maksimalne termičke



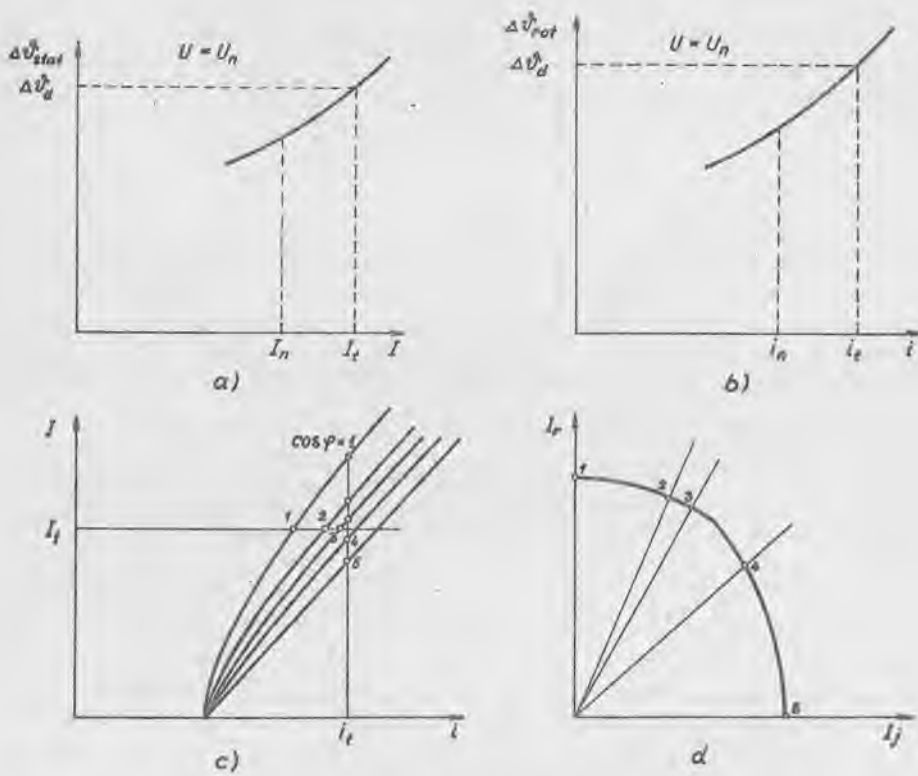
Sl. 3-97



Sl. 3-98



Sl. 3-97



Sl. 3-98

struje statora s krivuljama za $\cos \varphi = 1; 0,95; 0,9$, dok su tačke 4, 5 određene sjecištem pravca maksimalne termičke struje rotora s krivuljama za $\cos \varphi = 0,7; 0$. Potrebno je samo prebaciti vrijednost struje I pod odgovarajućim kutom φ u dijagram radne i jalove struje (sl.3-98d). Pomnoženo s $U \cdot \sqrt{3}$ to daje granične krivulje u dijagramu snage. Mjesto krivulja regulacije mogu se koristiti i V-krivulje. Kad bi htjeli uvažiti međusobni utjecaj zagrijanja statora i rotora, trebalo bi termičku maksimalnu struju za svaki $\cos \varphi$ tražiti posebnim mjerenjem uz $\cos \varphi = \text{konst.}$ Interpolacijom iz bar 2 mjerenja trebalo bi svaki puta odrediti maksimalnu struju statora - ako je rotor još ispod dopuštenog zagrijanja - ili rotora - ako je stator manje zagrijan.

3.9 Gubici i korisnost

Kod svake pretvorbe energije nastaju veći ili manji gubici. Zbog toga je snaga koju stroj predaje uvijek manja od snage koju stroj prima, i to upravo za iznos ukupnih gubitaka. Što su gubici manji, to je stroj savršeniji, to veći dio primljene energije pretvara u korisnu predanu energiju. Mjerilo za kvalitetu stroja u pogledu gubitaka predstavlja omjer predane i primljene snage, koji nazivamo korisnost.

