

mijeniti. Starije konstrukcije odvodnika imaju stakleno kućište napunjeno inertnim plinom, npr. dušikom. U novijim se odvodnicima primjenjuje specijalna epoksidna masa otporna prema utjecajima vanjske atmosfere; njome se zaliže unutrašnjost odvodnika. Postoje izvedbe odvodnika za istosmernu struju u kojima je iskrište smješteno u polju permanentnog magneta. Polje magnetsa produljuje luk i tako olakšava njegovo gašenje.

Osim ventilnih odvodnika prenapona upotrebljavaju se i *odvodnici sa izbjijanjem u plinu*. Obično se sastoje od iskrišta u staklenoj cjevčici napunjenoj plemenitim plinom. Paralelno s unutar-njim iskrištem spojeno je izvan cijevi vanjsko iskrište, koje djeluje pri većim prenaponima.

Utikači i pribor

Utikačke naprave i pribor za priključak vodova i kabela opisani su u članku *Električne instalacije*, str. 9.

V. Jurjević

LIT.: F. Kesseling, Theoretische Grundlagen zur Berechnung der Schaltgeräte, Berlin 1943. — A. Я. Бабиков, Основы электропароустройства, Москва 1946. — J. Saint Germain, Les appareils électriques connecteurs et déconnecteurs, Paris 1949. — H. W. Baxter, Electrical fuses. London 1950. — R. Rüdenberg, Elektrische Schaltvorgänge in geschlossenen Kreisen von Starkstromanlagen, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1953. — M. A. Babikov, Wichtige Bauteile elektrischer Apparate, Teil I (Theoretische Einführung), Berlin 1954. — W. Burstyn, Elektrische Kontakte und Schaltvorgänge, Berlin-Göttingen-Heidelberg 1956. — E. M. Цейров, Воздушные выключатели высокого напряжения, Москва - Ленинград 1957. — R. Holm, Electric contacts handbook, Berlin - Göttingen - Heidelberg 1958. — H. Franken, Schütze und Schützensteuerungen, Berlin - Göttingen 1959. — A. Mauduit, Installations électriques à haute et basse tension, tome II, Paris 1959. — R. Voigt, Elektrische Widerstände, Berlin 1959. — A. Keil, Werkstoffe für elektrische Kontakte, Berlin 1960. — Г. А. Кукков, Проектирование выключателей переменного тока высокого напряжения, Москва 1961. — H. Schulze, Technik der Wechselstrom-Hochspannungsschalter, Berlin 1961. — S. Dzierzbiński, Wysokonapięciowe aparaty łączeniowe, Warszawa 1962. — H. Franken, Motorschutz, Berlin 1962. — M. A. Бабиков, Электрические аппараты, част третья, Москва - Ленинград 1963. — А. М. Залесский, Электрическая дуга отключения, Москва - Ленинград 1963. — E. Slamecka, Prüfung von Hochspannungs - Leistungsschaltern, Berlin - Heidelberg - New York 1966. — Г. В. Буткевич, Дуговые процессы при коммутации электрических цепей, Москва 1967. — G. Hortopan, Aparate electrice, Bucureşti 1967. — T. Lipski, Bezpieczeństni niskonapięciowe, Warszawa 1968. — W. Kussy, Elektrische Niederspannungsschaltgeräte und Antriebe, Berlin 1969. — H. Franken, Niederspannungs-Leistungsschalter, Berlin 1970. — А. И. Голубев, Быстро действующие автоматические выключатели, Москва 1970. — Р. С. Кузнецов, Аппараты распределения электрической энергии на напряжение до 1000 в, Москва 1970.

B. Belin V. Jurjević

ELEKTRIČNI STROJEVI, naprave za pretvaranje energije jednog oblika u energiju drugog oblika posredovanjem mehaničkog (najčešće rotacionog) gibanja, pri čemu je bar jedan od oblika električna energija. Pretvaranje energije nije savršeno jer se sva energija koja se stroju dovodi ne može pretvoriti u drugi željeni oblik, ili se ne može sva iskoristiti za određenu svrhu. Korisna je energija ona koju stroj daje u želenom obliku. Razlika između dovedene i korisne energije jesu gubici. Redovito se gubici pojavljuju kao toplinska energija koja se predaje okolini i koja je prema tome izgubljena za dalje iskorишćenje.

Najčešće vrste pretvorbe energije iz jednog oblika u drugi navedene su u ovoj tablici, zajedno s vrstama električnih strojeva s pomoću kojih se izvode:

| Oblik dovedene energije | Oblik predane energije | Vrsta električnog stroja |
|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| električna | mehanička | električni motori |
| mehanička | električna | električni generatori |
| električna | električna | električni pretvarači |

Osim toga pripadaju električnim strojevima električni reduktori i spojke; energija se i njima dovodi i od njih uzima u obliku mehaničke energije, ali se u njima najprije mehanička energija pretvara u električnu, a zatim ova opet u mehaničku energiju.

Uredaji za pretvorbu energije bez posredovanja mehaničkog gibanja ne ubrajaju se među električne strojeve u užem smislu, unatoč tome što se pri pretvorbi s jedne i/ili druge strane javlja električna energija. Među takve naprave idu npr. transformatori, usmjerivači, akumulatori i baterije, uređaji za direktnu konverziju energije, itd. Postoji, međutim, čitav niz malih električnih naprava kojima nije svrha pretvaranje energije, već prenošenje podataka, analiza podataka, mjerjenje ili sl., a ipak se ubrajuju u električne strojeve jer su po izvedbi i načinu rada analogni električnim strojevima za pretvorbu energije.

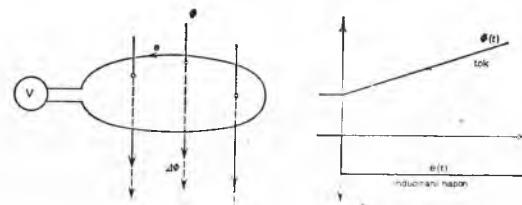
OSNOVE ELEKTRIČNIH STROJEVA

Osnovno djelovanje svih električnih strojeva svodi se na vezu između mehaničkog gibanja i mehaničkih sila, s jedne strane, i električnog napona i struja, s druge strane. Posrednik je pretvorbe u svim slučajevima magnetsko polje, bilo da je stvoreno električnim strujama bilo da je posrijedi polje permanentnog magneta.

Osnovni zakoni

Funkcioniranje električnih strojeva u najrazličitijim varijantama njihovih izvedbi osniva se na tri temeljna zakona elektrotehnike. To su: opći zakon indukcije, zakon elektromagnetskog protjecanja i zakon sile u magnetskom polju.

Opći zakon indukcije kazuje da se u zatvorenoj petljici koja obuhvaća magnetski tok Φ inducira električni napon e jednak

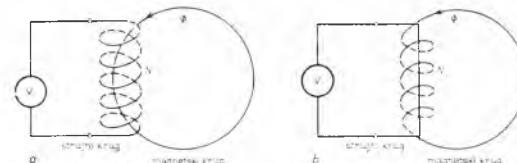


Sl. 1. Opći zakon indukcije, a Promjena magnetskog toka inducira napon u petlji koja ga obuhvaća, b inducirani napon jednak je brzini promjene toka

brzini promjene toka u petlji, a smjera takvog da bi proizveo struje koje se protive promjeni toka (sl. 1):

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Ako petlja N puta obuhvaća isti tok (sl. 2 a) ili ako tok N puta prode kroz istu petlju (sl. 2 b), kroz plohu koju zatvara petlja



Sl. 2. Ulančeni tok, a Namot s više (N) svojih zavoja (petlja) obuhvaća isti tok, b isti zavoj (petlji) više (N) puta obuhvaća magnetski krug

prolazi tzv. *ulančeni tok* $\Psi = N\Phi$, koji je općenito definiran izrazom

$$\Psi = \int B dS,$$

gdje je B magnetska indukcija, tj. gustoća silnice magnetskog toka, a integral se proteže na čitavu površinu S plohe omedene promatranoj petljom. Općenito dakle vrijedi

$$e_N = - \frac{d\Psi}{dt}.$$

Za induciranje napona potrebna je promjena toka. Ta promjena može se izazvati na dva načina: a) tako da dio stroja u kojemu se stvara magnetski tok i petlja u kojoj se inducira napon miruju jedan u odnosu prema drugom, a mijenja se iznos toka; to se postiže tako da se mijenja bilo struja koja tok uzbudjuje bilo otpor magnetskog kruga; b) tako da se iznos toka ne mijenja, ali se mehaničkim gibanjem mijenja dio toka obuhvaćen petljom. U slučaju a) govori se o *naponu transformacije*, u slučaju b) o *naponu rotacije*. Javlja se i kombinacija napona transformacije i napona rotacije.

Cesto je napon rotacije lakše računati na osnovi predodžbe prema sl. 3, tj. polazeći od činjenice da je inducirani napon u vodiku proporcionalan brzini kojom vodič siječe silnicu magnetskog toka. Ako je magnetska indukcija jednaka B , duljina vodiča jednaka L , a njegova brzina v , i ako se vodič kreće kroz magnetsko polje u smjeru koji je okomit na smjer njegova protezanja, a smjer silnice polja okomit je na ravninu koju čine vodič i smjer njegova

gibanja, smanjuje se tok u desnoj zamišljenoj petlji $ABCD$ u vremenu dt za

$$d\Phi_d = -B L v dt,$$

a u lijevoj zamišljenoj petlji $ABEF$ povećava se za

$$d\Phi_1 = +B L v dt.$$

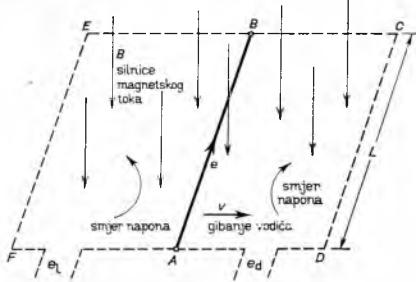
Inducirani napon u desnoj petlji iznosi

$$e_d = -\frac{d\Phi_d}{dt} = +B L v,$$

a u lijevoj petlji:

$$e_1 = -\frac{d\Phi_1}{dt} = -B L v.$$

Struja koja bi proizvela tok Φ morala bi obilaziti smjerom $A F E B C D$, tj. u smjeru kazaljke na satu. Taj smjer dogovorom se naziva pozitivnim smjerom induciranih napona. To znači da bi pozitivan

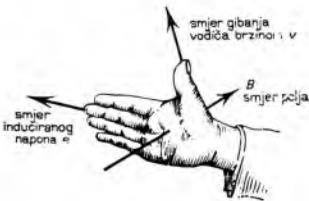


Sl. 3. Izračunavanje napona rotacije uz predodžbu pomicnog vodiča u magnetskom polju

napon e_d u petlji $ABCD$ u vodiču djelova u smjeru AB , isto tako kao i negativan napon e_1 u petlji $ABEF$. Za ovaj specijalni slučaj, gdje oba napona djeluju u istom smjeru, može se napon rotacije u vodiču izraziti jednadžbom

$$e = B L v.$$

Smjer napona može se odrediti po *pravilu desne ruke* (sl. 4) koje glasi: ako se zamisli da silnice ulaze u dlan desne ruke, a palac označava smjer gibanja vodiča, prsti pokazuju smjer induciranih napona.



Sl. 4. Pravilo desne ruke

Zakon protjecanja povezuje električne struje i magnetske tokove. Silnice toka zatvorene su linije. Njihova gustoća, magnetska indukcija B , vezana je s magnetskim poljem jakosti H odnosom

$$B = \mu H,$$

gdje je μ permeabilnost (permeabilitet), veličina karakteristična za medij i njegovo magnetsko stanje. Za svaki zatvoreni krug vrijedi zakon protjecanja:

$$\oint H ds = \sum i = \int \Gamma ds,$$

gdje se linijski integral $\oint H ds$, tzv. *magnetski napon*, odnosi na obodnu krivulju plohe površine S . Plošni integral gustoće struje Γ po površini S praktički se može izraziti kao zbroj svih struja obuhvaćenih promatranom obodom krivuljom i zove se *strujno protjecanje* Θ . Obično se radi o N zavoja kroz koje teče ista struja i , pa je protjecanje

$$\Theta = Ni.$$

Permeabilnost željeza je bitno veća od permeabilnosti zraka, pa se magnetski tok najvećim dijelom zatvara putem koji određuje

aktivni željezni dio, tzv. magnetskim krugom uz koji se nalaze vodiči kojima protječe struja. Zakon protjecanja postaje onda jednostavniji:

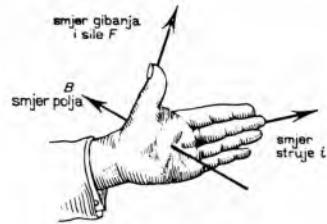
$$\oint \frac{B}{\mu} ds = \Theta.$$

Zakon o sili koja djeluje na vodič u magnetskom polju slijedi iz Biot-Savartovog zakona i glasi:

$$F = B i L,$$

gdje je F sila na vodič dužine L kroz koji teče struja i , pri čemu su smjerovi veličina B , L , F jedan na drugom okomiti.

Smjer sile određen je *pravilom lijeve ruke* (sl. 5) koje glasi: ako silnice ulaze u dlan lijeve ruke i ako prsti pokazuju smjer struje, palac pokazuje smjer sile.

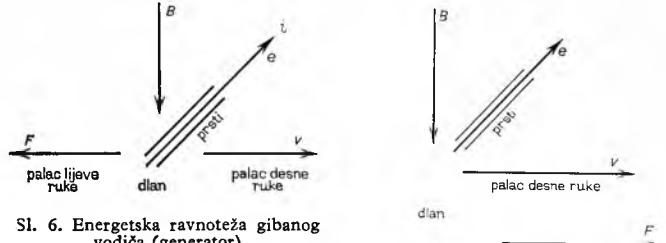


Sl. 5. Pravilo lijeve ruke

Ako sada usporedimo zakon indukcije i Biot-Savartov zakon, pokazuje se da i ovdje vrijedi energetska ravnoteža. Gibanjem vodiča brzinom v u polju indukcije B inducira se napon e po pravilu desne ruke. No čim taj napon protjeri kroz vodič struju i te na taj način izvrši kroz vrijeme dt rad $dW = e i dt$, javlja se po pravilu lijeve ruke (sl. 6) mehanička sila F nasuprot smjeru gibanja, pa treba, da bi se održalo gibanje, izvršiti mehanički rad

$$dW = F v dt = B i L v dt = e i dt.$$

Na taj se način pretvara mehanička energija u električnu s pomoću električnih generatora.



Sl. 6. Energetska ravnoteža gibanog vodiča (generator)

Obratno, ako se naponom nekog vanjskog izvora protjeri kroz vodič struja i , vodič se počinje kretati zbog sile koje sejavljuju između magnetskog polja i njega. Zbog toga se u njemu (po pravilu desne ruke) inducira napon koji je po smjeru suprotan marinutom vanjskom naponu (sl. 7). Da bi se u vodiču ipak mogla održati struja jakosti i nasuprot induciranim naponu e , mora se iz vanjskog izvora stalno dovoditi električna energija $dW = e i dt$. Zbog te dovedene energije javlja se dakle sila u smjeru kretanja vodiča i takav vodič može vršiti mehanički rad. To je princip funkciranja električnih motora.

Vodiči su redovito smješteni na obodu rotora, tj. cilindričnog dijela stroja koji može slobodno rotirati. Sila F na vodič u udaljenosti r od osi rotacije daje zakretni moment $M = Fr$, a ako je v obodna brzina vodiča, kutna je brzina $\omega = v/r$, tako da je pretvorena energija bilo u motorskom bilo u generatorskom radu: $dW = F v dt = M \omega dt$, a pretvorena snaga:

$$P = e i = \frac{dW}{dt} = M \omega.$$

Pri opterećenju električnog generatora pojavljuje se mehanički protumoment na osovini; zato se mora generatoru dovoditi mehanička snaga da bi se održao u radu. Obrnuti, elektromotor

će pri mehaničkom opterećenju uzimati električnu energiju kako bi mogao svladati mehanički moment. Znatna sposobnost stroja da se prilagodi uvjetima opterećenja jedna je od velikih prednosti električnih strojeva.

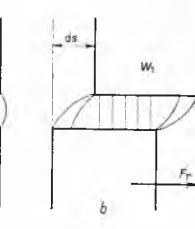
Magnetske sile također su važne za funkcije električnih strojeva. U magnetskom krugu oblikovanom tako da energija magnetskog polja nije za sve položaje jednak, kao npr. na sl. 8 a i b, gdje je $W_1 > W$, djeluju sile (F_r) koje nastoje da dovedu magnetski krug u položaj u kojem je magnetska energija minimalna. U slučaju da postoji pomak ds (sl. 8 b), vrijede jednadžbe

$$F_r ds = W_1 - W = dW, \quad F_r = \frac{dW}{ds}.$$

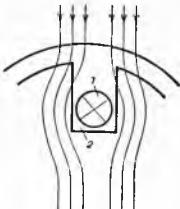
Ovakve sile (ili momenti) uzrokovani nejednakim magnetskim otporom (reluktancijom) zovu se *reluktantske sile* (ili momenti).

I sile koje djeluju na vodiče smještene u utorima (udubljenjima na obodu rotora) koja su predviđena za smještaj vodiča, sl. 9) svode se na djelovanje magnetskih sila iako vodič leži na dnu utora gdje je magnetska indukcija $B \approx 0$. Ali taj vodič obuhvaća neki promjenljivi magnetski tok, pa se u njemu inducira naponi kao da je magnetska indukcija u utoru jednaka indukciji na obodu. Promatranje zakona indukcije u općem obliku polazeći od promjene obuhvaćenog toka, a ne od brzine rezanja silnica, i usporedba električne i mehaničke snage odmah pokazuju da se i sila na vodič u utoru može izračunati kao da je magnetska indukcija u utoru nepromjenjena.

R. Wolf



Sl. 8. Reluktantske sile



Sl. 9. Magnetsko polje u utoru i oko njega. 1 vodič, 2 utor

Aktivni dijelovi električnih strojeva

Elektromehanička pretvorba energije obavlja se u električnom stroju putem induciranja napona, kao što je to objašnjeno u prethodnom poglavljju. Na sl. 3 prikazan je primer induciranja napona kad miruje magnetsko polje a vodič se giba. Izvedba stroja može biti i takva da vodič miruje a da se magnetsko polje prema njemu giba. Da li će se stroj izvesti s magnetskim poljem koje miruje i s vodičima koji se gibaju ili obratno, to zavisi od konstruktivnih zahtjeva.

Namoti električnih strojeva. Magnetski tok u stroju stvaraju svi namoti kojima protječe struje (v. Zakon protjecanja, str. 154 i sl. 5). Postoje namoti kojima je prvenstvena namjena da utječu na magnetsko polje u stroju; oni se zovu *uzbudni namoti*. Pored njih postoje namoti kojima je prvenstvena namjena da se u njima inducira napon. Takvim namotima protječe energija koja se pretvara u mehanički oblik ili od takvog oblika potječe.

Ovi se namoti priključuju na izvore ili trošila električne energije i zovu se *armaturni namoti*.

Uzбудni su namoti npr. namoti polova sinhronih i istosmjernih strojeva (sl. 10 i 11). Ovim namotima proteče istosmjerna struja. Armaturni su namoti npr. namoti rotora istosmjernih strojeva (v. sl. 10) i namoti statora sinhronih strojeva (v. sl. 11).

Namot statora asinhronog stroja (sl. 12) daje osnovnu uzbudbu magnetskog polja, a u njemu se također inducira napon i protječe energija koja se pretvara u mehanički oblik ili potječe od njega. Zbog toga se ovaj namot može svrstati i u uzbudne i u armaturne namote, pa je on po svojoj fizikalnoj namjeni najsrodniji primarnom namotu transformatora (v. Transformatori).

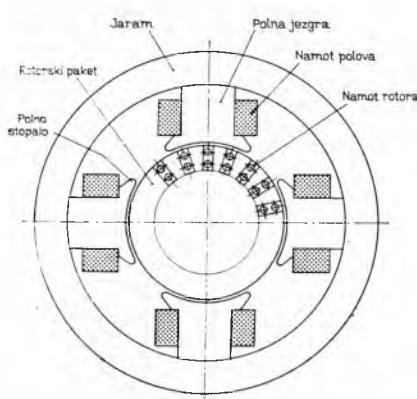
Magnetsko polje električnog stroja može mirovati ili rotirati. Rotirajuće polje u stroju može nastati na dva načina: vrtnjom rotora na kome su elektromagneti uzbudeni istosmjernom strujom, ili višefaznim izmjeničnim strujama koje na poznat način (v. Elektrotehnika) stvaraju okretno polje. U ova slučaja međusobno su zavisni brzina vrtnje polja n_s , broj polova $2p$ i frekvencija f napona što ga to polje inducira u mirnim namotima. Ta je ovisnost dana izrazom

$$f = pn_s,$$

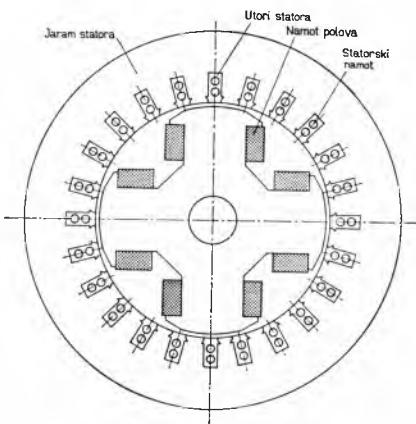
Odatle izlazi da je brzina vrtnje okretnog polja što ga stvaraju struje frekvencije f jednaka $n_s = f/p$. To je ujedno i brzina vrtnje sinhronog stroja, tzv. sinhrona brzina vrtnje.

U *istosmjernom stroju*, čiji je osnovni sastav prikazan na sl. 10, magnetsko polje miruje a vodiči armature su ugradeni na rotoru. Na statoru je smješten uzbudni namot u obliku koncentričnih svitaka na istaknutim polovima. U svim vrstama strojeva u armaturnim vodičima inducira se izmjenični napon. Da bi se na stezalkama stroja dobila istosmjerna struja, ugrađuje se na stroj mehanički ispravljač, tzv. *kolektor*, koji pretvara izmjeničnu struju što teče armaturnim vodičima u istosmjernu struju stroja. Brzina vrtnje istosmjernog stroja slobodno se odabira prema konstruktivnim zahtjevima i zahtjevima pogona. Iz izraza $e = B I v$ (v. str. 154) može se zaključiti da se u toku rada stroja na brzinu vrtnje može utjecati na dva načina: promjenom napona armature e i promjenom magnetskog toka čija je gustoća B . Djelovanjem kolektora postignuto je da je magnetsko polje armaturnog namota uvijek okomito na smjer polja uzbudnog namota (sl. 13). Prema tome ti namoti djeluju kao dva nepomična i međusobno uvijek okomita elektromagneta. Smjer sile, odnosno momenta na rotor uvijek je takav da nastoji zakrenuti magnetsku os namota armature najkraćim putem u magnetsku os uzbudnog namota. Smjer zakretnog momenta stroja može se promjeniti tako da se promjeni predznak bilo struje armature bilo struje uzbude. Ako vanjski moment djeluje suprotno brzini vrtnje, stroj radi kao motor; ako moment djeluje u istom smjeru kao brzina vrtnje, stroj radi kao generator.

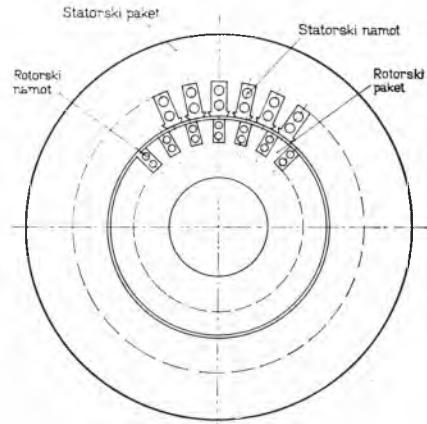
U *sinhronom stroju*, čiji osnovni sastav prikazuje sl. 11, magnetsko polje rotira a vodiči armature ugradeni su na statoru. Na rotoru je smješten uzbudni namot tako da on djeluje kao elektromagnet napajan istosmjernom strujom preko kliznih koluta i četkica. Zbog konstruktivnih zahtjeva uzbudni se namot ugrađuje



Sl. 10. Osnovni sastav istosmjernog stroja

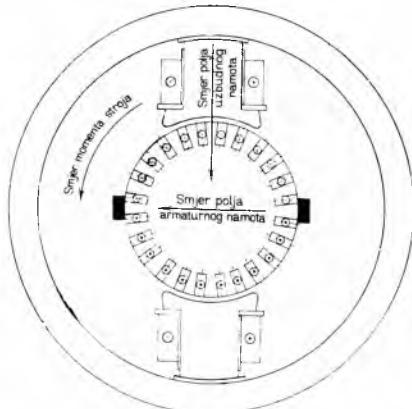


Sl. 11. Osnovni sastav sinhronog stroja



Sl. 12. Osnovni sastav asinhronog stroja

na posebne polove ili raspoređuje u utore rotora, slično kao armaturni namot. Magnetsko polje koje stvara uzbudni namot dovodi se u vrtnju mehaničkom rotacijom čitavog rotora. Struje statora koje teku kad je stroj pod opterećenjem stvaraju okretno polje koje ima jednaku brzinu kao i polje rotora, tj. kao i sam rotor. Rotor, prema tome, rotira sinhrono s okretnim poljem statora, odatle i naziv ovoj vrsti stroja. Djelovanje magnetskog polja uzbudnog i armaturnog namota možemo zamisliti kao dva sistema elektromagnetâ koji se vrte jednakom brzinom a zauzimaju različite položaje jedan prema drugome. U ovisnosti o njihovom položaju razvijaju se sile, a prema tome i zakretni moment. Kad oba polja imaju istu magnetsku os, među njima nema zakretnog momenta, pa stroj ne pretvara energiju. Ako na osovini stroja djeluje vanjski moment u smjeru brzine vrtnje, magnetska os namota uzbude pomaknut će se u tom smjeru; to će izazvati sile koje koće rotor, pa stroj radi kao generator, dakle pretvara mehaničku energiju primljenu na osovinu u električnu energiju. Kad mehanički moment na rotoru djeluje suprotno smjeru vrtnje, rotor se pomakne unatrag, pa ga zbog toga okretno polje statora privlači u smjeru brzine vrtnje. U tom slučaju stroj radi kao motor.