3.9.1 Metode odredjivanja korisnosti. Motor prima električku snagu, a predaje mehaničku, dok generator prima mehaničku, a predaje električku snagu. U oba slučaja vrijedi :

$$P_1 = P_2 + P_g \quad (1)$$

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

$$\eta = P_2 / P_1 \quad (3)$$

gdje je P_1 = primljena snaga, P_2 = predana snaga, η = korisnost. Kako je, međjutim, uvijek zgodnije mjeriti električku snagu nego mehaničku, uvrstavamo u izraz (3) mehaničku snagu izraženu s pomoću električke i gubitaka. Kod motora to glasi :

$$\eta = \frac{P_1 - P_g}{P_1} = 1 - \frac{P_g}{P_1} \quad (4)$$

a kod generatora :

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_g} = 1 - \frac{P_g}{P_2 + P_g} \quad (5)$$

Razlikujemo direktnu i indirektnu metodu odredjivanja korisnosti. Kod direktne metode mjerimo primljenu snagu P_1 i predanu snagu P_2 direktno. Ako se radi o motoru, treba mjeriti predanu mehaničku snagu na osovini kočnicom, ako se radi o generatoru, potreban je baždareni pogonski stroj, kako bi mogli mjeriti snagu koju generatoru dovodimo na osovini. Indirektnom metodom odredjujemo mjerenjem samo jednu od

obe snage, P_1 ili P_2 - onu, koja je pristupačnija mjerenju - te odredjujemo gubitke stroja P . Prema načinu kojim odredjujemo gubitke P razlikujemo metodu određivanja ukupnih gubitaka, i metodu određivanja pojedinačnih gubitaka. Kod prve metode ukupne gubitke odredjujemo jednim mjerenjem, dok kod druge odredjujemo pojedinačno različite gubitke u nekoliko mjerenja, pa ih na kraju sumiramo.

Za određivanje ukupnih gubitaka raspolažemo različitim metodama. Metoda povratnog rada opisana je u 3.8.6 (sl.3-9c). Potrebno je mjeriti snagu, koju pogonski motor uzima iz mreže u slučaju a), odnosno koju agregat uzima iz mreže u slučaju b). Ta snaga jednaka je gubicima obaju strojeva. Strojewe treba tako uzbuđiti, da gubici u željezu budu u jednom stroju toliko veći od onih za nazivni pogon, koliko su u drugome manji. Isto vrijedi i za struje. Uzbudni gubici odredjuju se zasebno iz podataka uzbudnog kruga.

Ukupni gubici mogu se mjeriti i metodom preuzbude ili poduzbude, koja je takodjer opisana u 3.8.6. Napon mreže mora biti takav, da inducirani napon u stroju, a time i gubici u željezu, budu kao u nazivnom pogonu.

Možemo, napokon, odrediti ukupne gubitke iz zagrijavanja rashladnog sredstva, ako je poznata količina rashladnog sredstva, prema računu iz 3.8.10. Ovaj postupak, nazvan kalorimetričkom metodom, bit će razmotren zasebno u 3.9.5.

Ako usporedimo direktnu i indirektnu metodu u pogledu tačnosti, možemo zaključiti slijedeće:

a) kod direktne metode određivanja korisnosti se svodi na izraz

$$\eta_{mj} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)_{mj} = \frac{P_2 (1 \pm \sigma_2)}{P_1 (1 \pm \sigma_1)} = \eta (1 \pm \sigma_1 \pm \sigma_2) \quad (6)$$

b) kod indirektno metode određuje se korisnost prema izrazu :

$$\begin{aligned} \eta_{mj} &= 1 - \left(\frac{P_g}{P_1} \right)_{mj} = 1 - \frac{P_g (1 \pm \sigma_g)}{P_1 (1 \pm \sigma_1)} = 1 - (1 - \eta) (1 \pm \sigma_1 \pm \sigma_g) = \\ &= \eta \left[1 + \frac{1 - \eta}{\eta} (\pm \sigma_1 \pm \sigma_g) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Odstupanje mjerene vrijednosti η_{mj} od stvarne vrijednosti η izraženo s pomoću relativnih pogrešaka mjerenja σ_1 , σ_g , iznosi

a) kod direktne metode :

$$\frac{\eta_{mj} - \eta}{\eta} = \pm \sigma_1 \pm \sigma_2 = \sigma_a \quad (8)$$

b) kod indirektno metode :

$$\frac{\eta_{mj} - \eta}{\eta} = \frac{1 - \eta}{\eta} (\pm \sigma_1 \pm \sigma_g) = \frac{1 - \eta}{\eta} \cdot \sigma_b \quad (9)$$