Sl. 13. Smjerovi polja u istosmjernom stroju

U *asinhronom stroju*, čiji osnovni sastav prikazuje sl. 12, namot statora priključen je na izvor izmjenične struje i redovito je višefazne izvedbe, pa struje koje njime teku stvaraju okretno magnetsko polje. Okretno polje inducira u vodičima rotora napone, pa njima teku struje. Zajedničko djelovanje ovih struja i magnetskog polja stvara zakretni moment, pa, u skladu s objašnjnjima u prethodnom poglavljju, dolazi do elektromehaničke pretvorbe energije. Asinhroni stroj ne može raditi kad je brzina rotora jednaka brzini okretnog polja jer tada ne postoji inducirani napon u vodičima rotora (vodiči rotora relativno miruju u magnetskom polju). Zbog toga ne teku struje, pa ne postoji zakretni moment. Namot rotora ne priključuje se ni na kakav vanjski izvor, već je kratko spojen ili je preko kliznih koluta spojen na vanjski otpor.

Kao i ostale vrste strojeva, i asinhroni stroj može raditi kao motor i kao generator. Za razliku od ostalih strojeva, asinhroni stroj može raditi kao generator samo kad mu je brzina vrtnje veća od sinhronе, a kao motor samo kad mu je brzina vrtnje manja od sinhronе. Jedini izvor uzbude asinhronog stroja je mreža na koju je priključen namot statora. Zbog toga asinhroni stroj koji nije priključen na mrežu ne može raditi ne samo kao motor nego ni kao generator.

Izvedba jezgri i namota. Namoti u kojima se inducira napon putem promjene ulančenog toka postavljaju se u *utore* feromagnetske *jezgre*. Kroz jezgru armature protječe izmjenični magnetski tok, čije promjene induciraju napone ne samo u vodičima već i u samim jezgrama. Usljed ovih napona u jezgri teku struje koje stvaraju nepoželjne gubitke. Da bi se smanjili gubici, nastoji se što više povećati otpor ovim strujama, pa se zbog toga jezgre sastavljaju od među sobom izoliranih limova. Takve jezgre obično se nazivaju *paketima*. Limovi za pakete električnih strojeva izraduju se od čelika s primjesom silicijuma, koji povisuje električni otpor limova a ne utječe bitno na njihova magnetska svojstva.

Jezgre uzbudnih namota mogu se izvesti ili od masivnih feromagnetskih materijala ili od limova, što ovisi o zahtjevima postavljenih stroju.

Na sl. 10 i 11 prikazane su dvije osnovne mogućnosti izvedbe namota: *koncentrirani namoti* (na polovima) i *porazdijeljeni namoti* (u utorima jednolikom rasporedenim po obodu). Dio namota koji viri iz paketa, a spaja pojedine vodiče u zavoje, naziva se *glavom namota*. Skup zavoja koji imaju istu magnetsku os i čine mehaničku cijelinu naziva se *svitkom*.

Svi namoti stroja izolirani su prema jezgri, a debljina te izolacije ovisi o naponu namota. Vodiči unutar pojedinih svitaka također su među sobom izolirani. Izolacija među vodičima odbira se u ovisnosti o naponima pojedinih vodiča.

Porazdijeljeni namoti mogu se izvesti tako da se u jedan utor ulaže samo jedna strana svitka (jednoslojni namot) ili da se u utor postavljaju dvije strane različitih svitaka (dvoslojni namot). U potonjem slučaju dvije strane svitka treba jednu od druge izolirati.

Rotorski paket istosmjernog stroja, odn. statorski paket sinhronog stroja, zajedno s pripadnim namotom, zove se *armatura*.

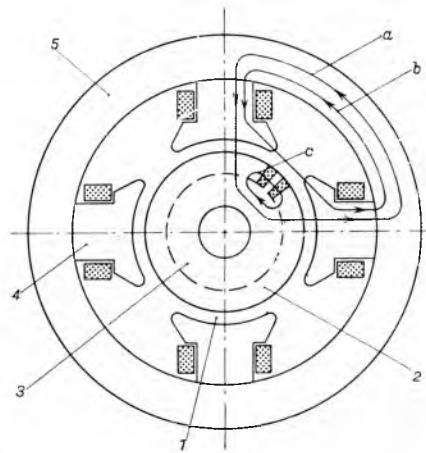
Z. Sirotić

Magnetski krugovi električnih strojeva

Magnetski krug električnog stroja čine oni dijelovi kroz koje prolazi korisni magnetski tok namijenjen inducirajući napon (tzv. *glavni tok*). Osim glavnog toka u stroju se pojavljuju i *rasipni tokovi*, koji se zatvaraju ne samo unutar magnetskog kruga već i izvan njega.

Osnovni dijelovi magnetskog kruga prikazani su na primjeru sl. 14. Svaka vrsta električnog stroja nema sve dijelove magnetskog kruga prikazane na toj slici. Asinhroni stroj, npr., nema polova ni jarma polova već ima dvije zone zuba i dva jarma koji pripadaju cilindričnom rotoru i statoru.

Silnica glavnog toka označena je slovom *a*, a silnice rasipnog toka slovima *b* i *c*. Glavni tok zajednički uzbudjuju svi promatrani namoti svojim rezultirajućim protjecanjem, a kako su namoti smješteni na statoru i rotoru, to njegove silnice prolaze kroz zračni raspored stroja. Za određivanje glavnog magnetskog toka i njegove gustoće mjerodavno je ukupno protjecanje u zračnom rasporu duž oboda armature. Rasipni magnetski tokovi ulančeni su bilo u kojem trenutku pojedinačno samo s namotima koji ih uzbudjuju, pa ne sudjeluju u međuinduktivnoj vezi o kojoj



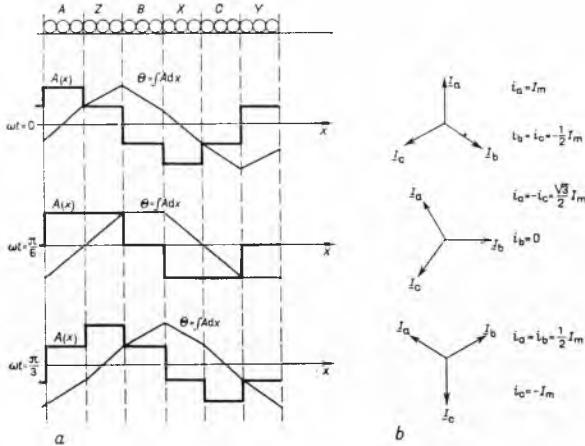
Sl. 14. Osnovni dijelovi magnetskog kruga. 1 Zračni raspored, 2 zona zuba i utora, 3 jaram cilindričnog dijela stroja, 4 pol, 5 iaram polova; a silnica glavnog toka, b i c silnice rasipnih tokova

ovisi elektromehanička pretvorba energije. Da se odredi ulančenje glavnog toka s pojedinim namotima, treba postupno analizirati: strujni oblog, protjecanje, magnetsku indukciju u zračnom rasporu i magnetski tok u zračnom rasporu. Sve se ove veličine određuju duž oboda armature stroja.

Strujni oblog je iznos struje na jedinici duljine promatra nog oboda stroja. On je duž oboda bilo u kojem trenutku općenito promjenljiv. Za proračun magnetskog kruga redovno je dovoljno

prepostaviti da je struja jednoliko raspodijeljena po obodu (znamenjuje se utjecaj raspodjele vodiča u utore). U slučaju izmjenične struje bit će strujni oblog i vremenski promjenljiv.

Sl. 15 a prikazuje, kao primjer, strujni oblog armaturnog namota trofaznog stroja. U namotu teku trofazne struje. Strujni oblog je prikazan duž jednog para polova. Na slici se vidi da se krivulja strujnog obloga pomiče duž oboda, ali da istovremeno mijenja i svoj oblik. Struju u pojedinim fazama pokazuje vektor-ski dijagram (sl. 15 b).



Sl. 15. Strujni oblog trofaznog namota. a) Pomicanje strujnog obloga duž oboda stroja i promjena njegova oblika u toku pomicanja, b) smjerovi vektora struje u namotima faza A, B i C. A, B, C vodici namota faza A, B, C u polaznom smjeru; X, Y, Z vodici namota faza A, B, C u povratnom smjeru; I_a , I_b , I_c trenutne vrijednosti struje u namotima faza A, B, C; I_m amplituda faznih struja; I_a , I_b i I_c vektori struja u pojedinim faznim namotima, $A(x)$ strujni oblog, $\Theta(x)$ protjecanje

Strujni oblog duž oboda stroja promatrano u određenom trenutku čista je izmjenična (ali ne i sinusna) veličina, koja se može prikazati Fourierovim redom

$$A(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \left(n \frac{\pi}{\tau} x + \varphi_n \right),$$

gdje A_n znači prostornu amplitudu n -toga harmoničkog člana strujnog obloga, φ_n prostorni fazni pomak n -toga harmoničkog člana strujnog obloga prema postavljenom koordinatnom sistemu, n redni broj prostornog harmonika, τ polni korak, tj. razmak od sredine jednog do sredine idućeg pola mjeran na obodu stroja, i x udaljenost promatrane tačke od odabrane početne tačke mjerene na obodu stroja.

Istosmjerna struja stvara strujni oblog koji u odnosu na vodiče miruje, pa je $A_n = \text{konst}$.

Izmjenična struja stvara strujni oblog koji u prostoru pulzira ili se pomiče. Karakter strujnog obloga u tom slučaju ovisi o prostornom pomaku između pojedinih namota koji čine jedinstveni (višefazni) strujni oblog i o vremenskom pomaku struja koje teku tim namotima.

Strujni oblog jednofaznog namota napajanog čistom sinusnom izmjeničnom strujom dobiva se ako se uzme da je prostorna amplituda svakog harmoničkog člana vremenski promjenljiva po sinusnom zakonu:

$$A(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(\omega t + \psi) \sin \left(n \frac{\pi}{\tau} x + \varphi_n \right),$$

gdje A_n znači najveći mogući iznos strujnog obloga (vremenska i prostorna amplituda), ω kružnu frekvenciju struje i ψ vremenski fazni pomak struje ili strujnog obloga. Jednostavna trigonometrijska transformacija ovog izraza pokazuje da se pulzirajući strujni oblog može rastaviti na dva vala koji rotiraju u suprotnim smjerovima:

$$A(x, t) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \left(\omega t - n \frac{\pi}{\tau} x + \psi - \varphi_n \right) - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \left(\omega t + n \frac{\pi}{\tau} x + \psi + \varphi_n \right).$$

Prvi član ovog izraza naziva se direktnim valom, a drugi inverzni valom strujnog obloga: $A(x, t) = A_d + A_i$.

Strujni oblog višefaznog namota dobije se zbrajanjem trenutnih vrijednosti strujnog obloga pojedinih faza. Uz pretpostavku da se namot sastoji od m faza koje su jedna prema drugoj prostorno pomaknute za kut $2\pi/m$ i da u pojedinim fazama teku čiste sinusne struje vremenski pomaknute jedna prema drugoj za kut $2\pi/m$, bit će ukupni strujni oblog ovakvog namota:

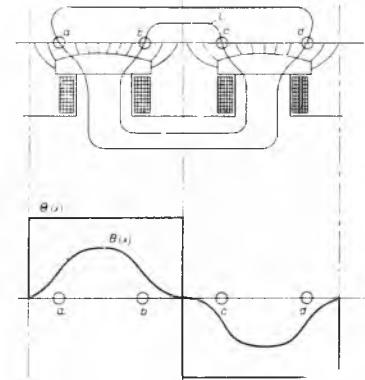
$$\begin{aligned} A(x, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{m-1} A_n \sin \left(\omega t - k \frac{2\pi}{m} + \psi \right) \sin \left[n \left(\frac{\pi}{\tau} x - k \frac{2\pi}{m} \right) + \varphi_n \right] = \\ &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{m-1} A_n \cos \left[\omega t - n \frac{\pi}{\tau} x + 2\pi \frac{k}{m} (n-1) + \psi - \varphi_n \right] - \\ &\quad - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=0}^{m-1} A_n \cos \left[\omega t + n \frac{\pi}{\tau} x - 2\pi \frac{k}{m} (n+1) + \psi + \varphi_n \right] \\ &A(x, t) = A_d + A_i. \end{aligned}$$

U slučaju višefaznog namota strujni oblog se, dakle, također može prikazati dvjema valovima čija se svojstva mogu analizirati pomoću ovih izraza. U slučaju trofaznog namota osnovni član strujnog obloga, koji se često uzima umjesto čitavog strujnog obloga jer je udio viših harmoničkih članova u usporedbi s osnovnim članom u većini praktičkih slučajeva malen, imat će samo direktni val ($m = 3$, $n = 1$)

$$A(x, t) = \frac{1}{2} A_1 \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x + \psi - \varphi_n \right).$$

Protjecanje predstavlja sumu svih struja obuhvaćenih silnicom magnetske indukcije. Silnica glavnog toka obuhvaća dva magnetska pola, pa se sastoji od dvije simetrične polovine. Zbog toga se promatra protjecanje po jednom polu, koje je jednakom magnetskom naponu duž polovine silnice glavnog toka (sl. 16, v. str. 154).

Raspodjela magnetske indukcije u zračnom rasporu određena je protjecanjem duž oboda stroja. Protjecanje bilo u kojoj tački oboda određuje se s pomoću zakona protjecanja prepostavljajući da je permeabilnost željeza (μ_z) beskonačno velika. Tada se čitavo protjecanje troši na magnetskom otporu zračnog raspora.



Sl. 16. Protjecanje koncentriranog namota. a, b, c i d silocijevi oko pojedinih tačaka, l duljina silocijevi

Protjecanje na promatranom mjestu oboda jednako je magnetskom naponu (tj. umnošku jakosti magnetskog polja i duljine puta, $H \delta_x$) koji se »stroši« duž silnica u zraku. Grafički prikaz ovako definiranog protjecanja naziva se uzbudnom krivuljom.

Protjecanje koncentriranog namota određuje se izravno pomoću zakona

$$\Theta(x) = \frac{1}{l} \oint H dl,$$

uz pretpostavku da je permeabilnost željeza $\mu_z = \infty$, tj. da je jakost polja u željezu $H_z = 0$. Integracija se izvodi duž silnice u zraku. Duž jednog polnog koraka ona uvijek obuhvaća jednaku struju, pa je protjecanje konstantno (sl. 16).

Protjecanje raspodijeljenog namota najlakše se određuje s pomoću strujnog obloga. Obuhvaćena struja na određenom dijelu oboda dobije se integriranjem strujnog obloga. Protjecanje je tada

$$\Theta(x) = \frac{1}{2} \oint_0^x H dl = \int A(x) dx.$$

Integracija strujnog obloga počinje u tački $x = 0$ u kojoj je jakost polja jednaka nuli (neutralna zona). Ovaj je početni uvjet nužan jer indukcija, a prema tome i protjecanje, mora duž oboda biti čista izmjenična veličina. Istosmjerna komponenta u protjecanju dala bi istosmjernu komponentu magnetske indukcije duž čitavog oboda stroja, što fizikalno nije moguće.

Primjer krivulje protjecanja raspodijeljenog trofaznog namota, dobivene integracijom strujnog obloga, prikazan je na sl. 15. Budući da strujni oblog rotira duž oboda, takvo svojstvo pokazuju i protjecanje.

Magnetska indukcija u zračnom rasporu ovisna je o protjecanju, koje je na pojedinim mjestima različito, i o duljini zračnog raspora, kako pokazuje razmatranje iznjeto u nastavku. Oko silnice koja ulazi u tačku a oboda stroja (v. sl. 16) treba zamisliti silocijevi dužine δ_x i presjeka dS na ulazu u obod. Magnetska je vodljivost te silocijevi

$$d\lambda_x = \mu_0 \frac{dS}{\delta_x}.$$

Magnetski je tok silocijevi

$$d\Phi_x = B(x) dS = \Theta(x) d\lambda_x = \Theta(x) \mu_0 \frac{dS}{\delta_x}.$$

Magnetska indukcija u zračnom rasporu, na ulazu u obod stroja, iznosi

$$B(x) = \mu_0 \frac{\Theta(x)}{\delta_x}.$$

Uz poznato protjecanje $\Theta(x)$ na svakoj tački oboda i uz poznatu duljinu silnice u zraku koja ulazi u tu tačku, može se odrediti magnetska indukcija na svakom mjestu (v. sl. 16).

Integracijom duž jednog polog koraka krivulje indukcije $B(x)$ određuje se *glavni magnetski tok u zračnom rasporu*:

$$\Phi = L_1 \int_0^L B(x) dx.$$

Paketi električnih strojeva često se grade s radijalnim kanalima za hlađenje. Utjecaj tih kanala u magnetskom krugu izražava se pomoću tzv. idealne duljine stroja L_1 (sl. 17).

Ulančeni tok koncentriranog namota dobije se množenjem toka koji prolazi kroz jezgru namota s brojem zavoja: $\Psi = N \Phi$. Kad su namoti raspodijeljeni, pojedini zavoji ulančuju različite tokove. Uкупni ulančeni tok namota dobije se tako da se zbroje ulančeni tokovi pojedinih harmoničkih članova toka Φ_n . Ulančeni tok s pojedinim harmoničkim članom Φ_n dobije se kao umnožak

$$\Psi_n = N \Phi_n f_n.$$

Ovaj izraz pokazuje da se ulančeni tok Ψ_n izračunava tako da se umnožak $N \Phi_n$, koji znači ulančeni tok kad bi svi zavoji obuhvačali cijeli tok Φ_n , pomnoži s faktorom f_n koji uzima u obzir različita ulančenja pojedinih zavoja. Faktor f_n zove se faktorom namota. Često je dovoljno izračunati osnovni harmonički član ulančenog toka, prema kojem su viši članovi zanemarljivi.

Induktiviteti namota stroja mogu se izračunati iz ulančenih tokova pomoću izraza

$$L = \frac{\Psi}{i}.$$

Ukupni ulančeni tok nekog namota, u stroju s ukupno k namota, određen je vlastitim induktivitetom (samoinduktivitetom) i međuinduktivitetom sa svim ostalim namotima:

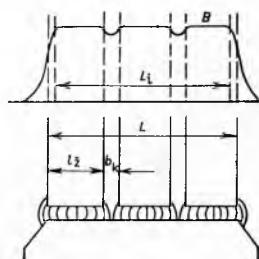
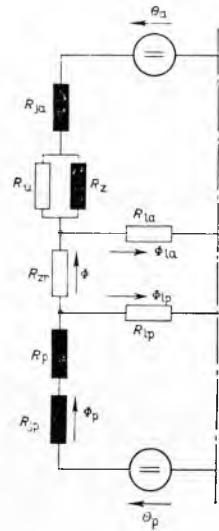
$$\Psi_1 = L_1 i_1 + M_{12} i_2 + \dots + M_{1k} i_k.$$

Glavnom toku pripadaju *glavni induktiviteti* pojedinih namota, a rasipnom toku pripadaju *rasipni induktiviteti*.

Množenjem induktiviteta s kružnom frekvencijom ω dobiva se pripadna *reaktancija stroja*

$$X = \omega L.$$

Magnetski krug sastoji se od niza linearnih i nelinearnih magnetskih otpora. Nelinearne magnetske otpore čine feromagnetski dijelovi kruga. Nadomjesna shema magnetskog kruga po jednom polu prikazana je na sl. 18 za primjer iz sl. 14.

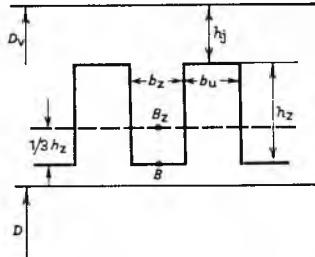


Sl. 17. Idealna duljina stroja. L ukupna duljina paketa, b_1 duljina dionog paketa, b_2 širina rashladnog kanala, L_1 idealna duljina stroja, B krivulja indukcije

Proračun magnetskog kruga počinje zbog njegovog nelinearnog karaktera od zadanoj toka ili indukcije na određenom mjestu u stroju (najčešće u zračnom rasporu). Na osnovi toga određe se indukcije i jakosti polja u ostalim dijelovima kruga. Pomoću jakosti polja određe se magnetski naponi na pojedinim otporima, kako je navedeno u nastavku, a njihov zbroj daje ukupno potrebno protjecanje.

Zračni raspor. Glavni magnetski tok Φ u zračnom rasporu određen je potrebnom induciranim elektromotornom silom. Indukcija u zračnom rasporu pod sredinom pola iznosi B . Jakost polja iznosi u zračnom rasporu $H_{zr} = B/\mu_c$, a magnetski napon $V_{zr} = H_{zr} k_c \delta_0$, gdje je δ_0 duljina zračnog raspora u sredini pola, a k_c Carterov faktor. Taj faktor uzima u obzir utjecaj utora na prosječni put silnice od rotora na stator. Fizikalni smisao ove korekcije isti je kao pri uvodenju idealne duljine stroja, objašnjenom na sl. 17.

Zona zuba i utora. Magnetski napon zuba izračunava se na osnovi jakosti polja u određenim presjecima zuba. Za indukcije u zubu do 1,7 T može se zanemariti paralelna vodljivost utora, pa se računa da čitav tok prolazi samo kroz zube ($R_u \approx \infty$). Najčešće je dovoljno promatrati presjek zuba na 1/3 njegove visine, računajući od užeg kraja zuba (sl. 19).



Sl. 19. Presjek zuba i jarma (radi proračuna magnetskog napona). h_z Visina zuba, b_z širina zuba, b_j širina utora, h_j visina jarma, D_V promjer jarma, D promjer rotora

gdje $\tau_u = D\pi/N$ znači utorski korak na obodu prvog, $b_{z/3}$ širinu zuba na 1/3 njegove visine, L_z duljinu paketa po odbitku rashladnih kanala i k_z faktor punjenja paketa, tj. omjer duljine čistog željeza u paketu prema ukupnoj duljini paketa izoliranih limova (bez rashladnih kanala).

Poznavajući $B_{z1/s}$, može se odrediti pomoću krivulje magnetiziranja jakost polja $H_{z1/s}$. Magnetski napon zuba bit će:

$$V_z = H_{z1/s} h_z.$$

Pri izračunavanju magnetskog napona dugačkih zubova kojima se presjek u različitim visinama znatnije mijenja, treba računati s indukcijama u nekoliko presjeka zuba. Pri višim indukcijama u zubu (obično iznad 1,7 T) treba računati i s paralelnom magnetskom vodljivosti utora.

Jaram. Magnetski napon jarma izračunava se s pomoću stvarnog toka koji njime protječe. U jarmu polova računa se sa zbrojem glavnog toka i rasipnog toka namota polova, a u ostalim slučajevima računa se s glavnim tokom.

Srednja indukcija u jarmu iznosi

$$B_j = \frac{\Phi}{h_j k_z L_z},$$

a magnetski napon jarma

$$V_j = H_j l_j,$$

gdje h_j znači visinu jarma (v. sl. 19) i l_j efektivnu duljinu silnice u jarmu.

Polovi. Magnetski napon polova računa se slično kao magnetski napon jarma. Indukcija u polu iznosi

$$B_p = \frac{\Phi_p}{b_p L_p},$$

a magnetski napon

$$V_p = H_p h_p,$$

gdje b_p znači širinu polne jezgre, h_p visinu pola i L_p dužinu pola (čisto željezo).

Ukupno protjecanje koje je potrebno da se u zračnom rasporu postigne glavni tok Φ jednako je zbroju magnetskih naponu u zračnom rasporu V_{zr} , u zubovima V_z , u jarmu V_j , u polovima V_p i u jarmu polova V_{jp} :

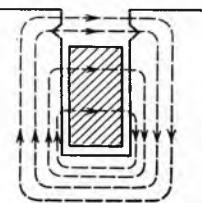
$$\Theta = V_{zr} + V_z + V_j + V_p + V_{jp}.$$

Rasipni magnetski tokovi u svakom su trenutku ulančeni samo s onim namotom koji ih uzbuduje. Ulančenje s rasipnim tokovima određuje *rasipnu reaktanciju namota*.

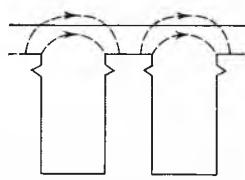
Osnovni su oblici rasipanja: rasipanje u utoru, rasipanje u glavama zubova, dvostruko ulančeno rasipanje (diferencijalno rasipanje), rasipanje u glavama namota i rasipanje polova.

Rasipanje u utoru ovisi o struci utora i magnetskom otporu, koji je gotovo čitav usredotočen u utoru (sl. 20).

Što je utor uži ili dublji, rasipni je otpor magnetskom toku manji, pa je rasipna reaktancija veća. Rasipni tokovi više susjednih utora superponiraju se tako da u zubu ostaje samo poprečni tok (okomit na glavni tok koji protjeće duž zuba). U visokozasićenim strojevima treba već pri proračunavanju magnetskog kruga uzeti u obzir dodatno magnetsko opterećenje uslijed poprečnog toka.



Sl. 20. Rasipanje u utoru



Sl. 21. Rasipanje u glavama zubova

Rasipanje u glavama zubova zatvara se kroz zračni raspor ili susjedno željezo obuhvaćajući pri tome samo onaj namot čije se rasipanje promatra (sl. 21). Ono ovisi o ukupnoj magnetskoj vodljivosti u području glave zuba.

Dvostruko ulančeno rasipanje (diferencijalno rasipanje) određeno je razlikom između ukupne reaktancije glavnog toka nekog namota i reaktancije koja pripada osnovnom harmoničkom članu glavnog toka. Pri proračunu strojeva izmjenične struje računa se inducirana elektromotorna sila s osnovnim prostornim harmoničkim članom indukcije. Uslijed prostornih viših harmoničnih članova, uzbudenih strujom osnovne frekvencije, induciraju se

dodatajni naponi osnovne frekvencije, koji se izražavaju kao padovi naponi na reaktanciji dvostruko ulančenog rasipanja (naziv »dvostruko ulančeno« potječe od činjenice što silnice ovog toka ulančuju dva ili više namota).

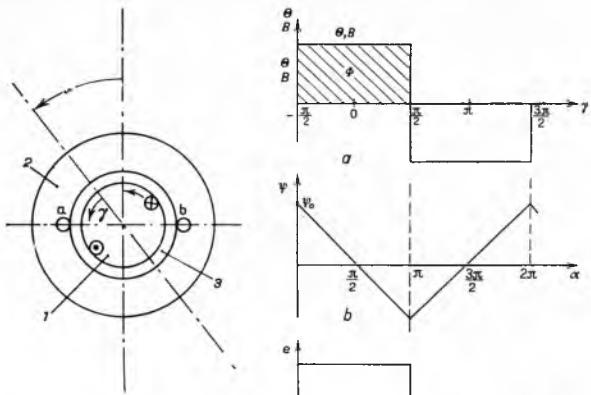
Rasipanje glava namota ovisi o dužini glave, njezinom obliku i udaljenosti od okolnih feromagnetskih dijelova stroja.

Rasipanje među polovima razvija se između nastavaka polova, tzv. polnih stopala, i polnih jezgara, i to u medupolnom prostoru i između čeonih površina polova. Pri izračunavanju tog rasipanja silnice se aproksimativno prikazuju kružnim lukovima i pravcima. Rasipanje među polovima to je veće što su polovi viši i bliži jedan drugome.

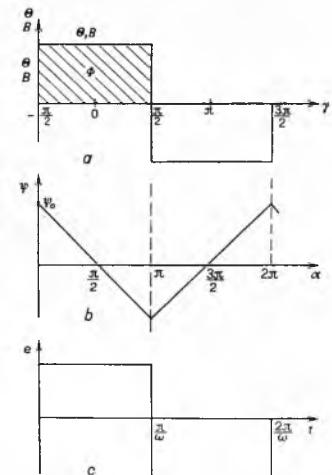
Strujni krugovi električnih strojeva

Strujne krugove električnih strojeva čine njihovi namoti. Svaki namot stvara svoj strujni oblog i protjecanje, kao što je to objašnjeno na str. 156 i 157. Promjenom ulančenog toka u namotu se inducira napon po zakonu $e = -\frac{d\Phi}{dt}$.

Induciranje naponu u električnom stroju najlakše se prati na najjednostavnijem primjeru namota od jednog zavoja. Na sl. 22 prikazan je primjer primitivnog sinhronog stroja. Na cilindričnom rotoru I postavljen je uzbudni namot od jednog zavojja. Protjecanje ovog namota s obzirom na rotor koji miruje ima oblik prema sl. 23 a. Zbog konstantnog zračnog rasporeda isti takav oblik ima krivulja indukcije u zračnom rasporu $B(\gamma)$. Površina ispod krivulje indukcije razmjerna je toku u zračnom rasporu Φ .



Sl. 22. Stroj s jednim zavojem (a b) na statoru. 1 Rotor, 2 stator, 3 zračni raspor, a kut između magnetskih osi statorskog i uzbudnog namota, b, a statorski namot, γ kut u polnom razmaku



Sl. 23. Prilike u stroju s jednim zavojem. a Protjecanje rotora, b ulančeni tok, c inducirani napon u zavoju

Tok Ψ ulančen s namotom statora (armaturnim namotom) najveći je kad se magnetske osi obaju namota podudaraju ($\alpha = 0$). S porastom kuta α linearno se smanjuje ulančeni tok Ψ , sve do $\alpha = \pi/2$. Tada su namoti jedan na drugom okomiti, među njima nema magnetske sprege, pa je ulančeni tok Ψ jednak nuli. Zakreće li se rotor i dalje, kut među magnetskim osima postaje veći od $\pi/2$, međuinduktivitet među namotima postaje negativan, pa i ulančeni tok mijenja predznak. Negativni ulančani tok povećava se razmjerno s kutom α sve do $\alpha = \pi$, kad dostiže najveću negativnu vrijednost. Nakon toga se ulančeni tok smanjuje, te nakon kuta $3\pi/2$ ponovo postaje pozitivan. Ako je poznat ulančeni tok u ovisnosti o položaju rotora, lako se može odrediti inducirani napon u zavoju statora. Tok ulančen s namotom statora ovisit će općenito o vremenu i o kutu rotora α . O vremenu mogu ovisiti struje koje stvaraju tok, a o položaju rotora ovise međuinduktiviteti pojedinih namota, koji također utječu na ulančeni tok. Općenito je, dakle, $\Psi = \Psi(t, \alpha)$.

Inducirani napon dobije se kao potpuni diferencijalni kvocijent ulančenog toka po vremenu:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -\frac{\partial\Psi}{\partial t} - \frac{\partial\Psi}{\partial\alpha} \cdot \frac{da}{dt} = -\frac{\partial\Psi}{\partial t} - \omega \frac{\partial\Psi}{\partial\alpha} = e_i + e_r,$$

$$e_t = - \frac{\partial \Psi}{\partial t}, \quad e_r = - \omega \frac{\partial \Psi}{\partial r},$$

gdje $\omega = da/dt$ znači kutnu brzinu vrtnje rotora.

Ovaj izvod pokazuje da se sveukupni inducirani napon u općem slučaju sastoji od dva dijela, kako je istaknuto već na str. 153: napona transformacije e_t i napona rotacije e_r . Kad nema promjene ulančenog toka po kutu a , nema napona rotacije. Obrnuto, kad nema promjene ulančenog toka po vremenu t , uz konstantan kut a , nema napona transformacije.

U navedenom primjeru (v. sl. 22) nema napona transformacije jer u slučaju konstantnog kuta a nema promjene ulančenog toka. Napon transformacije pojavio bi se kad bi, npr., natom rotora tekla izmjenična struja, pa bi se magnetsko polje u zračnom rasporu mijenjalo i uz nepomični rotor. Inducirani napon u navedenom primjeru dobiva se primjenom izraza

$$e = - \omega \frac{\partial \Psi}{\partial a}$$

na ulančeni tok Ψ (sl. 23 b). Dobiva se ovisnost induciranih naponova o vremenu prikazana na sl. 23 c. Usporedba slika 23 a i 23 c pokazuje da se je oblik prostornog rasporeda magnetske indukcije u zračnom rasporu preslikao u oblik vremenskog toka induciranih naponova.

Ulančeni tok iz sl. 23 b mijenja se po zakonu

$$\Psi = - \frac{2}{\pi} \Psi_0 a + \Psi_0 \quad (0 < a < \pi),$$

$$\Psi = \frac{2}{\pi} \Psi_0 a - 3\Psi_0 \quad (\pi < a < 2\pi),$$

$$\Psi_0 = BL \frac{D\pi}{2}.$$

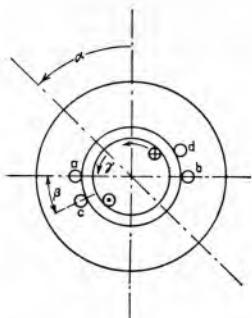
$$e = - \omega \frac{\partial \Psi}{\partial a} = \frac{2}{\pi} \Psi_0 \omega = \frac{2}{\pi} BL \frac{D\pi}{2} \omega,$$

$$e = 2BLv,$$

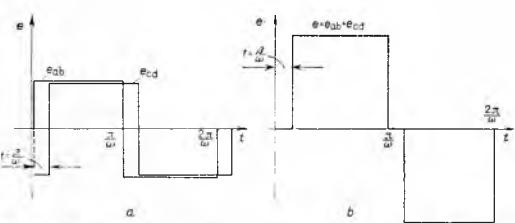
gdje D znači promjer statora, a L duljinu statora.

Ovaj je rezultat jednak rezultatu dobivenom sa str. 154 za inducirani napon u vodiču koji se giba u magnetskom polju (v. sl. 3). Potrebno je, međutim, ukazati na razliku u smislu ovih izraza. U sl. 3 indukcija B vlada u svakoj tački vodiča. Na sl. 23 vodiči su smješteni u utoru u kojima magnetske indukcije gotovo nema (zbog njihovog velikog magnetskog otpora). Inducirani napon nije određen indukcijom na mjestu vodiča (u utoru), kako je navedeno na str. 155, već indukcijom u zračnom rasporu, pred vodičem. Ovo pokazuje da pri određivanju induciranih naponova u stroju treba polaziti od općeg zakona $e = -d\Psi/dt$.

Magnetske prilike u stroju ponavljaju se nakon jednog para polova, čemu odgovara 360 električnih stupnjeva. (Električni stupnjevi različiti su od geometrijskih: ukupni broj geometrijskih stupnjeva u stroju uvijek je 360, dok električnih stupnjeva ima onoliko puta 360 koliko je pari polova. Općenito vrijedi između električnog i geometrijskog kuta u stroju odnos $a = p\alpha_g$, gdje a znači električni kut, α_g geometrijski kut i p broj pari polova.)



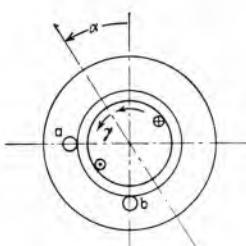
Sl. 24. Stroj sa dva zavoja na statoru, a b prvi zavoj, c d drugi zavoj, β kut između dva zavoja



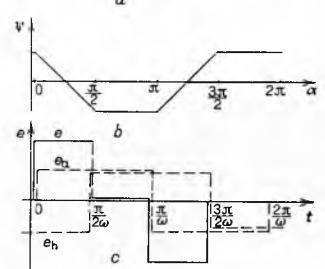
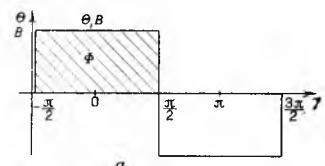
Sl. 25. Inducirani naponi u stroju sa dva zavoja. a Naponi pojedinih zavoja, b rezultirajući napon

Ako se na statoru stroja iz sl. 23 doda još jedan zavoj koji je prema prvome pomaknut za kut β u smjeru vrtnje (sl. 24, zavoj c d), u njemu se inducira napon jednakog oblika kao u zavodu a b, ali kasnije, s vremenskim pomakom $t = \beta/\omega$. Spaje li se ova dva zavoja u seriju, dobit će se rezultirajući napon prema sl. 25. Na toj su slici prikazani naponi pojedinih zavoja e_{ab} i e_{cd} i ukupni napon ovakvog namota e .

Zavoji kojih su vodiči udaljeni za jedan polni korak zovu se *dijametalni*. U izvedbi stroja često se primjenjuju zavoji koji su uži od dijametalnih, pa se nazivaju *skraćenim* (sl. 26). Napon inducirani u skraćenom zavodu a b određuje se na isti način kao i u slučaju dijametalnog zavoda. Sl. 27 prikazuje raspored indukcije B u zračnom rasporu, ulančeni tok Ψ i inducirani napon e u skraćenom zavodu. U skraćenom zavodu inducirani napon



Sl. 26. Skraćeni zavoj (a b)

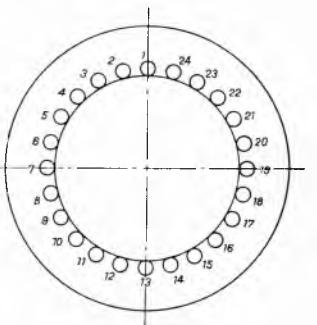


Sl. 27. Prilike u stroju sa skraćenim zavojem. a Indukcija u zračnom rasporu, b ulančeni tok, c inducirani napon u skraćenom zavodu

nema isti oblik kao prostorna raspodjela indukcije u zračnom rasporu. Promatraju li se, međutim, inducirani naponi u pojedinim vodičima pomoću zakona $e = BLv$, vidi se da im je zbroj unutar zavoda jednak induciranom naponu $e = e_{ab} - e_{cd}$ (sl. 28). Inducirani naponi u pojedinim vodičima a i b crtano su označeni na sl. 27 c. Ako se u vodičima induciraju naponi potpuno jednakim po smjeru i veličini, napon zavoda jednak je nuli. To može nastupiti kad su oba vodiča promatrano zavoda pod istim polom.

Armaturni namoti redovno se izvode kao porazdjeljeni namoti. Za strojeve izmjenične struje prvenstveno je važan osnovni harmonički član induciranog napona, pa treba promatrati osnovni prostorni harmonički član magnetske indukcije u zračnom rasporu, kao što je u nastavku prikazano na primjeru induciranih naponova u armaturi 4-polnog stroja koji ima 24 utora (sl. 29).

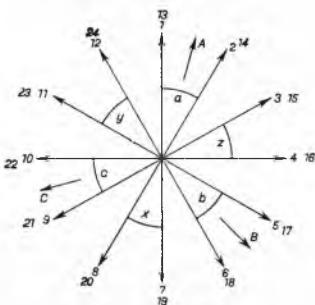
Svakom polu pripada četvrtina oboda stroja, dakle 90 geometrijskih stupnjeva. S druge strane, jednom polu uvijek odgovara 180 električnih stupnjeva. Kut između dva susjedna utora predstavlja 15 geometrijskih, odn. 30 električnih stupnjeva. Indukcija sinusnog oblika u zračnom rasporu (važan je prvenstveno osnovni harmonički član induciranog napona) inducira u vodičima pojedinih utora sinusne napone. Kako magnetska indukcija nailazi redom na utor 1, 2, 3, ..., postojat će među induciranim naponima fazni pomak od 30 stupnjeva. Sinusne veličine prikazuju se vektorima (zapravo kazaljkama), pa se to može primijeniti i na inducirane napone u vodičima pojedinih utora. Tako se dobije tzv. *vektorska zvijezda* prikazana na sl. 30.



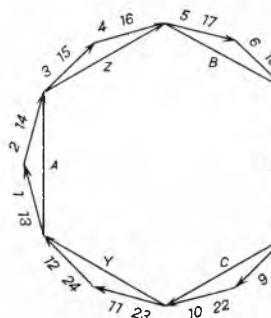
Sl. 29. Raspored utora u armaturi četveropolnog stroja

U elektrotehnici uobičajilo se govoriti o vektorima i vektorskim dijagramima iako električne veličine koje se prikazuju dužinama u tim dijagramima zapravo nisu vektori nego tzv. *kazaljke* ovisne samo o vremenu. U ovom članku pravi vektori označeni su strelicom iznad slova, a kazaljke, tj. električne veličine o kojima se govorи u vezi s njihovim prikazom u vektorskem dijagramu ili u vezi s kompleksnim brojevima, crticom ispod slova.

Zbroj svih vektora iz sl. 30 predstavlja bi napon da su svi vodiči spojeni u seriju. Tada bi poligon vektora bio zatvoren (sl. 31), što znači da bi ukupni napon takva namota bio jednak nuli. U izvedbi namota nikad nisu svi vodiči spojeni u seriju, nego dva vodiča unutar zavoja čine spoj u protuseriji (v. sl. 28).

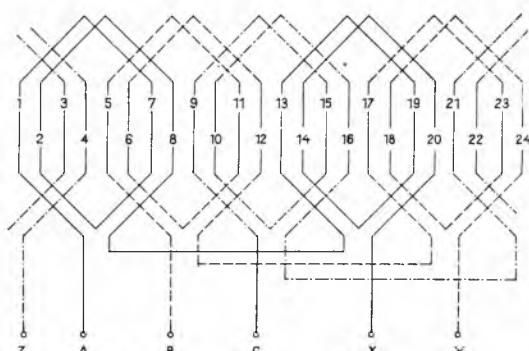


Sl. 30. Vektorska zvijezda napona. $I \dots 24$ Vektori napona u vodičima pojedinih utora; A, B, C rezultantni napon pojedinih faza; a, b, c napon vodiča pojedinih faza u polaznom smjeru; x, y, z napon vodiča pojedinih faza u povratnom smjeru



Sl. 31. Poligon napona. $I \dots 24$ Vektori napona u vodičima pojedinih utora; A, B, C vektori napona u vodičima pojedinih faza u polaznom smjeru; X, Y, Z vektori napona pojedinih faza u povratnom smjeru

Vodiči armaturnog namota mogu se porazdijeliti unutar više namota, pa se tako dobiju *višefazni namoti*. U primjeru prema sl. 30 prikazan je trofazni namot. Slovima A, B, C označeni su vodiči pojedinih faza u polaznom smjeru, a slovima X, Y, Z u po-



Sl. 32. Shema trofaznog namota

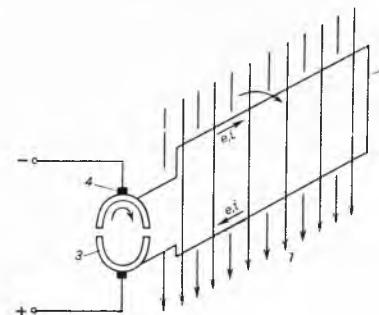
vratnom smjeru. Raspored vektora u pojedine faze prikazan je na sl. 30 i 31. Vektori su raspoređeni u faze tako da među ukupnim naponima postoji fazni pomak od 120 stupnjeva. Na osnovi sl. 31 može se nacrtati shema namota (sl. 32) koja pokazuje kako treba spojiti pojedine vodiče.

Napon jedne faze namota prikazanog na sl. 32 dobit će se kao geometrijski zbroj svih vektora (sl. 33), uzimajući u obzir smjer obilaženja unutar samog namota. Vodiči unutar zavoja spojeni su u protuseriju, pa ako se u njima induciraju međusobno protufazni naponi, treba te napone unutar zavoja algebarski zbrojiti (npr. napone utora 1 i 7). Omjer između ukupnog napona faze E , dobivenog geometrijskim zbrajanjem napona pojedinih vodiča, i algebarskog zbroja napona svih vodiča koji čine tu fazu, zove se *faktor namota*. U promatranoj primjeru zavoji imaju dijametralni korak, pa na faktor namota utječe samo raspored zavoja. Tako faktor namota zove se *zonski*. Kad bi zavoji imali skraćen korak, morali bi se geometrijski zbrojiti i naponi unutar svakog zavoja. U tu svrhu uvodi se *tetivni faktor namota*.

Sl. 33. Napon faze dobiven vektorskim zbrojem vektora napona u vodičima pojedinih utora

Kolektor. U strojevima istosmjerne struje pretvara se izmjenačna struja u namotu armature u istosmernu struju na izlasku iz stroja posebnim mehaničkim ispravljačem, tzv. kolektorm (v. str. 169). Djelovanje kolektora prikazano je u sl. 34 na primjeru jednog zavoja priključenog na kolektor koji ima dvije lamele. U tom je primjeru prikazan princip rada istosmernog generatora u kojem inducirani napon e tjeera struju i . U položaju prikazanom na slici zavojem ulančeni tok jednak je nuli. Vrti li se zavoj udesno u smjeru strelice, ulančeni tok počinje rasti, a inducirani napon e tjeera struju i tako da se ona ovom porastu suprotstavlja (u smjeru koji pokazuju strelice). Kad ravina zavoja prema smjeru silnica magnetskog polja dosegne kut od 90° , on ulančuje najveći mogući tok; pri daljem okretanju zavoja ulančeni tok se počinje smanjivati. Zbog toga inducirani napon e mijenja predznak, pa tjeera struju u smjeru u kome pomaže ulančeni tok.

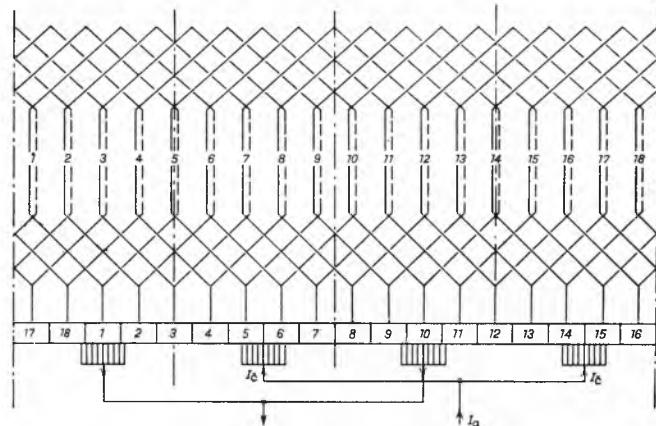
Do kuta od 90° struja je ulazila na gornju i izlazila na donju lamelu. Nakon kuta od 90° , istodobno s promjenom predznaka induciranog napona, dolazi do premještanja lamela, koje se okreću, u odnosu prema četkicama, koje miruju, te struja opet izlazi



Sl. 34. Djelovanje kolektora. 1 Magnetsko polje u stroju (miruje), 2 zavoj namota armature (rotira), 3 kolektor (rotira), 4 četkice (miruju)

na donju lamelu (koja je prije bila gornja), a ulazi na gornju (koja je prije bila donja). Tako se postiže da struja uvek izlazi kroz istu jednu, a ulazi kroz istu drugu četkicu. Četkice moraju biti postavljene tako da prelaze s jedne lamele na drugu u trenutku kad zavoj ulančuje najveći mogući tok, tj. kad inducirani napon mijenja svoj predznak. Tada su one u tzv. *neutralnoj zoni*.

U istosmernom stroju čitav je namot armature zatvoren sam u sebe, a pojedini su vodiči izvedeni na kolektor koji ima više lamele. Primjer namota stroja istosmjerne struje sa četiri pola

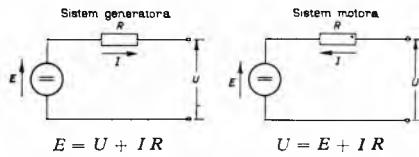


Sl. 35. Namot istosmernog kolektorskog četveropolnog ($p = 2$) stroja sa 18 utora. $1 \dots 18$ lamele kolektora, I_c struja četkica, I_a struja tcreta

i 18 utora prikazan je na sl. 35. U tom je primjeru primijenjen dvostruki namot.

Nadomjesne sheme. U generatoru inducirani napon stroja djelomično se troši na *pad napona* na radnom i rasipnom otporu armature, a njegov se preostali dio daje na raspolaganje potro-

šaćima kao *napon stezaljki*. U motoru je obratno: napon narinut na stezaljke troši se na rasipnom i radnom padu napona armature i na induciranoj elektromotornoj sili, koja u tom slučaju ima karakter protunapona. Ove prilike u stroju mogu se izraziti s pomoću jednostavnih strujnih krugova koji se nazivaju nadomjesnim shemama. Pri tome se mogu primijeniti dva načina prikazivanja: sistem u kojem stroj djeluje kao izvor (generator) i sistem u kojem stroj djeluje kao trošilo (motor). U generatorskom se sistemu označuje snaga koja izlazi na stezaljkama stroja kao pozitivna, a u motornom sistemu kao negativna. Primjena ovih dvaju sistema na primjeru stroja istosmjerne struje vidi se na sl. 36. Prirodno je da se za opisivanje stroja koji pretežno radi kao generator upotrebljava sistem generatora, a za stroj koji pretežno radi kao motor sistem motora.



$$E = U + IR$$

$$I > 0, P = UI > 0.$$

$$I < 0, P = UI < 0.$$

$$I < 0, P = UI < 0.$$

$$I < 0, P = UI < 0.$$

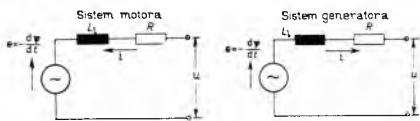
$$U = E + IR$$

$$I > 0, P = UI > 0.$$

$$I < 0, P = UI < 0.$$

Sl. 36. Nadomjesne sheme za stroj istosmjerne struje. E Inducirani napon, U napon na stezaljkama, I struja armature, R otpor armaturnog namota

U strojevima izmjenične struje redovno se promatra samo osnovni harmonički član napona inducirani u armaturnom namotu. U osnovnoj nadomjesnoj shemi pojavljuju se ove veličine (sl. 37): $e = -d\Psi/dt$ inducirani napon, u napon na stezaljkama, i struja armature, L_1 rasipni induktivitet armaturnog namota i R otpor armaturnog namota.



$$e = u + L_1 \frac{di}{dt} + Ri$$

$$u \text{ simboličkom obliku: } \underline{U} = \underline{E} + j\omega L_1 \underline{I} + \underline{RI}$$

U sistemu generatora su radna i induktivna snaga $P_r = UI \cos \varphi$, odnosno $P_i = UI \sin \varphi$, pozitivne kad stroj daje u mrežu aktivnu i induktivnu snagu (rad naduzbuđenog generatora)

$$u = e + L_1 \frac{di}{dt} + Ri,$$

$$u \text{ simboličkom obliku: } \underline{U} = \underline{E} + j\omega L_1 \underline{I} + \underline{RI}$$

U sistemu motora su radna i induktivna snaga $P_r = UI \cos \varphi$, odnosno $P_i = UI \sin \varphi$, pozitivne kad stroj uzima iz mreže aktivnu i induktivnu snagu (rad poduzbuđenog motora)

Sl. 37. Nadomjesne sheme za stroj izmjenične struje

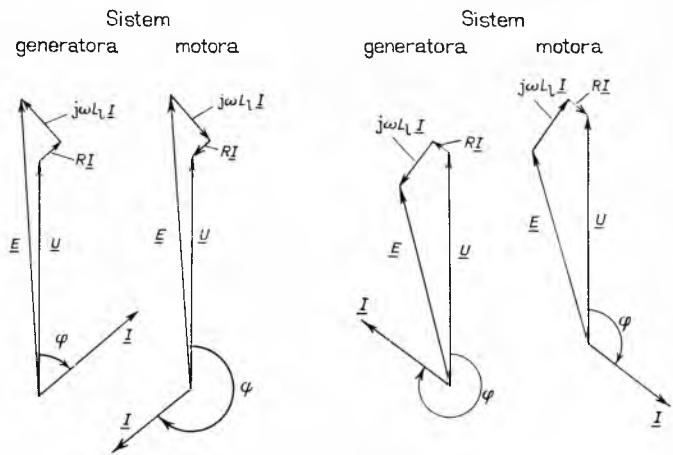
Ako se promatra samo osnovni harmonički član, mogu se sinusne veličine (s kružnom frekvencijom ω) prikazati vektorima (zapravo kazaljkama), te se može primijeniti simbolički račun. Poznat je odnos između trenutnih vrijednosti sinusnih veličina i pripadnih kompleksnih brojeva (v. *Elektrotehnika*), pa se npr. trenutna vrijednost induciranih napona e predstavlja vektorom (kazaljkom) \underline{E} , $-j\omega \Psi$, u vektorom \underline{U} , $L_1 \frac{di}{dt}$ vektorom $j\omega L_1 I$, i vektorom \underline{I} itd.