Indirektna metoda biti će tačnija od direktne metode onda, kad bude :

$$\frac{1-\eta}{\eta} \cdot d_b < d_a$$

$$\eta > \frac{d_b}{d_a + d_b} \quad (10)$$

Ako uzmemo kod direktne metode vrlo precizne instrumente, možemo mjeriti električku snagu sa 0,5 % tačnosti, dok mehaničku snagu teško možemo odrediti tačnije od 1 do 1,5 %. Uz te vrijednosti biti će dakle :

$$d_a \approx 0,5 + 1,5 = 2 \%$$

Ako pri indirektnom određivanju korisnosti dopustimo daleko manju tačnost od, recimo, $d_g = 10 \%$, uz $d_a = 0,5 \%$, biti će :

$$d_b \approx 10,5 \%$$

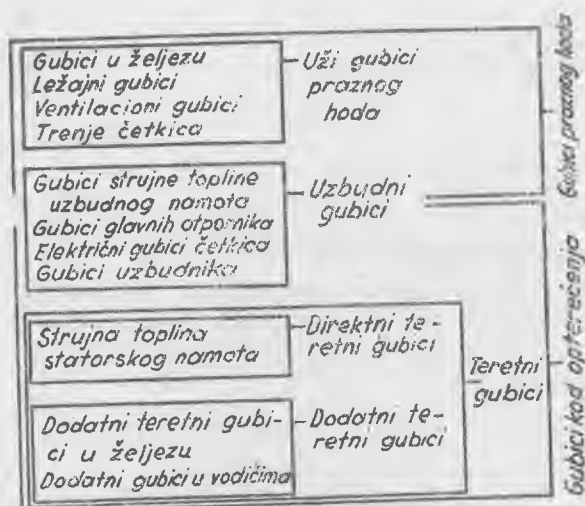
tako da će granica, iznad koje je indirektna metoda tačnija, biti :

$$\eta \geq \frac{10,5}{10,5 + 2} \approx 0,85$$

Pošto se i kod indirektna metode obično postiže veća tačnost od 10 %, ležati će ta granica još i niže, a to znači da će kod icle većeg stroja indirektna metoda davati tačnije rezultate. Što je veća korisnost η , to je veća i prednost indirektna metode.

Odredjivanje pojedinačnih gubitaka obrađeno je u 3.9.3 i 3.9.4.

3.9.2 Podjela gubitaka sinhronog stroja. Već u praznom hodu nastaju u sinhronom stroju gubici, koji se mogu podijeliti na tzv. uže gubitke praznog hoda i na uzbudne gubitke praznog hoda. Uži gubici praznog hoda obuhvaćaju gubitke u željezu zbog kretanja magnetskog toka u praznom hodu, zatim ventilacione gubitke, te gubitke trenja u ležajima, kao i trenja četkica. Uzbudni gubici praznog hoda manji su od uzbudnih gubitaka pri opterećenju, jer je u praznom hodu uzbudna struja manja. Svi ovi gubici zajedno zovu se gubici praznog hoda. Kod opterećenja pridolaze k tome tzv. teretni gubici, tj. svi gubici, koje uzrokuje struja u namotu statora, a uzbudni gubici se povećavaju. Razlika nazivnih uzbudnih gubitaka i uzbudnih gubitaka praznog hoda ubraja se u gubitke kod opterećenja. Teretni gubici dijele se na direktne teretne gubitke, tj. one koji slijede množenjem kvadrata struje i otpora izmjerenog istosmjernom strujom, i na dodatne teretne gubitke. Ovi posljednji obuhvaćaju dodatne teretne gubitke u željezu, koji se pojavljuju uslijed rasipnih polja, koja se stvaraju kad u statoru teku struje, i dodatne gubitke u vodičima uslijed toga što su struje u statoru izmjenične, pa dolazi do potiskivanja. Uzbudni gubici obuhvaćaju gubitke strujne topline u uzbudnom namotu, gubitke u glavnim otpornicima, tj. u otpornicima u glavnom



Sl. 3-99

uzbudnom krugu, električne gubitke četkica, i gubitke uzbuđnika. Svi ovi gubici ovise o veličini uzbuđne struje. Teretni gubici ovise o veličini struje opterećenja. Uži gubici praznog hoda ovise dijelom o visini induciranog napona (gubici u željezu), a dijelom su za sinhronu brzinu konstantni (svi ostali gubici). Podjela gubitaka sinhronog stroja vidi se na sl.3-99.