U strojevima izmjenične struje treba odvojeno promatrati smjer radne i smjer induktivne snage. Na isti način kao za istosmjerne strojeve, moguće su dva sistema prikazivanja: generatorski i motorski.

Način vektorskog prikazivanja za neke slučajeve motorskog i generatorskog rada izmjeničnih strojeva vidi se na sl. 38-41.

Iz ovog opisa vidi se da nema razlike u rezultatima primjene generatorskog ili motorskog sistema predznaka. Dobiveni vek-

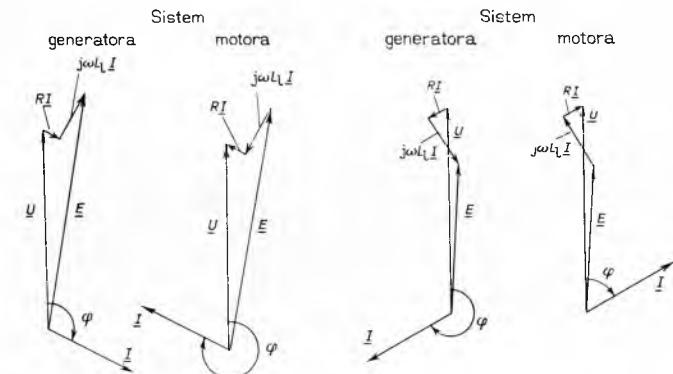
tori napona su jednakim. O formalnim prednostima ovisi koji će se sistem primijeniti. U slučaju naduzbuđenog generatora svakako je povoljniji sistem generatora, pa se on, npr., primjenjuje pri



$$\begin{aligned} P_r &= UI \cos \varphi > 0 & P_r &= UI \cos \varphi < 0 & P_r &= UI \cos \varphi > 0 & P_r &= UI \cos \varphi < 0 \\ P_i &= UI \sin \varphi > 0 & P_i &= UI \sin \varphi < 0 & P_i &= UI \sin \varphi < 0 & P_i &= UI \sin \varphi > 0 \\ 0 < \varphi < \frac{\pi}{2} & \pi < \varphi < \frac{3\pi}{2} & \frac{3\pi}{2} < \varphi < 2\pi & \frac{\pi}{2} < \varphi < \pi \end{aligned}$$

Sl. 38. Rad naduzbuđenog generatora (stroj daje u mrežu aktivnu i induktivnu snagu)

Sl. 39. Rad poduzbuđenog generatora (stroj daje u mrežu aktivnu, a prima induktivnu snagu)



$$\begin{aligned} P_r &= UI \cos \varphi < 0 & P_r &= UI \cos \varphi > 0 & P_r &= UI \cos \varphi < 0 & P_r &= UI \cos \varphi > 0 \\ P_i &= UI \sin \varphi > 0 & P_i &= UI \sin \varphi < 0 & P_i &= UI \sin \varphi < 0 & P_i &= UI \sin \varphi > 0 \\ \frac{\pi}{2} < \varphi < \pi & \frac{3\pi}{2} < \varphi < 2\pi & \pi < \varphi > \frac{3\pi}{2} & 0 < \varphi < \frac{\pi}{2} \end{aligned}$$

Sl. 40. Rad naduzbuđenog motora (stroj prima iz mreže aktivnu, a daje induktivnu snagu)

Sl. 41. Rad poduzbuđenog motora (stroj prima iz mreže aktivnu i induktivnu snagu)

analizi prilika u sinronom generatoru. U slučaju poduzbuđenog motora povoljniji je sistem motora, pa se tako, npr., obrađuje asinhroni motor.

Nadomjesne sheme i pripadne vektorske slike mogu se sastaviti i podrobije nego što je to prikazano. Svakom dijelu magnetskog kruga može se pridružiti odgovarajući induktivitet u nadomjesnoj shemi i napon inducirani promjenom magnetskog toka ulanđenog s takvim induktivitetom prikazati u vektorskoj slici. To je potrebno, npr., kad se mora voditi računa o zasićenju pojedinih dijelova magnetskog kruga (npr. zubova).

B. Frančić

Energetski odnosi

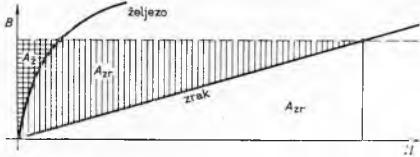
Pretvorba energije u električnim strojevima provodi se posredovanjem električnih polja, magnetskih polja i mehaničkog gibanja. Električna polja nastaju u izolacijama; bez njih se ne bi mogli uspostaviti naponi potrebeni za dovođenje ili odvođenje električne energije. Energija samog električnog polja, tj. rad potreban da bi se to polje sagradilo, vrlo je mala u usporedbi s energijom koju stroj pretvara, pa se ne uzima u račun pri promatranju energetskih prilika u stroju.

Energija akumulirana u magnetskom polju znatno je veća. Specifična energija magnetskog polja po jedinici volumena iznosi

$$W_{lm} = \int H dB.$$

U magnetskom krugu električnog stroja indukcija B bit će određena tokom Φ i presjekom S , a pripadno je polje $H = B/\mu$.

U željezu velike permeabilnosti μ ista indukcija B stvara mnogo manje polje H nego u zraku, gdje je permeabilnost mala (sl. 42).



Sl. 42. Energija akumulirana u magnetskom polju zraka (A_{zr}) i željeza (A_z)

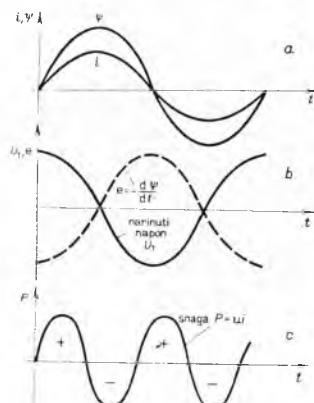
Zbog toga je specifična energija magnetskog kruga mnogostruko veća tamo gdje tok prolazi kroz zrak nego tamo gdje prolazi kroz željezo. Praktički se najveći dio magnetske energije koncentriira u prostoru između statora i rotora, u zračnom rasporu stroja. Uz konstantnu permeabilnost μ_0 jedinična energija u zraku je

$$W_{lm} = \frac{B^2}{2\mu_0},$$

a ukupna energija

$$W_m = \int \frac{B^2}{2\mu_0} dV,$$

pri čemu se integral proteže na čitav volumen V gdje se magnetski tok zatvara kroz zrak. Ovu energiju treba dovesti da bi se sagradilo magnetsko polje u stroju i ta ista energija opet se oslobada za vrijeme razgradivanja polja. Tako se npr. pri magnetiziranju izmjeničnom strujom tok Ψ i struja i mijenjaju prema sl. 43 a.



Sl. 43. Pulzacija snage u izmjeničnom magnetskom polju

struju koja odgovara omskom otporu namota R , nego će ona postepeno rasti prema jednadžbi

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-t/T}),$$

gdje je $T = L/R$ električna vremenska konstanta kruga u kojem teče struja magnetiziranja (uzbudnog kruga), tj. omjer njegovog samoinduktiviteta i omskog otpora. Akumulirana energija magnetskog polja W_m iznosi

$$W_m = \int e i dt = \int \frac{d\Psi}{dt} i dt = \frac{L i^2}{2}.$$

Akumulirana kinetička energija. Osim energije akumulirane u magnetskom polju, rotirajuće mase stroja akumuliraju kinetičku energiju

$$W_k = \frac{m D^2}{4} \cdot \frac{\omega^2}{2},$$

gdje je $m D^2/4 = \int r^2 dm$ (polarni) moment tromosti rotirajućih dijelova, a $\omega = 2\pi n$ kutna brzina rotora. Ovu energiju treba dovoditi stroju kad se mase ubrzavaju, a ona se opet oslobada kad se usporavaju.

Za vrijeme promjenâ polja i promjenâ brzine vrtnje stroja treba trošiti jedan dio dovedene snage (P_m) na izgradnju polja i jedan dio (P_k) za povećanje brzine vrtnje:

$$P_m = \frac{dW_m}{dt}, \quad P_k = \frac{dW_k}{dt}.$$

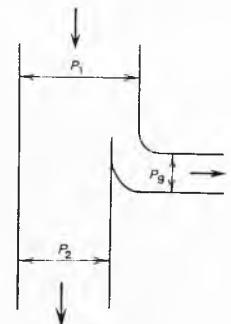
Gubici pretvorbe energije. Kad nema promjenâ energije polja i kinetičke energije, stroju se dovodi snaga P_1 , a stroj predaje snagu P_2 . Razlika predstavlja gubitke pretvorbe energije:

$$P_g = P_1 - P_2.$$

Ovakvo pogonsko stanje naziva se *stacionarnim*, a tok energije može se prikazati jednostavnim dijagramom (sl. 44) prema bilanci energije:

$$P_1 = P_2 + P_g.$$

U *kvazistacionarnom stanju*, gdje se doduše energija polja i kinetička energija kolebaju oko neke prosječne vrijednosti, ali je ova konstantna (kao npr. pri izmjeničnom magnetiziranju), mogu se i dovedeni i predani snaga, kao i gubici, kolebiti oko neke stalne prosječne vrijednosti. Tako se pogonsko stanje može smatrati stacionarnim s prosječnim vrijednostima kao konstantnim vrijednostima P_1 i P_2 u bilanci energije.

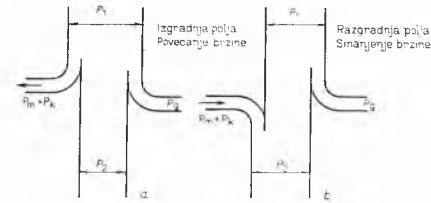


Sl. 44. Dijagram toka energije u stacionarnom stanju. P_1 stroju dovedena snaga, P_2 snaga koju stroj predaje, P_g gubici

Pri *promjeni pogonskog stanja* koja znači i promjenu polja ili brzine, bilanca energije glasi:

$$P_1 = P_2 + P_g + P_m + P_k.$$

Svaki pojedini član može u toku prelazne pojave poprimiti pozitivne ili negativne vrijednosti, osim gubitaka P_g , koji ne mogu postati negativni. Rečeno riječima, stroju treba dovesti snagu P_g za pokrivanje gubitaka, snagu P_m za izgradnju magnetskog polja i snagu P_k za ubrzavanje mase. Ili, ako su predznaci snaga P_m i P_k negativni, predanu snagu i gubitke pokriva dovedena snaga i snaga dobivena razgradnjom polja i smanjenjem kinetičke energije. Dva primjera dijagrama toka energije vide se na sl. 45: sl. 45 a za pozitivnu vrijednost $P_m + P_k$, sl. 45 b za negativnu.



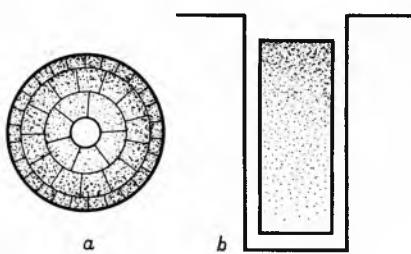
Sl. 45. Dijagram toka energije za vrijeme prelaznih pojava. a Zbroj $P_m + P_k$ pozitivan, b zbroj $P_m + P_k$ negativan; P_1 stroju dovedena snaga, P_g snaga koju stroj predaje, P_m gubici, P_k snaga za izgradnju ili razgradnju magnetskog polja, P_k snaga za ubrzavanje ili kočenje mase

Primljena i predana snaga mogu biti, već prema vrsti stroja, električna ili mehanička snaga; gubici se uvijek pretvaraju u toplinu.

Gubici u stroju nastaju na različitim mjestima. Struja u svakom namotu omskog otpora R stvara Jouleovu toplinu $i^2 R$. Pri primjeni izmjeničnih struja dolazi, zbog magnetskog polja tih struja, do potiskivanja struje prema rubovima presjeka vodiča (skin-efekt) (sl. 46 a) odnosno od dna prema vrhu utora (sl. 46 b). Posljedica tog potiskivanja je ista kao da se presjek vodiča smanji ili njegov otpor povećao, pa su zbog toga gubici u obliku Jouleove topline veći. Ovo povećanje gubitaka u odnosu prema gubicima pri istosmernoj struji naziva se *dodatnim gubicima u namotu*,

a ono postaje znatno kad su presjeci vodiča veći, utori dublji i frekvencije više.

Gubici u željezu pojavljuju se u magnetskom krugu, a uzrokovani su vrtložnim strujama i histerezom.



Sl. 46. Potiskivanje struje zbog skin-efekta; a u vodičima (u užetu): prema vanjskom rubu preseka, b u strojevima: prema vrhu utora. Tamnije osjenčane površine znače veću gustoću struje

Promjena magnetskog toka inducira napone ne samo u namotima nego i u željezu u kojemu se tok mijenja. Izvedbom magnetskog kruga od medu sobom izoliranih limova umjesto od masivnog željeza svagdje gdje se tok mijenja (npr. u statoru za izmjenično polje ili rotoru koji se vrti u mirnom polju) postižu se manji inducirani naponi uz veći otpor u krugu vrtložnih struja, pa se tako smanjuju vrtložne struje i od njih uzrokovani gubici u obliku Jouleove topline u željezu. Općenito se ovi *gubici zbog vrtložnih struja* po jedinici mase (p_w) mogu izračunati prema jednadžbi

$$p_w = k_w d^2 f^2 B_m^2,$$

gdje je d debljina lima, f frekvencija, B_m maksimalna vrijednost magnetske indukcije, a k_w konstanta ovisna o vrsti lima; ona se kreće u rasponu $k_w = 250 \dots 2500 \text{ W s}^2/\text{kg m}^2 \text{ T}^2$ ili $1/\text{T}^2\text{s}$.

Razlika između energije uložene za izgradnjnu polja i energije dobivene razgradnjom polja predstavlja *gubitke zbog histereze*. Ta energija unutar jednog ciklusa magnetiziranja iznosi:

$$A_{h1} = \oint H \, dS = S_h,$$

tj. jednaka je površini petlje histereze (sl. 47), a pri izmjeničnom magnetiziranju proporcionalna je broju premagnetiziranja, tj. frekvenciji, tako da je

$$P_h = f S_h.$$

Površina petlje histereze S_h , a time i gubici zbog histereze, mijenjaju se proporcionalno sa B^x . Eksponent x zavisi od veličine magnetske indukcije B i iznosi: 1,5 pri $B = 1$, 2,2 pri $B = 1,5$, a samo 0,8 pri $B = 2$ (jer se petlja histereze zbog zasićenja ovdje samo malo povećava). Grubo uzeto, može se reći da su gubici zbog histereze po jedinici mase (p_h) proporcionalni kvadratu magnetske indukcije te da iznose:

$$p_h \approx k_h f B^2,$$

gdje k_h znači konstantu zavisnu od vrste upotrijebljenog željeza; njezina se vrijednost obično kreće u rasponu $k_h = (0,032 \dots 0,044) \text{ J/kg T}^2$ ili $\text{m}^2/\text{s}^2\text{T}^2$. Petlja histereze razlikuje se pri izmjeničnom i pri okretnom magnetiziranju, tj. prema tome da li se na određenom mjestu mijenja i smjer polja ili se mijenja samo njegova jakost.

Usljed nepravilne površine statora i/ili rotora (utori), te uslijed stepeničaste raspodjele uzbude po obodu, pojavljuju se pulzacija magnetskog polja i vrtložne struje u površinskom sloju statora i rotora i u zubovima, što također uzrokuje gubitke u željezu. Isto tako dodatne gubitke u željezu uzrokuju izmjenična rasipna polja oko vodiča u kojima teče izmjenična struja. Često se svi ovi gubici, osim gubitaka zbog vrtložnih struja i zbog histereze uslijed glavnog toka, nazivaju *dodatnim gubicima u željezu*, no ispravnije je smatrati dodatnim gubicima samo onaj dio tih gu-

bitaka koji se nisu pojavljivali (pa nisu ni mogli biti izmijereni) u praznom hodu.

Gubici pri pogonu stroja. Pri pogonu stroja pojavljuje se trenje u ležajima i eventualno trenje četkica za dovod struje na kolektoru ili na kliznim kolutima. Osim toga, gubici nastaju trenjem na površini rotora pri njegovu okretanju u zraku i utroškom snage za pogon ventilatora koji su potrebni za unutrašnje ili površinsko hlađenje stroja. Gubici trenjem mijenjaju se približno sa $\sqrt{n^3}$ a gubici zbog ventilacije sa n^3 , tako da su *gubici zbog trenja i ventilacije*

$$P_{tr,v} \approx k_1 n^{1,5} + k_2 n^3.$$

Na četkicama nastaju, osim gubitaka trenjem, još i električni gubici zbog pada napona Δu pri prelazu struje:

$$P_e = \Delta u i.$$

Pad napona na četkicama Δu kreće se od $2 \times 0,3 \text{ V}$ na metalnim do 2×1 do $1,5 \text{ V}$ na grafitnim četkicama.

Korisnost stroja (faktor korisnosti) zove se omjer između predane i primljene snage:

$$\eta = P_g/P_1.$$

Obično se računa s onom snagom koja se može električki mjeriti (P_1 kod motora, P_2 kod generatora) i gubicima, pa je zgodno pisati:

$$\eta = 1 - P_g/P_1 = 1 - \frac{P_g}{P_2 + P_g}.$$

Iz korisnosti slijede gubici:

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

Korisnost je to bliža idealnoj vrijednosti 1 što je stroj veći. Korisnost vrlo velikih generatora približava se vrijednosti 0,99, a vrijednost $\sim 0,90$ nalazi se već i kod strojeva srednje veličine.

R. Wolf

Zagrijavanje i hlađenje električnih strojeva

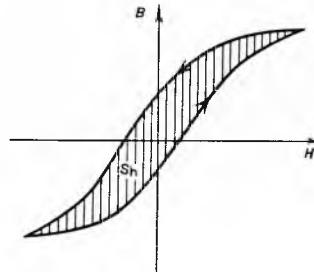
Energija koja se u stroju utroši za pokrivanje svih u prethodnom poglavlju navedenih gubitaka pretvara se na kraju u toplinu. Tom toplinom stroj se zagrije, tj. povisuje mu se temperatura, najprije na mjestima gdje toplina nastaje, a onda se prenosom topline zagriju i drugi dijelovi stroja i toplina se sa stroja prenosi na okolinu i sredstva za hlađenje. Za izračunavanje prenijetih količina topline i povišenja temperature primjenjuju se zakoni prenosa topline vodenjem (kondukcijom), konvekcijom i isijavanjem (radijacijom). O tome v. članak *Prenos topline*.

Najveće količine topline razvijaju se u vodičima namotā i iz njih se prenose najprije na izolaciju namotā. Budući da su izolacioni materijali za namote više ili manje neotporni prema povišenim temperaturama, pogodnim se konstruktivnim mjerama i hlađenjem stroja mora održavati temperatura namota ispod određene granice.

Dozvoljene maksimalne nadtemperature (dozvoljeno zagrijavanje) namota određene su propisima, a ovisne su o kvalitetu izolacije, tj. o klasi izolacije. Različite države imaju u tom pogledu propise koji se u cijelini među sobom mnogo ne razlikuju, ali u pogledu maksimalnog dozvoljenog zagrijavanja propisuju dosta različite temperature. Ti propisi su prije, još u prvim decenijama ovog stoljeća, imali svoju osnovu u čisto slobodnoj procjeni maksimalno dozvoljene temperature na temelju iskustva, a ne na nekim istraživanjima i dubljim teoretski osnovanim računima. Općenito se smatralo da svaka izolacija može beskonačno dugo izdržati grijanje do neke odredene granične temperature, a pri prekoračenju te temperature da relativno brzo dotraje; to mišljenje, razumljivo, ne odgovara stvarnosti.

Tek godine 1930 uvodi se novi pojam *životnog vijeka* izolacije, kao veličine koja ovisi o temperaturi. To pretpostavlja da je izolacioni materijal na svakoj temperaturi izložen kemijskom procesu kojemu je posljedica da izolacioni materijal gubi fizikalna svojstva mjerodavna za ocjenu njegove izolacione sposobnosti. Gubljenje tih svojstava zove se starenje izolacionog materijala.

Amerikanac Montsinger je na osnovi velikog broja pokusa, vršenih na transformatorima, za ovisnost životnog vijeka o tem-



Sl. 47. Energija zbog gubitaka histereze je unutar jednog ciklusa magnetiziranja jednaka površini S_h unutar petlje

peraturi postavio jednadžbu

$$\dot{Z} = \dot{Z}_0 \cdot 2^{-(\vartheta - \vartheta_0)/\Delta_0},$$

gdje je \dot{Z} životni vijek a ϑ temperatura izolacije ili bakra u namotu. \dot{Z}_0 je neki izabrani referentni životni vijek, a ϑ_0 temperatura na kojoj dotični izolacioni materijal ima taj životni vijek. (Npr. ako se postavi $\dot{Z}_0 = 10$ godina, ϑ_0 je temperatura na kojoj životni vijek dotičnog materijala iznosi 10 godina.) Δ_0 je ono povišenje ili sniženje temperature ($\vartheta_1 - \vartheta_0$) kojim se životni vijek \dot{Z} u odnosu prema \dot{Z}_0 snizuje napolja, odnosno poviše na dvostruko. Svaki izolacioni materijal ima (uz izabrani \dot{Z}_0) dvije konstante koje karakteriziraju njegovo starenje: konstantu Δ_0 i konstantu ϑ_0 .

Za $\dot{Z}_0 = 10$ godina te dvije karakteristične konstante nekih izolacionih materijala jesu ove:

| | | |
|-------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| papir u ulju | $\Delta_0 = 8^\circ\text{C}$ | $\vartheta_0 = 100^\circ\text{C}$ |
| pamuk, papir u zraku | $\Delta_0 = 10^\circ\text{C}$ | $\vartheta_0 = 95^\circ\text{C}$ |
| tinjac s dodatkom ve- | | |
| zivnog sredstva klase A | $\Delta_0 = 10^\circ\text{C}$ | $\vartheta_0 = 120^\circ\text{C}$ |

Propisi o dozvoljenom zagrijavanju namota i o izolacionom materijalu električnih strojeva. U industrijski razvijenim zemljama postoje propisi kojima se određuju maksimalno dozvoljena povišenja temperature iznad temperature okoline u namotima električnih strojeva, odn. temperature (nadtemperature) koje se ne smiju prekoračiti kad je stroj nazivno opterećen. Dozvoljene nadtemperature ovisne su o kvalitetu izolacionog materijala. Zbog toga i propisi pojedinih zemalja i preporuke IEC (Internacionalne elektrotehničke komisije) dijele izolacione materijale prema njihovoj termičkoj postojanosti na više klase. Dozvoljene srednje nadtemperature iznose u Evropi za klasu A $\sim 60^\circ\text{C}$, za klasu B $\sim 80^\circ\text{C}$, a za klasu H $\sim 125^\circ\text{C}$.

Propisi osim toga propisuju s kojim se najvišim temperaturama okolnog zraka mora računati. Skoro svi propisi navode kao najvišu temperaturu okolnog zraka 40°C , kao najvišu srednju dnevnu temperaturu okolnog zraka 30°C i kao najvišu srednju godišnju temperaturu okolnog zraka 20°C .