3.9.3 Odredjivanje pojedinačnih gubitaka. Uže gubitke praznog hoda odredjujemo mjerenjem u praznom hodu (vidi 3.3.3). Ovo mjerenje omogućuje nam i odvajanje gubitaka u željezu od ostalih užih gubitaka praznog hoda. Kod odredjivanja korisnosti treba uzeti u račun gubitke pri nazivnoj brzini vrtnje i nazivnom naponu na stezaljkama.

Gubici trenja u ležajima ubrajaju se u račun korisnosti η samo onda, ako su ležaji isporučeni sa strojem, i služe samo stroju. Ako je ležaj zajednički npr. za pogonsku turbinu i stroj, ili za sinhroni motor i tjerani stroj, onda se gubici u ležaju navode odvojeno, a ne uračunavaju se kod odredjivanja korisnosti. Ventilacioni gubici obuhvaćaju gubitke trenja zraka i ventilacije samog stroja i eventualno uzbuđnika na istoj osovini, a takodjer i gubitka dodatne ventilacije iz posebnog izvora, ako ona služi samo za taj stroj. Ako je stroj priključen na zajedničku ventilaciju, onda se u njegove gubitke ne broje gubici stranog ventilatora, kao ni gubici u vanjskim kanalima.

Gubici trenja četkica obuhvaćaju i četkice uzbuđnika na istoj osovini. Uzbuđne gubitke izračunavamo na osnovu izmjerenih otpora i provedenog baždarenja uzbuđnika. Gubitke strujne topline uzbuđenog namota računamo

$$P_{cu} = i^2 \cdot R_u$$

(1)

gdje je i = uzbudna struja za promatrano opterećenje
 R_u = otpor uzbuđnog namota preračunat na 75°C . Slično računamo i gubitke glavnog otpornika, pri čemu treba uzeti onaj dio otpora, koji je uključen u strujni krug u promatranom pogonskom stanju.

Električne gubitke četkica uzimamo u račun sa :

$$P_c = i \cdot 2 \cdot \Delta u \quad (2)$$

gdje je pad napona na četkici :

$$\begin{aligned} \Delta u &= 1 \quad \text{V za ugljene i grafitne četkice} \\ \Delta u &= 0,3 \quad \text{V za metalno-grafitne četkice.} \end{aligned}$$

Sve ove gubitke možemo odrediti i direktnim mjerenjem kao :

$$P_{Cu2} + P_{R_{91}} + P_c = u \cdot i \quad (3)$$

gdje je u = napon na stezaljkama uzbuđnika
 i = uzbudna struja.

Gubitke uzbuđnika treba uračunati samo u slučaju tzv. vlastite uzbuđbe, tj. kad je uzbuđnik na istoj osovinu ili direktno vezan s generatorom, a služi isključivo za uzbuđbu tog generatora. Kod nezavisne uzbuđbe, tj. uzbuđbe iz bilo kojeg izvora, koji nije vezan s generatorom, gubici izvora se ne uračunavaju u uzbuđne gubitke. Obično određujemo gubitke uzbuđnika baždarenjem prije spajanja s glavnim strojem. Od ukupnih gubitaka uzbuđnika treba odbiti gubitke trenja i ventilacije, koji su uključeni kod određivanja užih gubitaka praznog hoda čitave jedinice. Isto vrijedi i za pomoćni uzbuđnik. Ako ne možemo zasebno izmjeriti gubitke na uzbuđniku, provodimo mjerenje gubitaka čitave jedinice u praznom hodu prema 3.3.4 ili 3.3.5, s time, da sinhroni stroj uzbuđimo iz stranog izvora, a uzbuđnik jedamput opteretimo nazivnom strujom, a drugi puta ostavimo neuzbuđjen. Razlika izmjerenih gubitaka u prvom i drugom slučaju daje uzbuđne gubitke, uključivši i gubitke uzbuđnika. Teretne gubitke određujemo sve zajedno - direktne i dodatne - mjerenjem gubitaka u kratkom spoju pri nazivnoj struji, i odbijanjem gubitaka trenja i ventilacije. Pošto direktni teretni gubici rastu, a dodatni padaju s temperaturom, možemo uzeti, da su ukupni teretni gubici neovisni o temperaturi, i nije potrebno nikakovo preračunavanje mjerenih vrijednosti na pogonski toplo stanje. Ako se direktni teretni gubici navode zasebno, onda treba navesti vrijednost koja odgovara temperaturi 75°C .

3.9.4 Odredjivanje gubitaka iz pokusa zaustavljanja. Kako je pokazano u 3.6.3, pokus zaustavljanja daje nam vezu između gubitaka, koji koše stroj, i njegovog zamašnog momenta mD^2 :

$$P_{koš} (kW) = \frac{mD^2}{365000} \cdot \frac{n_a^2}{T} \quad (1)$$

Pošto nas zanimaju gubici upravo pri sinhronoj brzini n_B , treba

zaustavljanje početi od nešto više brzine, kako bi se mogla povući tangenta i odrediti fiktivno trajanje zaustavljanja upravo pri brzini n_s . Ako je zamašni moment mD^2 poznat, npr. iz proračuna na osnovu konstruktivnih nacрта, mogu se izračunati gubici $P_{koš}$. Zaustavljanje se može provesti pri različitim pogonskim stanjima, tako npr.:

- a) u praznom hodu s neuzbudjenim strojem = gubici $P_{koš} = P_{trv}$
- b) u praznom hodu s uzbudjenim strojem
(uzbuda iz stranog izvora) = gubici $P_{Fe} + P_{trv}$
- c) u praznom hodu bez uzbude, s uzbudnikom opterećenim nazivnim opterećenjem na vanjski otpor = gubici $P_{trv} + P_u$
- d) u kratkom spoju pri nazivnoj struji = gubici $P_{trv} + P_t$

gdje su P_{trv} = gubici trenja i ventilacije
 P_{Fe} = gubici u željezu
 P_u = uzbudni gubici
 P_t = teretni gubici

Za svaki od ovih pokusa dobiti ćemo drugačije fiktivno trajanje zaustavljanja T . Pošto je mD^2 konstanta, a brzina n_s bila je kod svih pokusa ista, slijedi iz izraza (1) :

$$P_a : P_b : P_c : P_d = \frac{1}{T_a} : \frac{1}{T_b} : \frac{1}{T_c} : \frac{1}{T_d} \quad (2)$$

Čim smo odredili ma koje od gubitaka, možemo sve ostale jednostavno izračunati iz recipročnog omjera vremena T :

$$\frac{P_m}{P_n} = \frac{T_n}{T_m} \quad (3)$$

Najjednostavnije je mjerenjem u motorskom pogonu odrediti gubitke pod b) . Sve ostale gubitke možemo onda odrediti iz pokusa zaustavljanja, a da čak ne izračunavamo ni mD^2 . Pojedine gubitke dobivamo na osnovu tih pokusa kao :

$$P_{Fe} = P_b - P_a \quad (4)$$

$$P_{trv} = P_a \quad (5)$$

$$P_u = P_c - P_a \quad (6)$$

$$P_t = P_d - P_a \quad (7)$$

Razradu pokusa zaustavljanja možemo izvršiti za različite brzine. Tako možemo odrediti gubitke trenja i ventilacije u ovisnosti o brzini

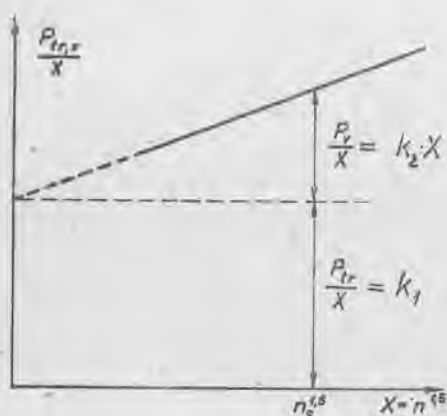
vrtnje $P_{tr,v} = f(n)$ što nam omogućuje da odvojimo gubitke trenja od gubitaka ventilacije. Poznato je da gubici trenja rastu približno s $\sqrt{n^3}$, a gubici ventilacije s n^3 , tako da su ukupni gubici:

$$P_{tr,v} = k_1 \cdot n^{1,5} + k_2 \cdot n^3 \quad (8)$$

Ovaj izraz možemo pisati i :

$$\frac{P_{tr,v}}{X} = k_1 + k_2 \cdot X \quad (9)$$

gdje je $X = n^{1,5}$. Ako ucrtamo vrijednosti $\frac{P_{tr,v}}{n^{1,5}}$ u ovisnosti o $n^{1,5}$ (sl.3-100), dobivamo konstante k_1 i k_2 , pa možemo



Sl.3-100

odvojiti gubitke trenja i gubitke ventilacije pri nazivnoj brzini. Ovo odvajanje je od interesa tamo, gdje treba zasebno citirati gubitke u ležajima.