Po preporukama IEC su predviđene, a u nas standardom JUS N. A8.005 propisane ove klase izolacionih materijala:

| Klasa | Granična temperatura | Materijali (primjeri) |
|-------------|----------------------|---|
| A | 105 | pamuk, papir i sl., impregnirani uljnim lakovima |
| E | 120 | sintetički lakovi (emajl za žicu), bakelit, tekstolit, itd. impregnirani asfaltnim i sintetičkim lakovima |
| B | 130 | staklena vlakna, azbest, tinjac, i sl. impregnirani asfaltnim i sintetičkim lakovima |
| F | 155 | staklena vlakna, azbest, tinjac, itd. impregnirani smolama s povišenom termičkom postojanošću kao što su poliesterske i epoksidne smole i poliuretani |
| H | 180 | isto impregnirano silikonskim smolama |
| C iznad 180 | | staklo, azbest, tinjac, porculan, kvarc sa neorganskim vezivom, npr. cementom. |

Osjetljivost ugrađene izolacije nije, međutim, određena samo upotrijebljenim izolacionim materijalima nego i pogonskim uvjetima (npr. vibracijama i slično) i načinom ugradnje u stroj, pa se onda govori o graničnim temperaturama sistema izolacije.

Uredaji za hlađenje električnih strojeva služe za odvođenje razvijene topline iz stroja, tako da temperature pojedinih dijelova ostanu u dopuštenim granicama. Električni stroj nije homogeno tijelo, nego je sastavljen od mnogih dijelova. U nekim se razvija toplina (uglavnom u aktivnom materijalu v. str. 155), u ostalim ne. Skoro svi strojevi imaju na rotoru montirane ventilatore, kako bi se pojačalo hlađenje. Zbog umjetnog hlađenja je proračun zagrijavanja i hlađenja vrlo kompleksan, iako treba ustanoviti samo temperaturu namota u pogonu, jer je ona s obzirom na toplotnu postojanost izolacije propisima ograničena.

Zagrijavanjem stroja, odnosno namota, određena je nazivna snaga stroja. Stroj koji se bolje i intenzivnije hlađi ima uz iste dimenzije veću nazivnu snagu. Intenzivnije hlađenje postiže se uglavnom jačom ventilacijom, a ona povećava ne samo nazivnu snagu nego i gubitke zbog ventilacije stroja, te time smanjuje njegovu korisnost. Nazivna snaga može se povećati i primjenom izolacije više toplinske klase, ali takva izolacija znatno je skuplja pa povećava cijenu stroja. Pri proračunu stroja treba tražiti najekonomičnije rješenje, tj. rješenje pri kojemu je korist postignuta intenzivnjim hlađenjem ili upotrebotom skuplje izolacije veća od troškova uloženih za postizanje te koristi.

Iako stroj nije homogeno tijelo, može se u toku prelaznih stanja sagledavati problem zagrijavanja pomoću samo dvije vremenske konstante: vremenske konstante cijelog stroja i vremenske konstante samog namota. Za slučaj malih preopterećenja (do najviše +50%) zadovoljava računanje zagrijavanja kao da je cijeli stroj homogeno tijelo. Vremenska konstanta modernog stroja kreće se između 10 i 30 min. Ako se radi o većim preopterećenjima, namot se brzo zagrijava, pa se računa samo s vremenskom konstantom namota, koja iznosi nekoliko minuta. A. Dolenc

Izvedbe i namjene električnih strojeva

Primjena električnih strojeva neobično je široka. U elektrana rade sinhroni generatori spojeni s vodnim, parnim ili plinskim turbinama ili sa motorima s unutrašnjim sagorijevanjem, a u nizu postrojenja susreću se električni motori, bilo asinhroni, sinhroni ili kolektorski, koji gone radne mehanizme vrlo različitih karakteristika. Zbog svoje svestrane primjene i zbog razlika mehaničkih, prostornih, klimatskih i drugih prilika u kojima se primjenjuju, susreću se konstrukcije strojeva koje se razlikuju po obliku stroja kao celine, po oblikovanju i dimenzioniranju njegovih konstruktivnih elemenata i po primjenjenoj zaštiti (od dodira osoblja, prodiranja čvrstih tijela i vode, eksplozivnih plinova, kemijski agresivnih plinova, klimatskih uvjeta i sl.).

Oblici strojeva. Potreba da se električni stroj priladi radnom mehanizmu uvjetovala je razvoj niza različitih oblika strojeva u pogledu smještaja ležaja, položaja osovine i učvršćenja. Postoje dva osnovna oblika električnih strojeva: horizontalni i vertikalni. Susreću se četiri glavna oblika horizontalnih strojeva: bez ležaja, s ležajima koji su ugrađeni u ležajne štitove, s ležajima ugrađenim u ležajne štitove i jednim odvojenim ležajem, s odvojenim ležajima. Vertikalni strojevi su strojevi s ležajnim štitovima ili strojevi s odvojeno ugrađenim ležajima.

Da bi se lakše odredila izvedba i opisao stroj, oblici strojeva sistematizirani su različitim standardima. U tabl. 1 skupljeno je nekoliko oblika koji se najčešće susreću u praksi (prema njemačkim propisima DIN 42 950).

Vrste zaštite električnih strojeva. Budući da je stroj u postrojenjima podvrgnut različitim utjecajima okoline i u različitoj je mjeri pristupačan osobama koje njime rukuju, treba ga na pogodan način zaštiti.

Osnovna mehanička zaštita stroja određena je stupnjem zaštite osoba da dodira rotirajućih dijelova i dijelova pod naponom, stupnjem zaštite od prodiranja čvrstih stranih tijela i stupnjem zaštite od prodiranja vode.

Različni stupnjevi zaštite od dodira i prodiranja stranih tijela predviđaju izvedbe strojeva od potpuno otvorenog do potpuno zatvorenog, definirajući zaštitu veličinom predmeta kojim se više ne mogu dodirnuti dijelovi stroja pod naponom ili veličinom otvora na stroju. Predviđeni su i različiti stepeni zaštite od prodiranja vode, počevši od vode koja kaplje ili prska, pa do vode koja potpuno prekriva stroj.

Električni strojevi moraju se često montirati u atmosferi zapaljivih ili eksplozivnih plinova. Strojevi koji rade u takvim prilikama moraju biti izvedeni tako da je ili spriječeno stvaranje iskara ili onemogućeno da se eksplozija nastala unutar stroja proširi na okolinu. Stupnjevanje zaštite od eksplozije vodi računa o zapaljivosti ili eksplozivnosti okolnih plinova. Svi strojevi građeni za upotrebu u atmosferi eksplozivnih ili zapaljivih plinova moraju biti specijalno označeni i treba da imaju atest za određeni stupanj zaštite.

Električni strojevi u tropskim klimatskim prilikama podvrgnuti su utjecaju vlage i stvaranju pljesni. Za obranu od vlage treba upotrebljavati izolacione materijale koji nisu hidroskopni, a za vrijeme mirovanja stroja treba spriječiti kondenzaciju vlage ugradnjom grijачa. Zbog opasnosti od stvaranja pljesni površinski premaz namota izvodi se specijalnim (fungicidnim) lakovima. Specijalnu pažnju treba posvetiti zaštiti od korozije, pa svi dijelovi koji se ne mogu zaštiti premazima moraju biti ili prevučeni galvanskim prevlakama (npr. matice, vijci) ili izrađeni od nerđajućih materijala (npr. klizni koluti). Sve ove mjere sačinjavaju tropsku izvedbu.

ELEKTRIČNI STROJEVI

U zaprašenoj atmosferi stroj mora biti potpuno zatvoren i izведен tako da je potpuno sprijećeno prodiranje prašine, a u kemijski agresivnoj atmosferi treba za gradnju stroja upotrijebiti pogodne otporne materijale.

Oblikom i vrstom mehaničke zaštite i okolnom atmosferom određena je konstrukcija stroja i vrsta materijala za pojedine dijelove.

Režim pogona električnih strojeva. Trajna snaga električnog stroja određena je dozvoljenim zagrijanjem (tj. razlikom između temperature najtoplijeg mesta u stroju i temperature okoline), a to znači da se svaki stroj može kroz kraći vremenski period opteretiti i snagom većom od trajne, a da njegova temperatura ostane u granicama dozvoljenog. Iz toga slijedi da će se stroj koji radi samo u kratkim intervalima, između kojih on miruje ili radi u praznom hodu, moći opteretiti snagom koja je veća od snage trajnog pogona. Vrste pogona su sistematizirane u propisima (npr. preporukama IEC 34—1) kako bi se mogla odrediti snaga stroja. Na natpisnoj pločici motora mora biti tačno napisano za koju je vrstu pogona on namijenjen jer samo uz propisani režim rada stroj može dati snagu koja je napisana na pločici. Osnovne vrste pogona jesu: trajni pogon, kratkotrajni pogon, isprekidani periodični pogon i trajni pogon s isprekidanim opterećenjem.

U *trajnom pogonu* s konstantnim teretom vrijeme opterećenja dovoljno je dugo da se postigne termički stacionarno stanje.

Kratkotrajni pogon predviđa trajanje opterećenja dovoljno kratko da se ne postigne konačna temperatura stroja, a trajanje perioda mirovanja je toliko da se stroj ohladi na okolnu temperaturu.

Isprekidani periodički pogon predviđa identične cikluse opterećenja koji traju toliko kratko da se ni u periodu opterećenja ni u periodu mirovanja ne postiže termički stacionarno stanje. Pri tom se podrazumijeva da struje pri pokretanju ne smiju bitno utjecati na zagrijavanje stroja.

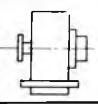
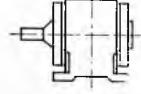
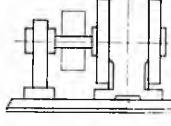
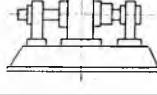
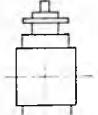
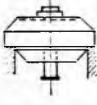
Trajni pogon s isprekidanim opterećenjem predviđa slične cikluse kao isprekidani periodički pogon s tom razlikom da u periodu bez opterećenja stroj ne miruje, nego radi u praznom hodu.

U tabl. 2 dani su dijagrami opterećenja, gubitaka i zagrijavanja za navedene vrste pogona.

Specijalni uvjeti pogona. Osim naprijed navedenih, postoji i niz drugih okolnosti koje bitno utječu na izvedbu stroja i njegovih konstruktivnih elemenata. Dok se strojevi opće namjene (npr. asinhroni strojevi za pumpu, strojevi za pogon ventilatora, strojevi za obradu drva i sl.) grade ne vodeći računa o specijalnim uvjetima pogona, postoje niz specijaliziranih pogona za koje treba zadovoljiti odredene zahtjeve, tj. treba graditi i *strojeve za specijalne namjene*.

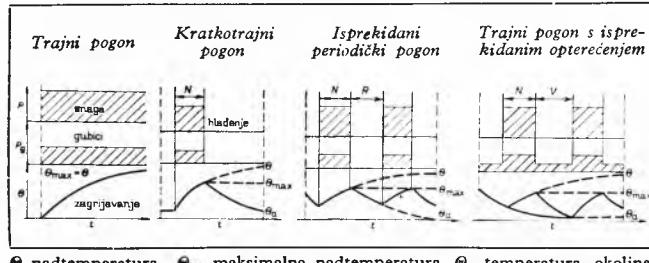
Valjaonički motori moraju se graditi robustno jer su podvrgnuti velikim preopterećenjima; osim toga oni su često reverzibilni. *Motori za vuču* podvrgnuti su velikim preopterećenjima pri pokretanju i kočenju, a i znatnim vibracijama, pa ih treba graditi veoma čvrsto. U konstrukciji strojeva koji rade na mjestima gdje se traži *besumnji pogon* (pogon kućanskih aparata, medicinskih aparata i sl.) treba posvetiti posebnu pažnju izvedbi ležaja, ventilacije i magnetskih krugova. *Brodski strojevi* izloženi su atmosferi punoj soli i grubom posluživanju. Stroj i elemente treba

Tablica 1
OBЛИCI EЛЕКTRIČNIH STROJEVA

| Oznaka i skica | | Ležaj | Stator | Osovina | Opća izvedba | Pričvršćenje |
|----------------|---|--|-----------------------|-----------------------------------|--|--|
| A5 |  | bez ležaja | s nogama | prirubna osovina | — | Montaža na temeljnoj ploči stroja s kojim se spaja |
| B3 |  | 2 ležajna štita | s nogama | slobodni kraj osovine | — | Montaža na temeljnoj ploči, temelju, zateznim tračnicama i sl. |
| B5 |  | 2 ležajna štita | bez nogu | slobodni kraj osovine | Prirubnica za učvršćenje na pogonskoj strani stroja | Prirubnica za pričvršćenje na radni mehanizam |
| C2 |  | 2 ležajna štita 1 odvojeni ležaj | s nogama | osovina u ležaju s vanjske strane | Tip stroja s ležajnim štitovima. Stator i odvojeni ležaji na zajedničkoj temeljnoj ploči | Montaža na betonskom temelju ili zateznim tračnicama |
| D5 |  | 2 odvojena ležaja | s nogama | slobodni kraj osovine | Stator i ležaji stoje na zajedničkoj temeljnoj ploči | Montaža na betonskom temelju ili zateznim tračnicama |
| V1 |  | 2 ležajna štita | bez nogu | slobodni kraj osovine dolje | Prirubnica na pogonskoj strani u blizini ležaja | Pričvršćenje s prirubnicom koja se nalazi s donje strane |
| W1 |  | Noseći ležaj gore; vodeći ležaj gore i dolje | s nogama ili bez njih | s prirubnicom dolje | Noseći ležaj prenosi težinu i sile spojenog stroja | Pričvršćenje na temelj prema posebnim podacima |
| W6 |  | bez ležaja | s nogama ili bez njih | bez osovine | Osovina i ležaj pripadaju spojenom stroju. Težinu rotora nosi ležaj spojenog stroja | Pričvršćenje na temelj prema posebnim podacima |

zaštiti od korozije a namote specijalno impregnirati. *Ugradbene strojeve*, tj. strojeve koji se ugrađuju u neko specijalno postrojenje, treba prilagoditi po obliku postrojenju ili radnom mehanizmu u koji se ugrađuju. I drugi specijalni uvjeti odražavaju se na konstrukciju stroja, tako npr. motori za mlijekarsku industriju moraju podnosići često pranje mlazom vode i biti građeni tako da se na njima ne može zadržavati nečistoća; tekstilni motori moraju biti oblikovani tako da se ne mogu uslijed ventilacije na njima sakupljati niti, prašina i slično.

Tabelica 2
VRSTE POGONA ELEKTRIČNIH STROJEVA

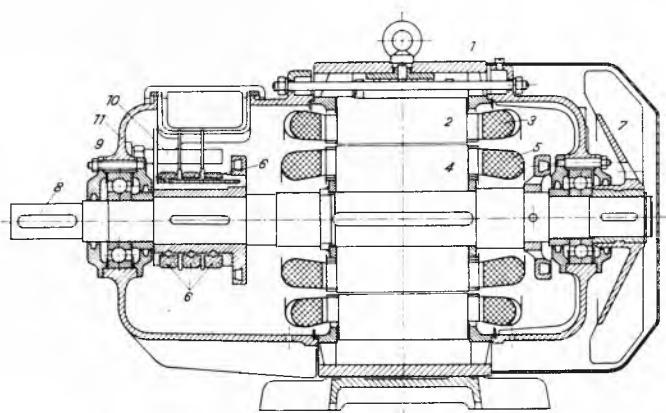


Θ nadtemperatura, Θ_m maksimalna nadtemperatura Θ_a temperatura okoline, N period rada, R period stanke, V period smanjenog opterećenja

Veliki sinhroni strojevi koji se ugrađuju u elektranama također postoje u različitim izvedbama prema vrsti pogonskog stroja. *Hidrogeneratori*, tj. generatori spojeni s vodnim turbinama, najčešće su vertikalne konstrukcije jer je tako ekonomičnija izvedba hidrauličkog dijela. Mehanički moraju biti konstruirani tako da izdrže naprezanja kod tzv. »pobjega turbine«, tj. brzine koju turbina postiže kad uz otvorenu turbinu ispadne teret generatora (ta brzina vrtanje iznosi 160–300% nazivne, već prema tipu turbine). *Turbogeneratori* (sinhroni generatori gonjeni parnim i plinskim turbinama) brzohodni su strojevi, redovito sa 3000 ili 3600 o/min u mrežama sa 50 odn. 60 Hz. Zbog toga im je rotor mehanički jako napregnut, pa treba pažljivo odabirati materijal. Ti strojevi rade najčešće iznad kritične brzine vrtanje, pa treba vršiti tačne proračune vlastitih frekvencija titranja. U konstrukciji *dizelskih generatora* treba puno pažnju posvetiti torzionim naprezanjima jer pogonski stroj ne daje konstantan moment na osovini. Zamašnjak dizelskog motora i rotor generatora spojeni osovinom predstavljaju elastičan sklop sklon torzionim nihanjima.

Opći konstruktivni dijelovi električnih strojeva

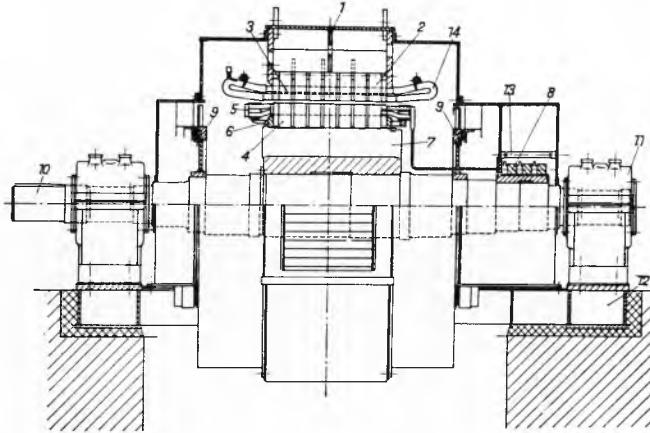
Prema ulozi koju pojedini konstruktivni elementi imaju u radu električnog stroja, oni se mogu podijeliti na (električki) aktivne i neaktivne dijelove. *Aktivni konstrukcijski dijelovi* nosioci su magnetskih i električnih polja i struja, te obuhvaćaju magnetski krug, namote i izolaciju, a *neaktivni konstrukcijski dijelovi* prihvataju i prenose mehanička naprezanja. Neki od neaktivnih elemenata sudjeluju u radu stroja (npr. osovina, ležaji, ventilator i sl.), a ostali (npr. ležajni štitovi, temeljna ploča, kućište statora i sl.)



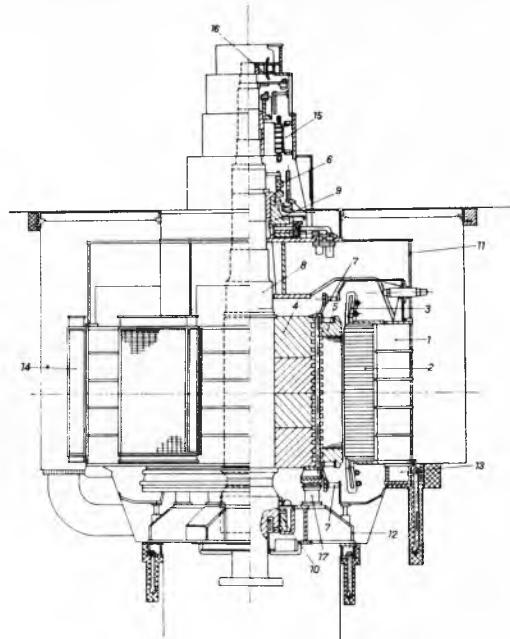
Sl. 48. Uzdužni presjek malog asinhronog motora s kliznim kolutima otvorene izvedbe. 1 Kućište statora, 2 statorski paket, 3 glava statorskog namota, 4 rotorski paket, 5 rotorski namot, 6 klizni koluti, 7 ventilator, 8 clevina, 9 ležaj, 10 držać četkica, 11 ležajni štit

daju mehaničkom sistemu stroja pogodnu čvrstoću. Svaki od aktivnih dijelova ima također određenu mehaničku čvrstoću, pa može u većoj ili manjoj mjeri preuzeti ulogu neaktivnih dijelova (npr. kućište istosmjernog stroja, jaram rotora i sl.).

Svaki se električni stroj u principu sastoji od: statora sastavljenog od aktivnog željeza, kućišta, namota s izolacijom i priključka; rotora sastavljenog od aktivnog željeza, namota s izolacijom, nosača namota, glavine, kliznih koluta ili kolektora (prema vrsti stroja), ventilatora i osovine, i ležajnih štitova s ležajima. U jednom od ležajnih štitova obično je ugrađen uređaj četkica za dovod struje rotoru (sl. 48). Na sl. 49 prikazan je horizontalni stroj veće snage. Na njemu se nalaze isti osnovni dijelovi, samo su otpali ležajni štitovi, a ležaji su montirani na temeljnoj ploči. I vertikalni stroj



Sl. 49. Uzdužni presjek asinhronog motora veće snage s kliznim prstenima. 1 Kućište statora, 2 statorski paket, 3 statorski namot, 4 rotorski paket, 5 rotorski namot, 6 nosač namota, 7 glavina rotora, 8 klizni kolut, 9 ventilator, 10 osovina, 11 ležaj, 12 temeljna ploča, 13 uređaj četkica, 14 glave statorskog namota



Sl. 50. Uzdužni presjek vertikalnog hidrogeneratora. 1 Kućište statora, 2 statorski paket, 3 glava statorskog namota, 4 rotorski paket, 5 pol s namotom, 6 klizni koluti, 7 ventilacijski kanal, 8 osovina, 9 kombinirani nosač i vodeći ležaj, 10 donji vodeći ležaj, 11 gornji nosač, 12 donji nosač, 13 temeljni blokovi, 14 vodni hladnjak, 15 glavni uzbudnik, 16 regulatorski generator

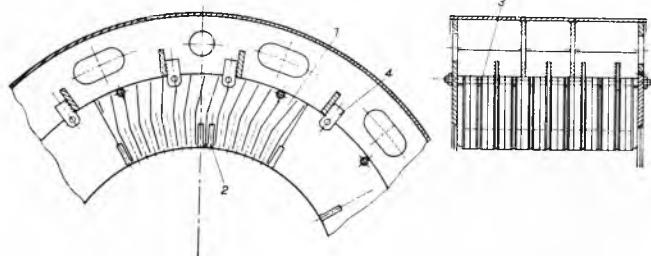
(sl. 50) ima iste osnovne elemente, ali obično nosi na sebi i pomoćne uzbudne strojeve.

Stator. *Magnetski krug statora (paket statora) izmjeničnih strojeva* redovno je izведен od dinamo-lima debljine 0,5 mm. [To je lim od specijalnog magnetnog čelika (v. Čelik, TE 3, str. 107)]. Statori manjih strojeva sastavljeni su od kružnih limenih koluta (sl. 51) koji su isječeni iz limenih ploča u jednom komadu.

Na njihovoj unutarnjoj strani isječeni su utori za smještaj statorskog namota. Stotori većih strojeva, pak, složeni su od većeg broja lumenih segmenata koji imaju također s unutarnje strane isječene utori (sl. 52). Da bi se omogućio prolaz zraka za hlađenje, u duljim strojevima paket je razdijeljen na više dionih paketa između kojih prolazi rashladni zrak.

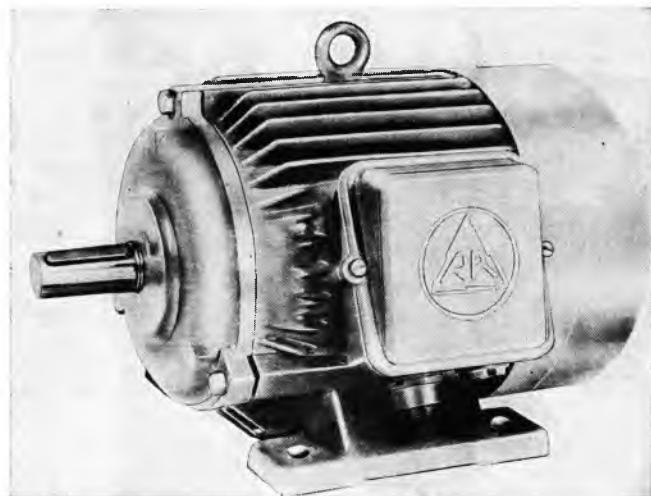
Magnetski krug istosmjernih strojeva (rjede i malih sinhronih strojeva) sastoji se od istaknutih polova, a kao jaram statora, koji magnetski povezuje polove, služi kućište statora.

Kućište statora malih asinhronih strojeva redovno je odli-

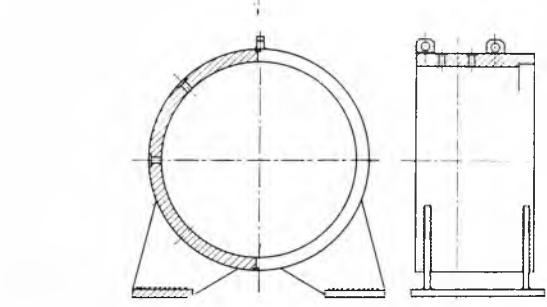


Sl. 51. Statorski lim malog asinhronog stroja. 1 Kružni prsten, 2 utori

veno od aluminijuma ili lijevanog željeza (gvožđa), a vanjska je površina obično povećana velikim brojem rebara radi boljeg hlađenja (sl. 53). Kućište istosmjernih strojeva zavarene je kon-



Sl. 52. Statorski paket većeg izmjeničnog stroja sastavljen od segmenata. 1 Segment statorskog paketa, 2 utor statora, 3 rashladni kanal, 4 pričvršćenje paketa na kućište



Sl. 53. Asinhroni motor male snage. Ventilator je smješten na desnoj strani ispod poklopca

strukcije ili odliveno od lijevanog čelika (sl. 54). Gvožđe se ovdje ne upotrebljava zbog loših magnetskih svojstava. Kućišta većih strojeva izvedena su u zavarenoj konstrukciji.

Statorski namot izmjeničnih strojeva obično je trofazan (rjeđe jednofazan), a izведен je u manjim strojevima od okrugle lakirane bakrene žice, a u većim strojevima upotrebljava se profilna izolirana žica (opredena pretežno staklenim vlaknom i lakinom). Namot je oblikovan u svitke različita oblika (sl. 55) i smješten



Sl. 55. Svitak dvoslojnog statorskog namota

je u utorima statora. U utorima statora najvećih strojeva dolaze samo jedan ili dva štapa (oni su složeni od velikog broja paralelno spojenih vodiča radi smanjenja gubitaka uslijed potiskivanja struje); u tom slučaju govoriti se o *štapnom namotu* (sl. 56).



Sl. 56. Štapovi statorskog namota sinhronog generatora velike snage

Statorski se namot izolira prema željezu na dva načina. Namot niskonaponskih strojeva (do 500 V) izoliran je utorskim oblogom (od plemenitog prešpana, leteroida i sl.), a među slojeve umeće se samo izolacioni uložak; svaki svitak namota visokonaponskih strojeva mora biti izoliran izolacionim slojem čija debljina ovisi o naponu. Izolacija visokonaponskih svitaka ili štapa može biti izvedena tako da je pravocrtni dio, tj. dio koji dolazi u utor, ovjen uglačanom ljuskom od mikafolija ili samikafolija, a glave namota su bandažirane mika-vrpcom. Takva vrsta izolacije naziva se *diskontinuiranom izolacijom*. Drugi način izvedbe predviđa kontinuirano namatanje cijelog svitka ili štapa vrpcom. To mogu biti kompaundirane mika-vrpce ili vrpce od samike impregnirane epoksidnim smolama (*kontinuirana izolacija*). Za strojeve najviših napona i velikih dužina paketa danas se sve više pravi kontinuirana izolacija s vrpcom koje se impregniraju epoksidnim smolama. Takva je izolacija vrlo otporna prema vlazi, mehaničkim i termičkim naprezanjima, a ima odlična dielektrična svojstva i veliku probojnu čvrstoću.

Glave namota, tj. dijelovi koji izvan utora spajaju vodič iz dva različna utora, moraju biti učvršćene radi savladavanja sila koje nastaju prilikom kratkog spoja. Na sl. 48, 49 i 50 vide se glave namota malog, srednjeg i velikog stroja.

Na kućištu statora obično je smještena kutija u koju su izvedeni krajevi namota i tu se spaja stroj s električnom mrežom.

Rotor. *Magnetski krug rotora asinhronih i kolektorskih strojeva* također je izведен od dinamo-lima, i to od kružnih prstena na koji su, već prema veličini stroja, ili izrađeni u jednom komadu ili sastavljeni od segmenata. U sinhronim strojevima susreću se dvije izvedbe: istaknuti polovi učvršćeni na jarmu rotora (sl. 57) ili masivni cilindrični rotor (turborotor) s utorima za smještaj

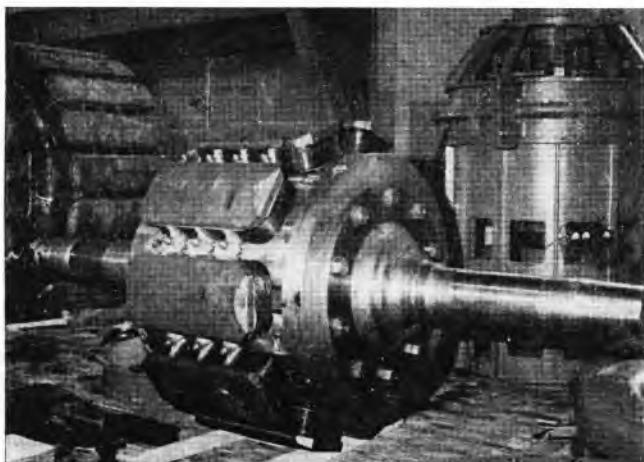
uzbudnog namota (sl. 58). Rotorski paket manjih strojeva direktno je navučen na osovinu (sl. 59), a u većim strojevima između paketa rotora i osovine dolazi glavina rotora. Na steznim pločama paketa ugrađen je nosač glave namota.

Namot rotora asinhronih i kolektorskih strojeva uložen je u utore koji su izvedeni na obodu rotora. U utorima namot je učvršćen klinovima, a glave su oslonjene na nosač namota i učvršćene bandažom od čelične žice ili staklenom vrpcom natopljenom epoksidnim smolama.

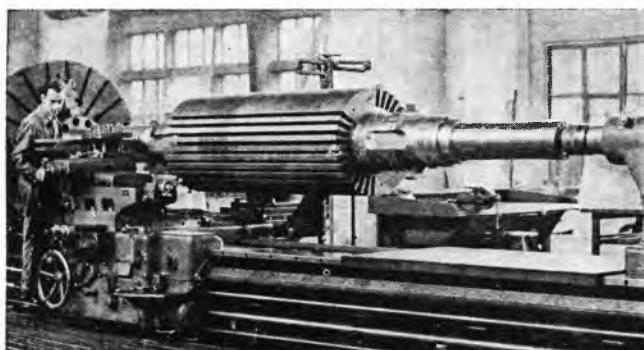
Namot rotora sinhronih strojeva s istaknutim polovima koncentričan je i montiran na polove, a namot cilindričnog rotora uložen je u utore. Utorski dio namota učvršćen je klinovima od nemagnetskih metala velike čvrstoće, a glave su učvršćene kapama od nemagnetskog čelika (sl. 60).

Rotorske struje dovode se i odvode preko kliznih koluta (u asinhronim i sinhronim strojevima) ili preko kolektora (u kolektorskim strojevima).

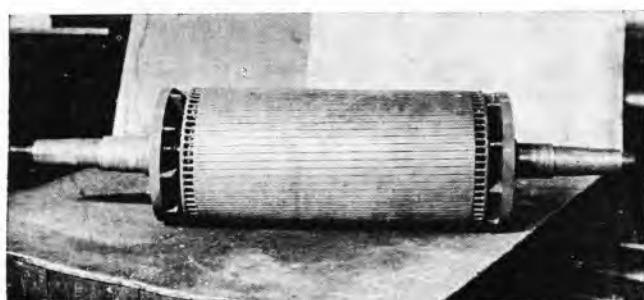
Klizni koluti obično su od mjeri ili bronce. Klizni koluti preko kojih se vodi istosmjerna struja mogu biti izvedeni i od čelika.



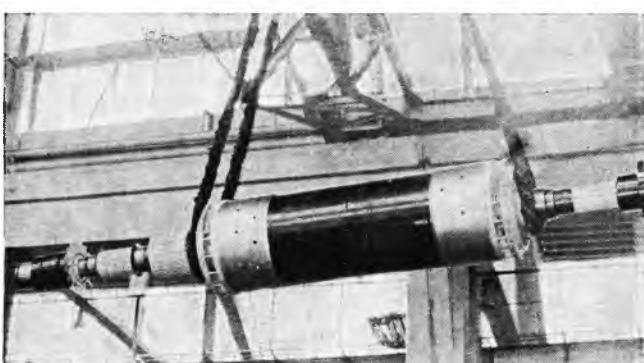
Sl. 57. Rotor sinhronog stroja s istaknutim polovima



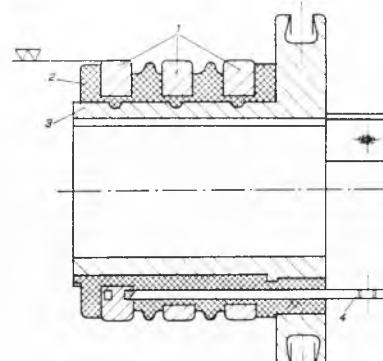
Sl. 58. Cilindrični rotor turbogeneratora za vrijeme mehaničke obrade



Sl. 59. Rotor asinhronog stroja s kratkospojnim namotom

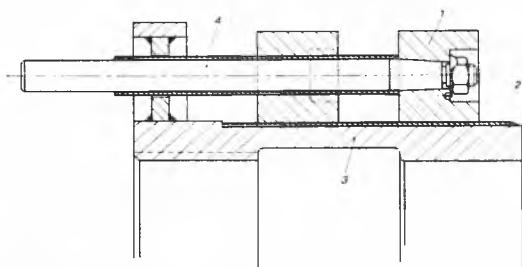


Sl. 60. Cilindrični rotor turbogeneratora spremjan za montažu. Lijevo i desno vide se kape od nemagnetičnog čelika



Sl. 61. Klizni koluti u plastičnoj masi. 1 Klizni kolut, 2 nosač od plastične mase, 3 glavina, 4 dovod struje

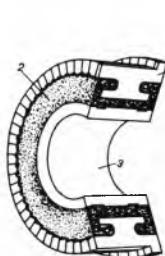
Klizni koluti malih strojeva uliveni su u nosač od plastične mase (sl. 61), a klizni koluti većih strojeva navučeni su u toplom stanju na izoliranu glavu od čelika (sl. 62). Na klizne kolute klizno-



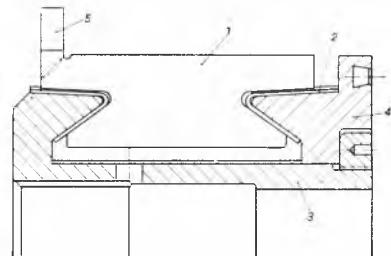
Sl. 62. Klizni koluti sinhronog generatora toplo navučeni na glavini. 1 Klizni kolut, 2 izolacija, 3 glavina, 4 spojni svornik

kolutnih asinhronih strojeva često se ugrađuje *uredaj za kratko spajanje i podizanje četkica*. Na taj se način može znatno smanjiti trošenje četkica. U vrlo velikim strojevima mogu se klizni koluti pričvrstiti izoliranim vijcima na glavu, a katkada su zbog lakše montaže i dvodijelni.

Kolektor se sastoji od velikog broja lamela koje su izradene od tvrdo vučenog bakra trapeznog presjeka, složene su u prsten i izolirano učvršćene na nosač. Na svaku je lamelu spojen jedan

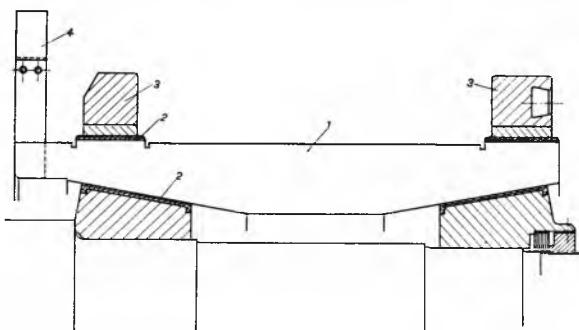


Sl. 63. Kolektor u plastičnoj masi. 1 Kolektorski oblog od lamela s lastinim repom, 2 izolacijska lamela, 3 nosač kolektora

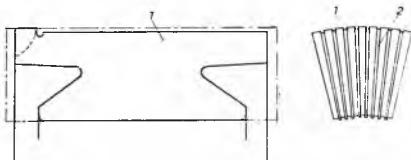


Sl. 64. Kolektor od lamela s lastinim repom. 1 Kolektorski oblog od lamela s lastinim repom, 2 izolacijska lamela, 3 nosač, 4 stezni prsten, 5 zastavica za spoj s namotom

svitak rotorskog namota. U principu se razlikuju tri osnovne konstrukcije kolektora: kolektor u plastičnoj masi, za male strojeve (sl. 63), kolektor od lamela s lastinim repom, za srednje i velike strojeve srednjih brzina vrtnje (sl. 64), i kolektor s navučenim prstenima, za veće strojeve velikih brzina vrtnje (sl. 65).

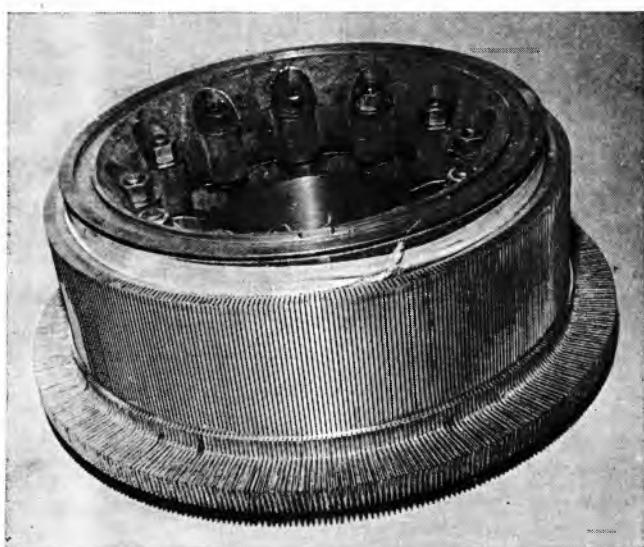


Sl. 65. Kolektor s navučenim prstenima. 1 Kolektorski oblog, 2 izolacija, 3 stezni prsten, 4 zastavica



Sl. 66. Kolektorski oblog. 1 Kolektorska lamela, 2 izolacija između lamela

Za izolaciju između lamela upotrebljavaju se ploče od mikanita s malo vezivog sredstva (sl. 66), a za izolaciju između kolektorskog obloga i nosača kolektora s lastinim repom (sl. 64) uzima se mikanit i od njega se prešaju potrebnii oblici.



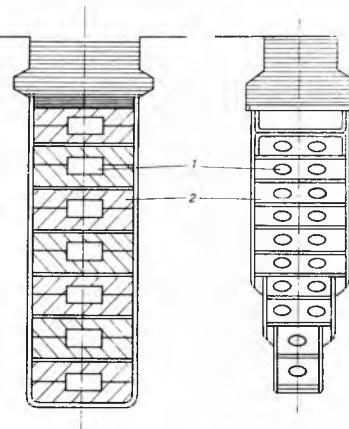
Sl. 67. Kolektor s lastinim repom spreman za montažu

Hlađenje električnih strojeva. Kako je snaga stroja određena njegovim zagrijavanjem, stroj će moći davati to veću snagu što se bolje hlađi. Većina se strojeva hlađi zrakom, a samo se veliki turbogeneratori i sinhroni kompenzatori hlađe vodikom koji se u njih uvodi kao rashladno sredstvo. (Sinhroni kompenzatori su asinhroni motori koji rade u režimu praznog hoda, obično u naduzbudenom stanju. Oni stoga djeluju kao generatori jalove snage, a primjenjuju se za kompenzaciju jalove energije u mrežama visokih napona.) U novije se vrijeme namoti velikih turbogeneratora i hidrogeneratora hlađe direktno vodom koja cirkulira kroz šuplje vodiče i tako višestruko poboljšava odvod topline.

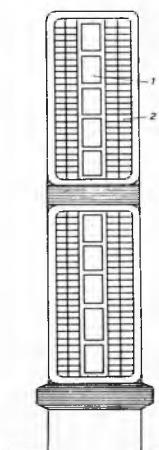
Hlađenje zrakom. U malim strojevima odvodi se toplina preko vanjske površine statora, koja se može povećati rebrima. Za bo-

lje odvođenje topline može se s vanjske strane statora postaviti ventilator koji tjeran zrak preko rebara statora (v. sl. 53). U strojeve srednjih snaga ugraduju se ventilatori koji tjeraju zrak kroz stroj i tako hlađe dijelove koji se zagrijavaju (v. sl. 49, 9). U velikim strojevima obično se struja zraka hlađi vodom pomoću ugrađenih hladnjaka i opet ubacuje u stroj (v. sl. 50, 14). Tako se stvara zatvoreni krug ventilacije i sprečava prljanje stroja prašinom ili sl.

Hlađenje vodikom. U velike turbogeneratore uvodi se vodik, koji zbog svoje male gustoće uzrokuje male gubitke trenja, a omo-



Sl. 68. Utor rotora turbogeneratora s direktno hlađenim vodičima. 1 Cijevi za prolaz plina, 2 vodiči namota



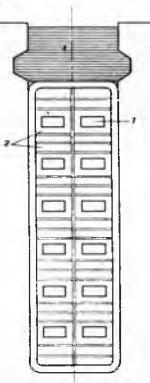
Sl. 69. Utor statorskog namota s vodičima koji se direktno hlađe vodikom. 1 Cijevi za prolaz plina, 2 vodiči namota

gujuće cirkulaciju i kroz veoma uske kanale. To je svojstvo vodika iskoristeno time što se i rotorski i statorski namot izvodi u obliku cijevi kroz koje struji plin (sl. 68 i 69). Tako se postiže vrlo efikasno hlađenje jer rashladni plin dolazi u direktni kontakt s bakrom (otuda i naziv *direktno hlađenje*). Ovakvom hlađenjem omogućena je izrada strojeva vrlo velikih snaga (600 do 1000 MW).

Direktno hlađenje vodom. Još intenzivnije hlađenje postiže se direktnim dovodom vode u baker (sl. 70). Taj se sistem hlađenja primjenjuje u sinhronim strojevima (hidro- i turbogeneratorima) vrlo velikih snaga. Destilirana ili omešana voda tjera se pumpom kroz namot, cjevovode i hladnjake. Namot se spaja sa cjevovodom s pomoću izolacionih cijevi (obično teflonskih), a radi sigurnosti od probroja, u krugu rashladne vode stalno se mjeri njezina vodljivost. Uz hlađenje vodom mogu se odvesti iz stroja znatno veće količine topline nego uz hlađenje zrakom. Pri ovakovom hlađenju zagrijavanje stroja više ne određuje snagu, već to čini nivo gubitaka koji je još dozvoljen za ekonomičan rad stroja.

Ležaji električnih strojeva. Nosač ležaja u kojima se vrti rotor malih strojeva (tamo gdje se pretežno upotrebljavaju kotrljajući ležaji) izveden je u obliku *ležajnog štit* koji je učvršćen na kućište statora (v. sl. 48), a u sebi nosi ležaj. Taj je štit pri zatvorenoj izvedbi stroja izveden tako da istovremeno zatvara stroj s objaju strana kućišta, a pri otvorenoj izvedbi ima otvore kroz koje struji rashladni zrak. Asinhroni kliznokolutni strojevi i kolektorski strojevi imaju na jednom štitu (obično sa strane suprotne pogonskoj) ugrađen nosač četkica za dovod struje u rotor.

Budući da kuglični i valjkasti ležaji obično mogu podnijeti opterećenje samo u radikalnom smjeru, treba kad na osovinu djeluju velika aksijalna opterećenja ugraditi kotrljajuće ležaje konstruirane za takvu vrstu opterećenja. Na sl. 71 prikazan je način ugradnje ležaja u ležajni štit.



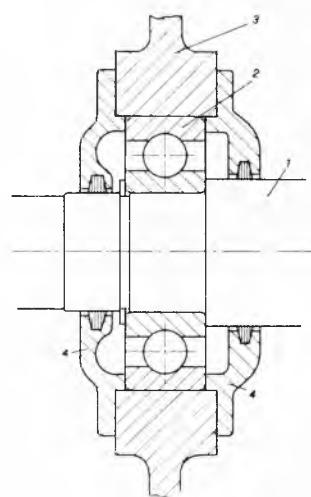
Sl. 70. Utor statorskog namota s vodičima koji se direktno hlađe vodom. 1 Kanal za prolaz rashladne vode, 2 vodiči namota

Strojevi većih snaga imaju klijne ležaje smještene u posebnim kućišima koja su učvršćena na temeljnu ploču (v. sl. 49). Vertikalni strojevi imaju ležaje ugrađene u nosače koji su montirani ili na kućištu statora ili su direktno učvršćeni u betonskom temelju (v. sl. 50).

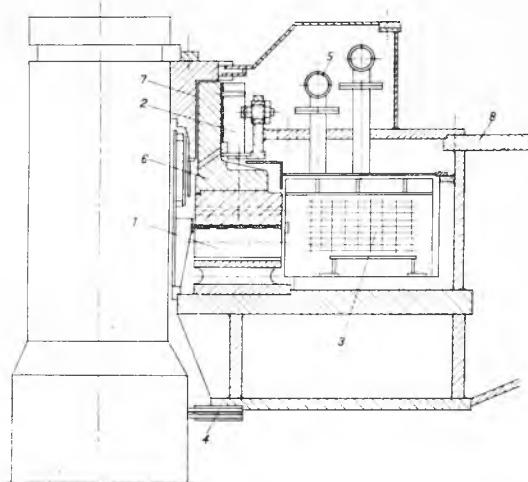
Strojevi koji moraju podnosići velike aksijalne sile (npr. vertikalni sinhroni hidrogeneratori) moraju imati specijalne aksijalne ležaje.

Često se u strojevima kombiniraju izvedbe aksijalnih i radikalnog ležaja radi ušteda prostora (sl. 72).

O konstrukciji i podmazivanju ležajeva v. *Elementi strojeva i Podmazivanje*.



Sl. 71. Ugradnja kugličnog ležaja u ležajni štit. 1 Osovina, 2 kuglični ležaj, 3 ležjni štit, 4 poklopac s brtvom



Sl. 72. Presjek kombiniranog nosečeg i vodečeg ležaja. 1 Segment nosečeg ležaja, 2 segment vodečeg ležaja, 3 hladnjak za ulje, 4 brtva, 5 cjevovod rafšladne vode, 6 zvono ležaja, 7 izolacija ležaja, 8 nosač

Spojke. Mehaničko spajanje električnog stroja s pogonskim mehanizmom ostvaruje se putem elastičnih ili krutih spojki. U malim strojevima to su odvojeni elementi, a u velikim se osovina izvodi s otkovanim prirubnicom za čvrsti spoj s pogonskim strojem.

Z. Sirotić

Pogonski problemi električnih strojeva

Električni strojevi našli su primjenu i upotrebu na svim poljima ljudske djelatnosti i u isto su vrijeme snažno utjecali na razvoj proizvodnih snaga ljudskog društva. Prvi primjenjeni električni strojevi bili su generatori za napajanje rasvjetnih mreža i telekomunikacionih aparatura. Prikladnost elektromotora da daje mehanički rad s posebno povoljnim tehničkim i ekonomskim svojstvima postavila je elektromotor na prvo mjesto u popisu davalaca mehaničkog rada. Prema procjenama, preko 90% mehaničkog rada kojim se koristi čovječanstvo daju elektromotori, tvoreći na taj način osnovu današnje proizvodnosti i standarda. Zahtjev za sve većim količinama mehaničkog rada sa sve većim brojem sve težih uvjeta doveo je do golemih elektroenergetskih sistema u kojima su generatori ulazne, a motori najčešće izlazne tačke.

Generatori su se razvili do golemih jedinica kojima se snage već približavaju jedncm milionu kilovoltampera. Motori, opet, moraju zadovoljavati sve raznovrsnije potrebe radnih mehanizama radeći u sve raznovrsnijim režimima pogona i u sve raznovrsnijim prilikama okoline. Električni stroj je uspio slijediti razvoj koji je dijelom i sam uzrokao, te je pokazao sasvim izuzetna svojstva prilagodljivosti teškim i mnogobrojnim zahtjevima.

Pogonski režimi električnih strojeva mogu se grubo podijeliti na statičke i dinamičke. I trenutno stanje u kome se neki električni stroj nalazi može biti statičko ili dinamičko. U *statičkom stanju* električnog stroja ne mijenjaju se (vremenski) njegove osnovne električne, mehaničke i magnetske veličine (napon, struja, brzina vrtnje, magnetski tok itd.). Za *dinamičko stanje* karakteristična je upravo promjena tih veličina, i to, posebno, za dinamičko stanje generatora promjena napona stezaljki i snage, a za dinamičko stanje motora promjena brzine vrtnje i okretnog momenta. Uslijed unutarnje povezanosti svih tih veličina, one se dakako sve mijenjaju ako se mijenja jedna od njih, ali upravo napon i snaga generatora, odn. brzina vrtnje i okretni moment motora, imaju pri promatranju ponašanja električnih strojeva sasvim posebni značaj. Trajno statičko stanje — *statički režim rada* — naziva se često i *trajnim pogonom*. Dinamičko stanje naziva se često i *prelaznom pojmom*, pa je *dinamički režim* režim čestih prelaznih pojava. Jasno je da i svaki trajni pogon ima bar dvije prelazne pojave: na svom početku uključenje i dovođenje u statičko stanje, a na kraju isključenje i dovođenje u stanje mirovanja. Zbog toga gornje definicije treba shvatiti tako da dinamički režim obiluje prelaznim pojavama, a statički ih ima malo.

Prve primjene električnih strojeva bile su u trajnom radu. Takve su se primjene zadržale i do danas, i njihov se broj znatno proširio, posebno primjene generatora. Razvoj tehnike traži sve veći broj primjena električnih strojeva sa sve raznovrsnijim prelaznim pojavama, dokle sve više dinamičkih režima koje treba da svladava električni stroj. To je posebno istaknuto u primjeni električnih motora, kao rezultat potrebe da se mehanički rad daje u tačno programiranom rasporedu, a ne samo u trajnom radu. Povezivanjem proizvodno-tehnoloških primjena u cjeline i automatiziranjem takvih procesa raste broj vrsta dinamičkih režima električnih motora.