3.9.5. Kalorimetrička metoda određivanja gubitaka. Kod velikih generatora s vodnom turbinom često se ne može sastaviti stroj prije postavljanja u elektrani, pa nema mogućnosti da se izmjere gubici u tvornici. Ako se vodna turbina nalazi ispod nivoa donje vode, ne možemo odrediti gubitke iz pokusa

zaustavljanja, jer nisu poznati gubici trenja u vodi. Jedini način da se odrede gubici u takovom slučaju je tzv. kalorimetrička metoda, koja zaključuje na gubitke iz prirasta temperature rashladnog sredstva. Najpogodnije je mjeriti protok i prirast temperature rashladne vode (3.8.8 i 3.8.10). Prema izrazu (6) iz 3.8.10 mogu se odrediti gubici koje odvodi rashladna voda :

$$P_v = \frac{V_1 \cdot \Delta\vartheta \cdot 1000}{14,3} \quad (\text{kW}) \quad (1)$$

gdje je: V_1 = količina rashladne vode u m^3/min

$\Delta\vartheta$ = prirast temperature rashladne vode u hladnjaku.

Kako bi dobili veći prirast temperature, koji je lakše mjeriti, možemo smanjiti protok za vrijeme mjerenja.

Ako mjerimo količinu i prirast temperature rashladnog zraka u minuti izrazom (2) iz 3.8.9, te uvrstimo još (9) i (10) iz 3.8.9, dobivamo konačno izraz za gubitke koje odvodi ventilacioni zrak :

$$P_v = 0,816 \cdot S \cdot \sqrt{\frac{P' \cdot P_d'}{273 + \vartheta}} \cdot \Delta\vartheta \quad (\text{kW}) \quad (2)$$

gdje znači : S = presjek ventilacionog kanala u m^2

P' = statički pritisak na mjestu mjerenja u mm s.v.

- p'_d = dinamički pritisak u mm s.v.
 ϑ = temperatura zraka u presjeku mjerenja u $^{\circ}\text{C}$
 $\Delta\vartheta$ = razlika temperature na ulazu i izlazu rashladnog zraka, tj. prirast temperature rashladnog zraka uslijed gubitaka. u stroju.

Ventilacioni zrak odnosno rashladna voda ne odvođe sve gubitke stroja. Jedan dio gubitaka, P_{ok} , odlazi direktno na okolinu, bilo da prelazi s kućišta stroja na okolni zrak, bilo da prelazi na temelje, turbinu i slično. Osim toga, gubici uzбудnika obično se odvođe direktno u strojarnicu, a gubici u ležajima odvođe se dijelom preko ulja, a dijelom direktno na okolinu. Ukupni su gubici prema tome :

$$P_g = P_v + P_{ok} + P_u + P_l \quad (3)$$

Mjerenje rashladnog sredstva daje nam samo gubitke P_v . Gubitke P_{ok} treba ocijeniti, pri čemu se uzima, da svaka površina predaje oko $10 \text{ W}/^{\circ}\text{C}, \text{m}^2$. Uzbudni gubici P_u se mogu odrediti zasebnim ispitivanjem uzбудnika u tvornici. Gubitke u ležajima P_l odredjujemo prema (7) iz 3.8.9, no ovako odredjenim gubicima koje odvođi ulje dodajemo još po $10 \text{ W}/^{\circ}\text{C}, \text{m}^2$ kao gubitke ležaja koji direktno prelaze na zrak.