Opterećenje električnog stroja ocjenjuje se najčešće pojmom njegova zagrijavanja (vidi na strani 165). Režim koji izaziva zagrijavanje veće od dozvoljenog preoptereće stroj; u režimu koji izaziva zagrijavanje manje od dozvoljenog stroj nije potpuno iskoristen. Kad stroj uopće nije opterećen, nalazi se u *praznom hodu*. To je generator na čije stezaljke nije priključeno nikakvo trošilo ili motor čijoj se vrtnji ne suprotstavlja nikakav moment opterećenja na osovini. Karakteristično je za električni stroj u praznom hodu da ne predaje nikakvu snagu, pa u tom stanju ni ne pretvara nikakvu energiju, iako je za to potpuno sposoban i spreman. U njega ulazi minimalna energija i ona se troši samo na održanje tog stanja. *Kratki spoj* je posebno stanje električnog stroja. Sprječi li se vrtnja električnog motora time što se on vanjskom silom zakoči, ili premoste li se stezaljke generatora vrlo malim otporom, stroj je prisiljen da svu energiju koju prima utroši unutar vlastitog tijela. Budući da ulazu energije u stroj ne slijedi odgovarajući izlaz energije iz stroja, sva se energija troši na gubitke i stroj može biti snažno toplinski preopterećen. Iako po vanjskom efektu to stanje liči na prazni hod (stroj ne predaje nikakvu energiju), postoji golema razlika u toplinskem opterećenju stroja, tako da se obično ne može dopustiti dulji rad stroja u kratkom spolu. Važan je još pojam *udarnog opterećenja*. Električni stroj prilagođava se uvijek onome što se na njegovom izlazu (na stezaljkama generatora, na osovini motora) traži; mijenja li se opterećenje na izlazu (otpori trošila generatora ili moment opterećenja motora) mijenja se i snaga stroja i energija koju pretvara. Promijeni li se opterećenje u vrlo kratkom vremenu za vrlo velik iznos, dolazi do »*udarca*«. Stroj mora u kratko vrijeme reagirati velikom promjenom snage. Kratki spoj i udarna opterećenja izlazu stroj i njegove dijelove ne samo velikim toplinskim naprezanjima, uslijed velikih struja kroz namote, nego i velikim mehaničkim naprezanjima u njegovim namotima i mehaničkim dijelovima zbog velikih sila koje se pojavljuju.

Sistem uzbude električnih strojeva. Kako je ranije rečeno, magnetsko je polje nosilac pretvorbe mehaničke energije u električnu i obratno. U bilo kojem trenutku rada električnog stroja magnetsko je polje sagrađeno protjecanjem Θ koje daje zajedničko djelovanje protjecanja pojedinačnih namota. Ipak je jedan od tih namota u stroju onaj čije je protjecanje prauzrok nastanku polja. Taj se namot zove *uzbudni namot*, a njegovo protjecanje *uzbuda*. (U nekim varijantama izvedbe električnih strojeva može

biti i više uzbudnih namota, a može umjesto uzbudnog namota postojati i permanentni magnet ili kombinacija magneta i namota.) Ostali namoti stroja, kojima uzbuda nije osnovna namjena, svojim se protjecanjem pridružuju osnovnom protjecanju uzbude, već prema geometrijskom položaju namota i vremenskom toku strujā, i tako tvore magnetski tok stroja. U praznom hodu, kad tim namotima uglavnom ne teku struje, magnetski je tok posljedica djelovanja uzbudnog namota. Pod opterećenjem, kad poteku struje u svim namotima stroja, te uslijed toga dolazi do promjene magnetskog toka, može se prikladnom promjenom struje u uzbudnom namotu vratiti magnetski tok na prvobitnu vrijednost što ju je imao u praznom hodu. Tako se npr. magnetski tok synchronih generatora održava konstantnim, bez obzira na opterećenje, da bi se postigao konstantan napon na stezaljkama generatora. Služi li uzbudni namot samo za stvaranje uzbude, što je slučaj kod mnogih vrsta strojeva, posebno generatora, kroz njega ne teče energija koja se pretvara u mehaničku. Zato je i snaga koju troši uzbudni namot mala, obično sasvim neznatan dio snage električnog stroja ($\sim 1\cdots 2\%$). Takav uzbudni namot ima redovito i svoj poseban izvor energije, različit prema *sistemu uzbude*. Taj izvor energije može biti poseban mali električni stroj (zvan uzbudnik), akumulatorska baterija ili poseban priključak na neku raspoloživu stranu mrežu. Ako ta mreža po svojim parametrima nije pogodna za uzbudu, može se uzbuda priključiti preko nekog, obično statičkog (elektroničkog), pretvarača. Kod električnih generatora može se izvor uzbude uzeti s vlastitih stezaljki, kod nekih direktno, kod drugih preko pretvarača. Takav se sistem naziva *samouzbuđnim*.

Neke vrste električnih strojeva nemaju poseban uzbudni namot (npr. asinhroni motor); njihova se uzbudna struja obično ne može vanjskim utjecajem odvojeno mijenjati. Takvi uzbudni namoti služe istovremeno i za uzbudu i za ulaz ili izlaz električne energije koja se pretvara.

Regulacija električnih strojeva. Budući da se preko uzbude upravlja poljem električnog stroja, može se tim putem upravljati i pogonskim izlaznim veličinama stroja. Kod generatora s konstantnom brzinom vrtnje, a to su generatori normalnih mreža, napon je proporcionalan magnetskom polju, pa se upravljači uzbudom upravlja i naponom generatora. Istosmernom motoru može se mijenjati uzbuda, pa se može uzbudom mijenjati brzina vrtnje. Upravljanje naponom generatora i brzinom vrtnje motora naziva se često *regulacijom napona ili brzine vrtnje*. Regulacija napona generatora izvodi se redovito promjenom uzbude, regulacija brzine vrtnje motora, pak, može se postići i drugim zahvatima, npr. promjenom napona na priključnim stezaljkama motora ili promjenom frekvencije dovedenog napona.

Postoje u principu dva načina regulacije. Jedan je način *ručna regulacija*, kad se rukom podešava regulacioni element (najčešće otpornik). Drugi je način, danas najčešći, kad posebni automatski uređaj podešava regulacioni element na onu vrijednost koja na izlazu iz električnog stroja daje vrijednost regulirane veličine (napona, brzine vrtnje) koja se traži (*automatska regulacija*).

Kvarovi električnih strojeva mogu se podijeliti na kvarove mehaničkih dijelova i kvarove namota. Od kvarova mehaničkih dijelova najčešći su kvarovi na ležajima i osovini. Na namotima nastaju kvarovi probaja ili uništenja izolacije na jednom ili više mesta, tako da može doći do »spoja s masom« ili »zemnog spoja«, do spoja među zavojima ili među namotima, ili do mehaničkog uništenja namota. Među najčešće *neelektrične uroke* kvarova idu (osim pogrešaka u izvedbi i montaži) termički i termomehanički uzroci (uslijed neprestanog sticanja i rastezanja dijelova stroja kako se hlađe i ugrijavaju), zatim vibracije i rezonantne pojave među pojedinim dijelovima stroja ili agregata i vanjski uzroci (nepodobna, agresivna atmosfera i okolina, vanjski udarci itd.). Od termomehaničkog djelovanja veliki strojevi (koji su im i jače podyrgnuti) štite se katkada ugradnjom posebnih gridača koji odražavaju približno konstantnu temperaturu unutar stroja. Najčešći su *električni uroke* kvarova prenapani nastali u samom stroju, priključnim vodovima ili mreži, strujna preopterećenja namota ili sile izazvane prevelikim strujama.

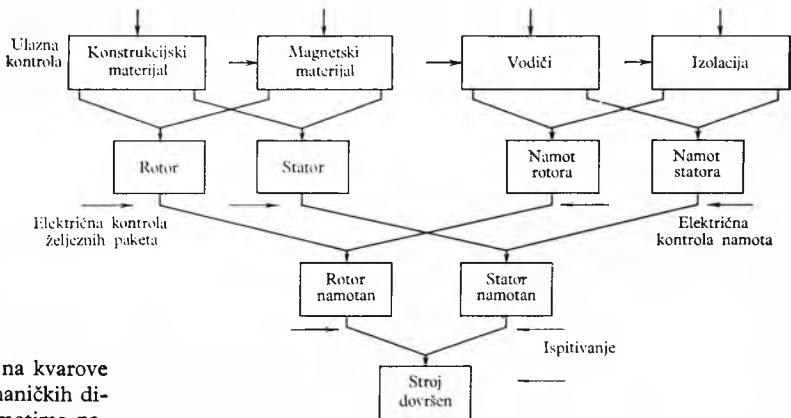
Da se spriječe kvarovi u stroju ili širenje već nastalog kvara i uništenje stroja kao i štetan utjecaj kvara u stroju na mrežu, ugraduju se ili dodaju električnim strojevima zaštitni uređaji i uređaji koji upozoravaju na nenormalno stanje. Zaštitni uređaji (v. *Zaštitni električni uređaji*) registriraju nenormalno stanje i isklapaju stroj iz mreže. Raznovrsni zaštitni uređaji registriraju prevelike struje, previsoka zagrijanja namota, nastajanje spoja s masom itd., i nakon nekog podešenog vremena, ovisno često o vrsti kvara, daju komandu za isključenje. Tako su se razvile različite zaštite: prekostrujna, termička i sl. Kakvim će se sve zaštitaštiti stroj ovisi o njegovoj veličini, vrsti, namjeni, važnosti za pogon — dakle uglavnom o ekonomskim faktorima.

B. Jurković

Ispitivanje električnih strojeva

Pravovremeno otkrivanje grešaka u materijalu ili izradi električnih strojeva omogućuje pravovremeno otklanjanje grešaka i time znatnu uštedu sredstava i vremena. Zato kontrole materijala, radnih operacija i dogotovljenih dijelova počinju s ulazom materijala u skladišta i odvijaju se paralelno s proizvodnjom procesom (sl. 73). Cilj je svih tih kontrola u toku proizvodnje da se provjeri kvalitet svih dijelova stroja i osigura njegovo ispravno funkcioniranje. Što je stroj veći to su više opravdane opsežnije i temeljitije kontrole; ispitivanja manjih i jeftinijih strojeva mogu biti jednostavnija. Po dovršenju stroja proširuju se ispitivanja od kontrole osnovne sposobnosti funkcioniranja na određivanje karakterističnih podataka važnih za pogon i funkcionalnih ovisnosti između pojedinih veličina koje određuju pogonsko stanje stroja. Često se prilikom ispitivanja izvršavaju i manji zahvati na stroju, kako bi se korigirale njegove karakteristike. U serijskoj proizvodnji, tj. u proizvodnji većeg broja jednakih strojeva, istim se postupcima detaljno ispitivanje provodi samo na pojedinim primjerima, predstavnici određenog tipa stroja, a ostali se podvrgavaju samo definitivnoj kontroli funkcioniranja; broj odabranih primjeraka za ispitivanje ovisi o veličini stroja i važnosti njegove namjene. (V. *Statistička kontrola kvaliteta*.)

Ispitivanja može vršiti proizvođač za sebe ili predstavnikom naručioca, radi dokaza da stroj odgovara ugovorenim uvjetima (primopredajna ispitivanja). Napokon, ispitivanja se



Sl. 73. Ispitivanje u toku proizvodnje

mogu vršiti i za vrijeme pogona stroja, kako bi se pronašli i otisknili eventualni nastali kvarovi.

Naponsko ispitivanje izolacije ide među najvažnije kontrole kvaliteta; njime se utvrđuje da li je izolacija stroja sposobna da izdrži naponska naprezanja u pogonu i prepone pri pogonskim smetnjama. Pojedini svici ili štapovi većih strojeva ispituju se još prije ulaganja u utore, no konačno ispitivanje izolacije provodi se na gotovom i montiranom stroju. To se ispitivanje sastoji od pokusa izmjeničnim naponom narinutim između ispitivanog namota, s jedne strane, i svih ostalih dijelova stroja, s druge strane. Ispitni napon određen je propisima pojedinih zemalja (JUS u nas, ASA u USA, GOST u SSSR, VDE u Njemačkoj, BS u Engleskoj itd.), koji su danas već prilično uskla-

deni s preporukama Internacionale elektrotehničke komisije (IEC). Efektivna vrijednost ispitnog napona određena je u ovisnosti o nazivnom naponu U i veličini stroja; tako npr. iznosi za glavne namote strojeva do 1 kVA snage i do 100 V napona: $500 + 2 U$; do 10 000 kVA snage: $1000 + 2 U$, ali bar 1500 V; iznad 10 000 kVA, do 2000 V: $1000 + 2 U$; iznad 10 000 kVA, 2000...6000 V: $2,5 U$; iznad 6000 do 17 000 V: $3000 + 2 U$; iznad 17 000 V: po posebnom utanačenju.

Oblik ispitnog napona treba da je sinus, a trajanje pokusa od postizanja punog ispitnog napona do isključivanja treba da bude jedna minuta. Smatra se da je namot izdržao naponski pokus ako ne dođe ni do probroja ni do preskoka bilo na kojem mjeru.

Umjesto ranije uobičajenog ispitivanja izolacije među zavojima pogonom stroja pod naponom povišenim za 30...50%, danas se prelazi na to da se ispituje do uništenja određeni broj namotnih sumica odabranih svitaka prije ugradnje. Uništenjem ispitnih svitaka dobiva se mnogo bolja slika o kvalitetu izolacije među zavojima.

Vitlanje zove se održavanje brzine vrtnje rotora kroz 2 minute na povišenoj vrijednosti. Njime se kontrolira mehanička izrada rotora. Brzina vitlanja generatora tjeranog vodnom ili plinskom turbinom treba da je jednaka »brzini pobjega«, tj. maksimalnoj brzini koju dosiže pogonska turbina kad ispadne opterećenje, a privod ostane otvoren. Isto tako za strojeve kojima se može dogoditi da ih tjeri teret, npr. za dizaljne motore, maksimalnu pri tom moguću brzinu treba uzeti kao brzinu vitlanja. Za sve ostale strojeve brzina vitlanja iznosi 120% maksimalne nazivne ili maksimalne u pogonu predviđene brzine. Pri vitlanju ne smije doći do mehaničkih deformacija štetnih za rad stroja niti do oštećenja izolacije. Naposko ispitivanje rotorskih namota izvodi se zato nakon pokusa vitlanja. Ako materijal prilikom vitlanja popusti, dolazi do eksplozije rotora, pri čemu se oslobadaju vrlo velike količine kinetičke energije, pa su potrebne mjeru sigurnosti da se izbjegnu veće štete i da se ne ugroze ljudski životi.

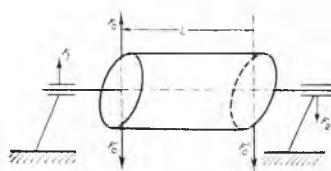
Prije pristupanja vitlanju rotor mora biti dobro *izbalansiran*. Nesimetrija mase — npr. višak mase Δm na udaljenosti x od osi rotacije — daje pri rotaciji centrifugalnu silu $F_c = \Delta m x \omega^2$. Na stroju je konstrukcijom predviđena mogućnost dodavanja utega za balansiranje na obje čeone strane rotora, u udaljenosti r od osi rotora. Potrebno je dodati masu $\Delta m'$ takvu da njome izazvana centrifugalna sila F'_c ili F''_c bude po veličini jednaka, a po smjeru suprotna sili F_c (sl. 74):

$$\Delta m' r \omega^2 = \Delta m x \omega^2.$$

Doda li se nasuprot mjestu na obodu rotora koje se postavlja u najniži položaj toliko utega da rotor ostaje miran bilo u kojem položaju, kaže se da je on *statički izbalansiran*. Pri tome se može dogoditi da sila F_c djeluje npr.

u jednom čelu rotora, a sila balansnog utega F'_c u drugom. Statički je takav rotor izbalansiran, ali pri rotaciji pojavit će se moment $M = F_c L$ koji rotira, te i sile u oba ležaja F_1 , F_2 rotiraju i uzrokuju vibracije ležaja opasne za sigurnost pogona. Nije zato dovoljno postići prvi uvjet da bude $\sum F_c = 0$, nego mora biti ispunjen i drugi uvjet $\Sigma M = 0$, tj. nije

važno samo koliko je utega za balansiranje i na kojem mjestu oboda dodato, nego i kako su utezi raspoređeni na objema čeonim plohama. Postupak pri kojemu su kompenzirane ne samo sile nego i momenti zove se *dinamičko balansiranje*. Njegova je važnost to veća što je omjer duljine prema promjeru rotora veći. Pri određivanju sile u ležajima po veličini i smjeru primjenjuje se mjerjenje vibracija ležaja po veličini i fazi, pa se specijalnim uređajima za balansiranje može izvršiti dinamičko balansiranje rotora na licu mjesta, a za manje rotore na stroju za balansiranje. Čitav postupak traje nekoliko trenutaka.



Sl. 74. Statičko i dinamičko balansiranje

Pokus praznog hoda i pokus kratkog spoja dva su mjerena koja daju podatke o karakterističnim vrijednostima stroja. U praznom hodu stroj je neopterećen, što omogućava mjerjenje ovisnosti magnetskog toka o uzbudnoj struji (određivanje tzv. krivulje zasićenja ili krivulje praznog hoda), pri čemu se umjesto magnetskog toka mjeri inducirani napon koji mu je proporcionalan. U praznom hodu mjeri se i odgovarajući dio gubitaka. U stanju kratkog spoja (str. 171) mjeri se ovisnost struje u glavnom namotu o uzbudnoj struji ili o dovedenom naponu. Ova mjerjenja daju podatke o impedancijama, reaktancijama i omskim otporima strujnih krugova stroja i opet o pripadnom dijelu gubitaka.

Karakteristike opterećenja pokazuju ponašanje stroja pod opterećenjem, uz održavanje određenih normalnih uvjeta, kao npr. konstantnog napona i frekvencije mreže na koju je motor priključen ili konstantne brzine kojom pogonski stroj tjeri generator. Koje veličine se pri tome mjeri i koje ovisnosti karakteristike prikazuju ovisi o vrsti stroja i njegovoj namjeni (v. poglavljia Asinhroni, Sinhroni, Kolektorski strojevi, u ovom članku). Ako se određuju pokusima medusobno ovisnosti struja, napona, snaga itd. u stacionarnom stanju, govori se o *statičkim karakteristikama*. Za razliku od toga *dinamičke karakteristike* prikazuju ovisnost veličina o vremenu pri određenim naglim promjenama u režimu rada stroja, dakle za vrijeme prelaznih pojava.

Određivanje gubitaka i korisnosti električnog stroja može se izvršiti direktnom ili indirektnom metodom. *Direktnom metodom* određuje se primljena snaga P_1 i predana snaga P_2 izravno mjerjenjem, pa se gubici P_g dobivaju kao razlika: $P_g = P_1 - P_2$. Tačnost direktnе metode zadovoljava samo kad je korisnost mala, tj. kad su gubici veliki. Pri *indirektnoj metodi* određuju se mjerjenjem gubici P_g i jedna od obiju snaga P_1 ili P_2 , obično ona koja se može direktno mjeriti električki. Gubici P_g mogu se odrediti u ukupnom iznosu (metodama povratnog rada, kalorimetričkim metodama) ili, što je najčešće, metodom mjerjenja pojedinačnih gubitaka (sumiranjem gubitaka koji su određeni mjerjenjima u praznom hodu i kratkom spoju, mjerjenjima otpora itd.). Pri velikim vrijednostima korisnosti najtačnija je metoda mjerjenja pojedinačnih gubitaka.

Ispitivanje zagrijavanja električnog stroja i postignute nadtemperaturе u stacionarnom stanju pri određenom režimu rada vrši se pokusom zagrijavanja. Temperature namota određuju se usporedbom mjerjenih otpora hladnog namota R_h na poznatoj temperaturi ϑ_h i otpora zagrijanog namota R_t na temperaturi ϑ_t koja se na osnovu mjerilnih podataka računski određuje iz izraza:

$$\frac{\vartheta_t + \vartheta_h}{\vartheta_t + \vartheta_h} = \frac{R_t}{R_h}.$$

U tom izrazu ϑ_t znači razliku između nule temperaturne skale i temperature na kojoj linearno ekstrapolirana vrijednost otpora postaje jednak nuli. Ta je temperatura npr. za bakar $-235^\circ C$. Ako se temperatura okoline (zraka u strojarnici ili rashladnog sredstva u rashladnom sistemu stroja) za vrijeme pogona i trajanja mjerjenja promjenila od ϑ_h na ϑ_1 , nadtemperatura zagrijanog namota Θ iznad temperature okoline ili rashladnog sredstva iznosi

$$\Theta = \vartheta_t - \vartheta_1 = \frac{R_t - R_h}{R_h} (\vartheta_0 + \vartheta_h) + \vartheta_h - \vartheta_1.$$

Umjesto otpora samog namota može se mjeriti otpor otporničkih termosondi ugradenih u utore između gornjeg i donjeg sloja namota. Osim otpornika kao sonde upotrebljavaju se i termoelementi koji daju napon ovisan o razlici između temperaturâ u tački mjerjenja i u tački poznate temperature (npr. temperature prostorije). Sonde se ugraduju na više mjesta u stroju i omogućuju uzaštopno očitanje temperature na istom instrumentu pomoću preklopke. Za temperature površine, rashladnog sredstva (zraka, vode) upotrebljavaju se živini i alkoholni termometri. Iz povećanja otpora namota dobiva se srednja vrijednost nadtemperature namota, a sonde i termometri daju lokalne temperature, ali na površini izolacije, a ne u samom bakru. Zato i propisi definiraju dopuštene nadtemperaturе u ovisnosti o metodi mjerjenja. Pokus zagrijavanja mora se produžiti dok se ne postigne stacionarno stanje nadtemperaturе.

Ventilaciona mjerena provode se radi određivanja količine rashladnog zraka, obično određivanjem brzine zraka v pomoću anemometra za nekoliko mjesta istog presjeka strujanja i izračunavanjem volumena zraka kao umnoška srednje brzine v_{sr} i presjeka S :

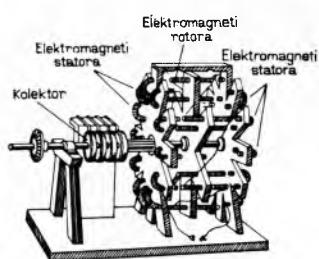
$$V = S v_{sr}.$$

Mjerjenje količine rashladne vode izvodi se vodomjerom i satom ili mjerjenjem vremena potrebnog za punjenje posude poznatog volumena.

R. Wolf

KOLEKTORSKI ELEKTRIČNI STROJEVI

Kolektorski strojevi bili su prvi električni strojevi. M. H. Jacobi je već 1838 godine u Petrogradu konstruirao prvi istosmjerni motor (sl. 75) koji je tijerao po Nevi čamac sa 14 osoba. Struju je uzimao iz galvanske baterije. Taj je motor radio na principu privlačne sile među elektromagnetima koji su bili učvršćeni na drvenoj konstrukciji statora i rotora. Kad su se elektromagneti rotora približili suprotnim polovima elektromagneta statora, promijenio se na rotoru pravac struje i elektromagneti rotora bili su privučeni od slijedećih elektromagneta statora, pa se je rotor na taj način stalno vrtio u istom smjeru. Na statoru ih je trebalo napajati izmjeničnom strujom. Promjenu istosmjerne struje u izmjeničnu posredovao je primitivni kolektor na osovinu rotora.



Sl. 75. Jacobijev istosmjerni motor (prema starom originalu)

su elektromagneti bili napajani istosmjernom strujom, a na rotoru ih je trebalo napajati izmjeničnom strujom. Promjenu istosmjerne struje u izmjeničnu posredovao je primitivni kolektor na osovinu rotora.

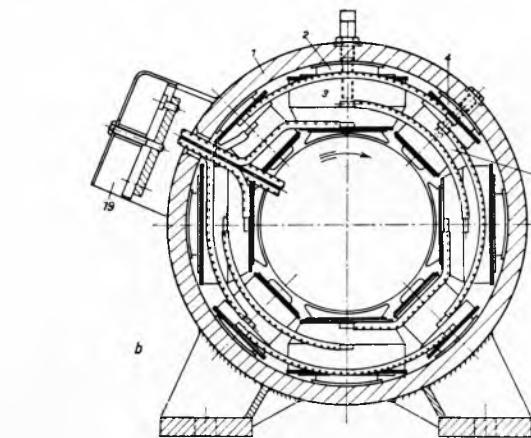
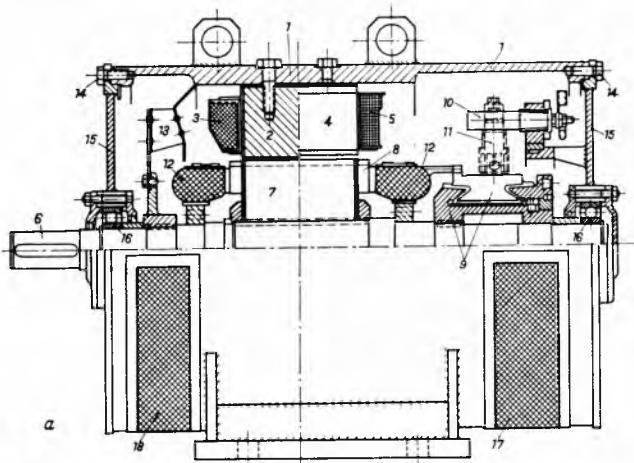
Istosmjerni je stroj doživio svoj osnovni razvoj u XIX st.; početkom XX st. bili su razvijeni svi bitni elementi njegovog oblika, a time također mehanički i električni dijelovi električnih strojeva uopće. Prva šira primjena istosmjernih strojeva bili su generatori u električnim centralama, vrlo malim za današnje pojmove. (Ti prvi generatori nazivali su se *dynamo-strojevima*). Elektromotorni pogon istosmjernim strojevima počeo se primjenjivati tek nešto kasnije.