Ovakovo mjerenje spojeno je s poteškoćama odredjivanja količine rashladnog sredstva, pogotovo zraka, dok je mjerenje zagrijanja rashladne vode nepouzđano, jer je prirast temperature obično malen. Može se, međjutim, izbjeći mjerenje količine rashladnog sredstva, pa čak površ toga odrediti mjerenjem gubitke koji prelaze direktno na okolinu P_{ok} , ako se poslužimo tzv. poredbenom metodom. U krug rashladnog zraka postavimo grijače. Snagu koju dovodimo grijačima tačno mjerimo vatmetrom, a uz to mjerimo prirast temperature rashladnog zraka. Taj prirast pomnožen nekom konstantom K daje snagu, koju rashladni zrak odvođi u hladnjak, dok razlika temperature kućišta i strojarnice $\Delta\vartheta$ pomnožena nekom konstantom K_0 daje snagu koja prelazi s kućišta na okolinu P_{ok} . Provedemo li sada 2 mjerenja s različitim snagama P_1 i P_2 , koje smo tačno izmjerili, i izmjerimo pripadna zagrijanja zraka $\Delta\vartheta_1$, $\Delta\vartheta_2$, možemo pisati :

$$\begin{aligned} P_1 &= K \cdot \Delta\vartheta_1 + P_{ok} \\ P_2 &= K \cdot \Delta\vartheta_2 + P_{ok} \end{aligned} \quad (4)$$

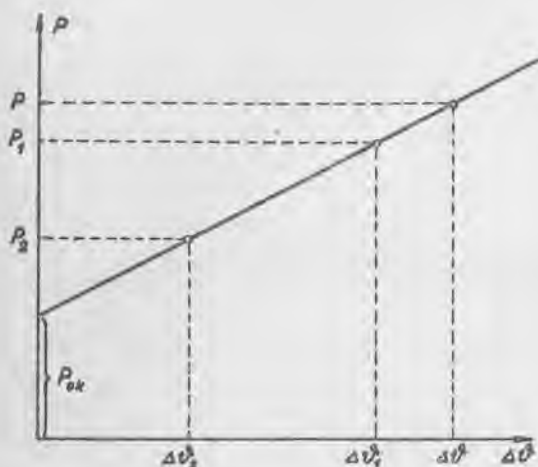
Odavle slijedi:

$$K = \frac{P_1 - P_2}{\Delta\vartheta_1 - \Delta\vartheta_2} \quad (6)$$

$$P_{ok} = \frac{\Delta\vartheta_1 P_2 - \Delta\vartheta_2 P_1}{\Delta\vartheta_1 - \Delta\vartheta_2} \quad (7)$$

Ovo "baždarenje" rashladnog kruga na osnovu dvaju poznatih mjerenja možemo razraditi i grafički prema sl.3-101. Ako sad provedemo pokus uz nazivno opterećenje stroja pri čemu tražimo ukupne gubitke P_g , pa izmjerimo prirast temperature zraka $\Delta\vartheta$, možemo očitati gubitke

$P = P_v + P_{ok}$ s dijagrama, ili ih možemo izračunati kao :



$$P_v + P_{ok} = K \cdot \Delta t + P_{ok} =$$

$$= \frac{P_1 - P_2}{\Delta t_1 - \Delta t_2} \cdot \Delta t + \frac{\Delta t_1 P_2 - \Delta t_2 P_1}{\Delta t_1 - \Delta t_2} \quad (8)$$

K tome treba još dodati uzbudne gubitke i gubitke u ležajima, kako je navedeno u izrazu (3) .

Sl. 3-101

Umjesto dovodjenja topline grijačima, možemo katkada izvršiti baždarenje iz dva pokusa u praznom hodu pri niskom i pri visokom naponu u motor-skom radu, ili iz pokusa sa $\cos \varphi = 0$. U svim tim slučajevima snagu treba mjeriti direktno vatmetrima.

Kod mjerenja dovedene topline grijačima P_1 i P_2 nisu obuhvaćeni ventilacioni gubici, koji ostaju u stroju. Oni ispadaju iz računa kod određivanja konstante K , ali utječu na određivanje P_{ok} . U slučaju da su ventilacioni gubici znatni, bolje je odrediti P_{ok} računicom na osnovu površine kućišta i njegove nadtemperature, kako je ranije navedeno.

Mjerenje prirasta temperature zraka može se najbolje izvršiti tako, da se postavi nekoliko u seriju spojenih termoelemenata po izlaznom presjeku hladnjaka, a nekoliko po ulaznom presjeku, pa se mjeri ukupna razlika napona. Može se upotrebiti i termootpornike u mosnom spoju, gdje grupa otpora na izlazu predstavlja jednu, a na ulazu drugu granu mosta. Pri mjerenju treba paziti, da termoelementi ili otpornici budu zaštićeni od direktnog isijavanja.