Potkraj prošlog stoljeća počela se razvijati tehnika izmjenične struje, koja ima prednost pri prijenosu na daljinu i pruža mogućnost primjene jeftinijih asinhronih motora, tj. motora bez kolektora. Uspinko tim prednostima prošlo je pedesetak godina prije nego je izmjenični sistem svadgje prodrio. U prvim desetljećima ovog stoljeća izgledalo je da će istosmjerni strojevi praktički nestati iz upotrebe. Međutim, novo razdoblje tehnike, razdoblje automacije, traži od elektromotornih pogona mogućnost fine i brze regulacije brzine vrtnje. Tom zahtjevu daleko bolje odgovaraju istosmjerni motori, a u mnogim slučajevima oni predstavljaju i jedino moguće rješenje. Istovremeno s razvojem automacije razvila se i tehniku poluvodiča, koja već danas obećava dalji preobrazaj nekih područja elektrotehnike. Poluvodički ispravljači omogućavaju ispravljanje izmjeničnih struja u istosmjernu s izvanredno visokim faktorom korisnosti, do 99,5%, a upravljavljivi poluvodički ispravljači osim toga omogućuju jeftinu i brzo mijenjanje istosmjernog napona kojim se napaja istosmjerni motor. Za istosmjerne električne strojeve nastupa stoga nova era, ne istosmjernih sistema, ne istosmjernih generatora, nego istosmjernih elektromotornih pogona.

Osnove istosmjernih (kolektorskih) strojeva

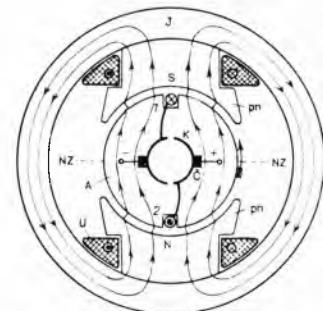
Principijelna izvedba (manjeg) istosmjernog stroja prikazana je na sl. 76. Kućište statora 1 (čiji je sastavni dio i jaram statora) s nogama zavarene je konstrukcije ili je izrađeno od lijevanog čelika. Na unutarnjoj strani jarma učvršćeni su glavni polovi 2 s ugradenim namotima 3 i pomoćni polovi 4 s njihovim namotima 5. Jaram s polovima predstavlja stator stroja. Na osovinu rotora 6 nalazi se rotorski paket 7 sastavljen od dinamo-limova, a u utorima tog paketa nalazi se armaturni namot 8 sastavljen od svitaka čiji su krajevi priključeni na pojedine lamele kolektora 9. Glave namota rotora 12 zbog centrifugalne sile učvršćene su bandažama od nemagnetskog materijala. Svitke u utorima drže ili klinovi na vrhu utora ili bandaže postavljene mjestimično na obodu rotora. Na ležajnom štitu 15 učvršćeni su svornjaci 10 koji nose držače četkica 11. Na osovinu rotora nalazi se i ventilator 13 koji kroz stroj tjeru zrak za hlađenje. Kolektor je sastavljen od pojedinih lamela koje su izolirane jedna od druge izolacijom od kolektorskog mikanita, a prema glavini mika-izolacijom. S obje strane statora postavljeni su na centriranim rubovima i učvršćeni vijcima 14 ležajni štitovi 15. Kućište statora ima dolje s jedne strane otvore 17 za ulaz hladnog zraka a s druge strane otvore 18 za izlaz toplog zraka. Otvor su zaštićeni mrežicom. U oba ležajna štita ugrađeni su ležaji 16 u kojima se vrti osovina rotora.

Istosmjerni strojevi različitih veličina s različitim namjenama mogu imati i nešto drugačije oblikovane mehaničke dijelove, ali je osnovni raspored mehaničkih, a posebno električnih dijelova uviјek sličan rasporedu u prikazanoj izvedbi.



Sl. 76. Sastavni dijelovi istosmjernog stroja. a) Uzdužni presjek, b) poprečni presjek; 1 kućište, 2 glavni pol., 3 namot glavnih polova, 4 pomoćni pol., 5 namot pomoćnih polova, 6 osovina rotora, 7 rotorski paket, 8 namot rotora, 9 kolektor, 10 svornjaci za držače četkica, 11 držače četkica, 12 glave namota, 13 ventilator, 14 vijci za učvršćenje ležajnih štitova, 15 ležajni štitovi, 16 ležaji, 17 otvor za ulaz zraka, 18 otvor za izlaz zraka, 19 priključna kutija

Fizikalna slika istosmjernog električnog stroja. Na sl. 77 shematski je prikazan presjek vrlo pojednostavljenog dvo-polnog istosmjernog stroja. Na uzbudnom namotu U označen je smjer uzbudne struje. (Kružić s tačkom označava vodič u kome teče struja iz plohe slike, a kružić s kosim križem vodič u kome teče struja u tu plohu.) Amperzavoj tog namota uzbudjuje magnetski tok koji se rasprostire polovima N, S s pripadnim polnim nastavcima pn, jarmom J, željezom armature A i zračnim rasporom između armature rotora i polnih nastavaka. Na slici je magnetski tok predstavljen silnicama koje slijede navedeni put. Na armaturi (rotoru) su radi jednostavnosti nacrtana samo dva dijamentalno suprotna utora 1 i 2 u koje su uložene odgovarajuće strane jedinog svitka armaturnog namota (u stvarnom stroju broj utora i svitaka je daleko veći). Svitak je radi jednostavnosti prikazan s jednim zavojem (u stvarnom stroju broj zavoja pojedinog

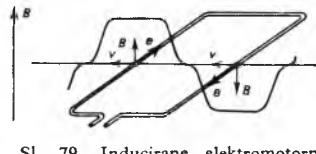


Sl. 77. Shematski presjek pojednostavljenog dvo-polnog istosmjernog stroja (oznake odgovaraju generatorskom radu). J jaram, S i N glavni polovi, U uzbudni namot glavnih polova, pn polni nastavci, A armatura, K kolektor, Č četkica, NZ neutralna zona, 1 i 2 pojednostavljeni namot rotora

svitka često je veći). Krajevi namota spojeni su na kolektor K, koji u ovom slučaju predstavljaju dva poluprstena izolirana jedan prema drugom i prema masi. Na kolektor naliježu četkice Č, koje su izvodima spojene na stezaljke armaturnog namota, označene na slici sa + i -. Četkice leže na simetriji medju polovima, u tzv. neutralnoj zoni NZ. Kolektor je mehanički učvršćen na rotor pa se zajedno s njim vrti, a četkice su mehanički učvršćene na stator te ostaju stalno na istom mjestu. Kad se rotor vrti, četkice kližu po kolektoru (v. i sl. 34).

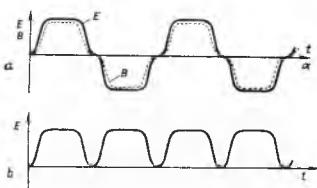
Zamisli li se magnetsko polje prema sl. 77, odmah je jasno da se indukcija B u zračnom rasporu tiski uz obod rotora prostorno mijenja. Pod polovima, gdje je magnetska vodljivost velika zbog malog zračnog raspora, indukcija je relativno velika. U medju-polnom prostoru opada magnetska vodljivost zbog povećanog zračnog razmaka na putu kojim se rasprostire magnetsko polje, a u skladu s tim opada i indukcija B na obodu rotora. Prostorni raspored indukcije B u zračnom rasporu tiski uz obod rotora prikazan je dijagramom na sl. 78. Os apscisā tog dijagrama predstavlja, prostorno razvijenu u ravnnu, kružnicu tiski uz obod rotora, na kojoj se promatraju polja. Uz poznate geometrijske odnose određene konstrukcijom stroja i uz određena svojstva materijala, intenzitet tog polja ovisi samo o uzbudi. Za dalje razmatranje pretpostavljeno je da raspored indukcije stroja prikazanog na sl. 77 odgovara dijagramu na sl. 78.

Vrti li se rotor tjeran nekim vanjskim pogonskim strojem konstantnom obodnom brzinom v , kreće se u stroju svitak u prilikama prikazanim na sl. 79. Kako su strane svitka razmagnute za 180° električnih (označivši sa 360° električnih središnjih kut od sredine jednog pola do sredine idućeg istoimenog pola) inducirati će se u svitku EMS $e = 2 B l v$, gdje l znači aksijalnu duljinu željeznog paketa stroja. Proporcionalnost između EMS e i indukcije B vodljiva je



Sl. 79. Inducirane elektromotorne sile u svitku

iz sl. 80 a, koja pokazuje izmjenični karakter napona u armaturnom svitku istosmjernog stroja. Druga je situacija na četkicama. Kad svitak u vrtnji dode u neutralnu zonu, mijenjaju se strane svitka na četkicama, tako da na četkicama vlada napon prema sl. 80 b. Tako tek kolektor pretvara izmjenične veličine rotora istosmjernog stroja u istosmrne veličine na stezaljkama.



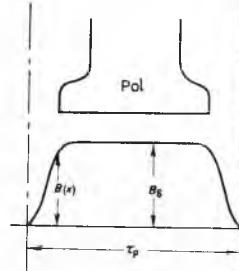
Sl. 80. Inducirana elektromotorna sila E u svitku (a) i prostorna raspodjela indukcije B ; b; napon na četkicama

mota suprotnog polariteta upravo u trenutku kad svitak mijenja polaritet. Realni istosmjerni stroj ima općenito više od 2 pola (obično 4...20). Stroj koji ima p pari polova, ukupno z vodiča podijeljenih u a pari paralelnih grana namota, inducira u svojim vodičima elektromotornu silu koja se pojavljuje na stezaljkama, a ovisna je o tim veličinama, magnetskom toku i brzini vrtanja. Raspored magnetskog polja jednog uzbudjenog mnogopolnog stroja v. dalje na sl. 94. Raspored indukcije po obodu armature daje sl. 81. Tok koji inducira EMS (glavni tok Φ_{gl}) ima očito iznos jednak površini ispod krivulje indukcije pomnoženoj duljinom l stroja. Taj iznos u mjerilu prikazuje volumen tijela izvučenog punom crtom na sl. 82, ali taj isti volumen imaju i tijela izvu-

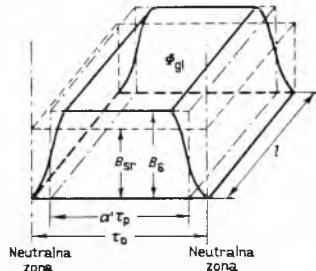
čena crtkanom i tačkasto-crtkanom linijom. Tako se glavni tok Φ_{gl} može računati s pomoću srednje vrijednosti indukcije u rasporu B_{sr} , ili s pomoću maksimalne indukcije B_δ i faktora α :

$$\Phi_{gl} = \int_0^{\tau_p} B(x) dx = \alpha \tau_p l B_\delta = \tau_p l B_{sr},$$

gdje je α faktor prekrivanja pola, τ_p polni korak, B_δ indukcija u zračnom rasporu pod polom, a B_{sr} srednja vrijednost indukcije na čitavom polnom koraku. Obodna brzina uz brzinu vrtnje



Sl. 81. Raspored magnetske indukcije $B(x)$ po obodu armature. NZ neutralna zona, α električni kut



Sl. 82. Ukupni tok jednog pola na obodu armature. B_δ indukcija u rasporu pod polom, B_{sr} srednja vrijednost indukcije na čitavom polnom koraku, τ_p polni korak, a faktor prekrivanja pola

n iznosi $v = D \pi n = 2 p \tau_p n$, pa se u vodiču inducira EMS srednje vrijednosti

$$e_{sr} = B_{sr} l v = 2 p n \Phi_{gl},$$

ili u cijelom namotu:

$$E = \frac{z}{2a} e_{sr} = \frac{p}{a} n z \Phi_{gl}.$$

Uumnožak $n z$ ujedno daje frekvenciju napona i struja u rotoru.

Ako na stezaljke (+, -) mirnog ali uzbudjenog (idealnog) stroja (v. sl. 77) narinemo napon, poteci će namotom struja u smjeru označenom na sl. 83. Na vodiču kroz koji proteče struja djeluje u magnetskom polju sila $F = B I l$, pa dvije sile na suprotnim stranama svitka stvaraju okretni moment

$$M = F D = B I l D.$$

Taj je moment uvijek istog smjera vrtnje budući da je pro-

dukt $B I$, odnosno $(-B) \cdot (-I)$, uvijek pozitivan. Ta je pojava također posljedica djelovanja kolektora koji u vodiču okreće smjer struje upravo u trenutku kad stiže u magnetsko polje suprotnog smjera. U stvarnom stroju sa p pari polova i ukupno z vodiča podijeljenih na a pari paralelnih grana izgubi se pulzirajući karakter momenta uslijed istih uzroka i na isti način na koji se izgubi pulzirajući karakter inducirane EMS. Neka, nadalje, u stroj ulazi struja I_a dok vodičima teče $2a$ puta manja struja I_v . Strujni oblog stroja tada iznosi:

$$A = \frac{I_v z}{D \pi} = \frac{I_v z}{2p \tau_p} = \frac{I_a z}{2a D \pi}.$$

Ukupni razvijeni moment stroja jednak je sumi momenata pojedinih vodiča:

$$M = \sum M_v = \frac{z}{2} I_v B_{sr} l D,$$

ili, izraženo samo magnetskim i električnim veličinama:

$$M = \frac{p z}{2 \pi a} I_a \Phi_{gl}.$$

Svaki istosmjerni stroj može raditi i kao generator i kao motor. Općenito uvezši, istosmjerni stroj u radu uvijek razvija i moment vrtnje i elektromotornu силу.

Kao što su u pogonu, pri ustaljenoj brzini, razvijeni moment i moment na osovinu praktički u ravnoteži, tako su i narinuti napon i EMS praktički u ravnoteži. Tačnije promatrano, za generator uvijek vrijedi:

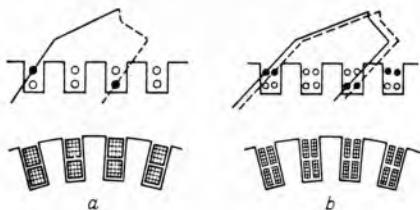
$$U = E - I_a R_a - \Delta U_c,$$

a za motor

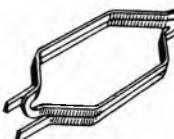
$$U = E + I_a R_a + \Delta U_c.$$

Ovdje znači R_a unutarnji otpor stroja, tj. sumu svih otpora koji se protive protoku struje I_a , a ΔU_c pad na ponapa na četkicama koji nastaje zbog prelaznih otpora na mjestima kontakta.

Armurni namot istosmjernog stroja u biti je izmjenični namot, pa za njega vrijede sva razmatranja provedena u ovom članku na str. 160 i 161, a posebno način prikazivanja (sl. 30, 31, 32 i 34). Osnovna je u fizikalnom pogledu samo jedna razlika: armurni namot istosmjernog stroja spojen je uvijek sam u sebe, dakle naponski formira uvijek zatvoreni poligon (kao što je prikazano na sl. 32). Umjesto na izvode, namot je spojen na kolektor (svaki svitak na dvije lamele kolektora) tako da u *dvoslojnim bubenjastim namotima*, koji se danas još jedino grade, otpada na svaki svitak po jednu lamelu kolektora. Početak svitaka spojen je na jednu lamelu kolektora (na koju je spojen i kraj nekog drugog svitka), a kraj svitka na drugu lamelu (na koju je spojen i početak nekog trećeg svitka). Tako su lamele kolektora ujedno



Sl. 84. Raspored strana svitaka bubenjastog namota.
a Jedan svitak po utoru, $u = 1$; b dva svitka po
utoru, $u = 2$



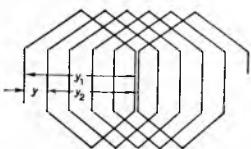
Sl. 85. Izgled svitka
(petljasti namot)

i spojna mjesta krajeva pojedinih svitaka. [Bubenjastim se takav namot naziva zbog toga što je raspoređen na rotoru kao na bubenju, a dvoslojnim zbog toga što se svici u utoru armature nalaze predani u dva sloja (gornji i donji) kako je prikazano na sl. 84. Izgled svitka pokazuje sl. 85.]

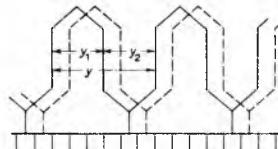
Opća teorija dvoslojnih bubenjastih namota počiva na jednadžbi

$$y = \frac{n k \pm a}{p},$$

koja se dobiva razmatranjem mogućnosti rasporeda svitaka. U njoj y znači korak namota (sl. 86 i 87), $y = y_1 + y_2$; y_1 zove se



Sl. 86. Shema vezivanja svitaka petljastog namota. y Korak namota, y_1 korak svitka, y_2 spojni korak

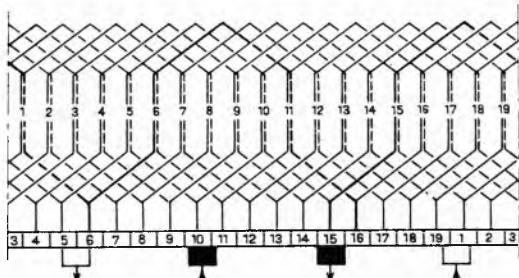


Sl. 87. Shema vezivanja svitaka valovitog namota. y Korak namota, y_1 korak svitka, y_2 spojni korak

korak svitka, a y_2 *spojni korak*. y_2 ima u svicima u kojima se vodič vraća, npr. u petljastom namotu, negativni predznak. k znači broj lamenâ kolektora, koji je jednak broju svitaka, tj. umnošku broja utorâ N s brojem svitaka po utoru u , n je pozitivan cijeli broj (uključujući 0), a broj pari paralelnih grana i p broj pari polova stroja.

U praksi se izvode samo namoti sa $n = 0$ i $n = 1$ zbog toga što pri većem n postaje prevelik utrošak bakra. Za $n = 0$ je $y = \pm a/p$, što je karakteristika koraka *petljastog namota* (sl. 86, za petljasti namot sa $a = p$). Za $n = 1$ je $y = (k \pm a)/p$, što je karakteristika koraka *valovitog namota* (sl. 87). (Oдакле називи petljasti i valoviti jasno je bez daljeg iz sl. 86 i 87.) Jednadžbama koraka namota ujedno je i karakteriziran namot. Najmanji mogući broj paralelnih grana pri petljastom namotu jednak je broju po-

lova, a pri valovitom namotu najmanji je broj pari paralelnih grana $a = 1$. Kraj prvog svitka spaja se u petljastom namotu s početkom jednog od susjednih svitaka (s najbližim kad je $a = p$), a u valovitom namotu s početkom svitka koji je udaljen za ~ 360 električnih stupnjeva (dva polna koraka). Jedna grana petljastog namota raspoređena je stoga samo pod jednim polom, a valovitog pod svim polovima. Petljasti namot se načelno može smjestiti u bilo koji broj utorâ N uz bilo koji broj svitaka po rotoru u , jer mu korak ne ovisi o broju lamela k ($k = N u$); pri primjeni valovitog namota mogućnosti u pogledu broja utorâ znatno su manje.

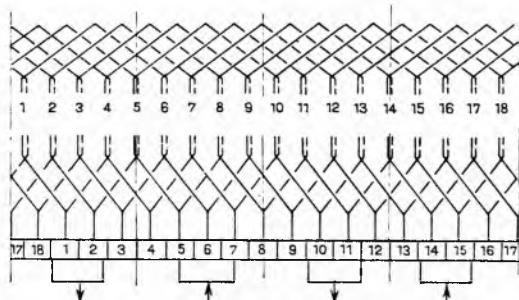


Sl. 88. Valoviti namot s podacima: $p = 2$, $N = 19$, $u = 1$, $y_1 = 5$, $y_2 = 5$, $y = 10$

Sl. 88 prikazuje primjer valovitog namota, za primjer petljastog namota v. sl. 36. U oba je primjera zbog preglednosti odabran nešto manji broj utorâ N i manji broj svitaka po utoru nego što se u praksi izvodi.

Neka svojstva namota uočljiva su već iz prikazane razlike između petljastog i valovitog namota. Valoviti namot je pogodniji za manje strojeve i više napone zbog manjeg broja paralelnih grana, a petljasti za veće strojeve i niže napone. Najveći strojevi mogu se izvesti samo s petljastim namotom. Pri primjeni petljastog namota veće su mogućnosti izbora broja utorâ, ali je stroj s petljastim namotom osjetljiviji prema netačnosti izrade.

Općenito se izvedbom namota mora uđovoljiti mnogim zahtjevima. Namot mora imati tako odabrane vrijednosti elemenata da brojem vodiča z i paralelnih grana a postigne potrebnu električnomotornu silu (EMS). On ne smije imati prevelik broj svitaka, da kolektorske lamele ne postanu preuske i da ne bude onemogućeno njihovo izvođenje. Napon između dvije lamele kolektora ne smije biti veći od $16\cdots20$ V, da se ne stvorи luk ako dođe do iskre, a to zahtijeva da broj svitaka i lamele ne bude ni premalen. Takvih uvjeta koji izviru iz zahtjeva za ispravnim funkcioniranjem stroja ima mnogo. Nastoji se da namoti budu simetrični s obzirom na magnetski krug, odnosno magnetske krugove stroja. Petljasti je namot simetričan kad su mu omjeri N/p i k/p cijeli brojevi, a valoviti kad su mu omjeri k/a , N/a , p/a cijeli brojevi.

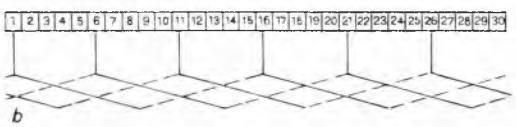
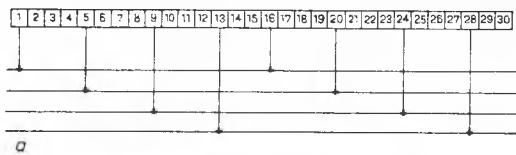


Sl. 89. Dvojno petljasti namot s podacima: $p = 2$, $N = 18$, $u = 1$, $y_1 = 5$, $y_2 = -3$, $y = 2$

Kad namot, naročito namot velikih strojeva, treba više paralelnih grana nego što daje najjednostavniji *jednovojni namot* (kao npr. namoti na sl. 36 i 88) mogu se izvesti *dvo- i viševojni namoti*. Dvojno petljasti namot prikazan je na sl. 89. Korak tog namota iznosi $y = a/p = 2$, tj. $a = 2 p$, što znači da dvojnoj namotu ima dvostruko veći broj paralelnih grana nego jednovojniju.

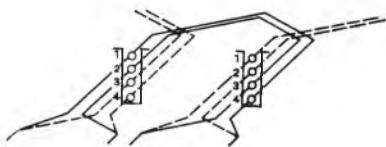
Na sl. 89 to je uočljivo slijedi li se tok cijelog namota, jer izgleda kao da se sastoji od dva namota koji jedan pored drugog leže na rotoru.

Da se smanji utjecaj netačnosti izvedbe strojeva s više paralelnih grana, izvode se *spojke izjednačenja* kojima se spajaju neka mesta istog potencijala. Spojke izjednačenja izvode se obično na kolektorskim lamelama, kako to shematski pokazuju sl. 90.



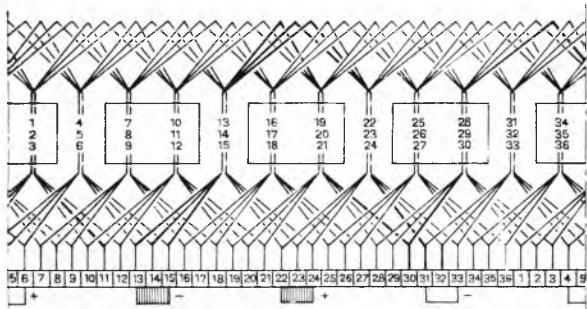
Sl. 90. Izvedba spojki izjednačenja: a u obliku prstena, b u obliku dvostrukog namota

U vrlo velikim i vrlo opterećenim strojevima izvodi se i *žablji namot* koji je kombinacija petljastog i valovitog namota i koji ujedinjuje dobra svojstva jednog i drugog (sl. 91). U velikim strojevima osjetljivim prema iskrenju (teška komutacija) izvodi se



Sl. 91. Načelni raspored svitaka u žabljem namotu

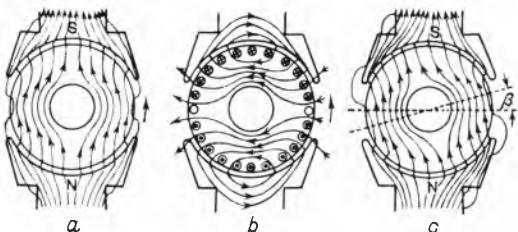
još i *steperičasti namot*, čiji je princip da svici kojima gornje (početne) strane leže u zajedničkom utoru imaju donje (završne) strane smještene u dva susjedna utora. Time se postiže nešto povoljniji oblik i iznos rasipnih magnetskih polja. Primjer steperičastog namota razabire se na sl. 92.



Sl. 92. Dvovojni valoviti steperičasti namot sa brojem svitaka po utoru $u = 3$

Reakcija armature. Optereti li se normalni istosmjerni stroj, njegovim armaturnim namotom poteče struja tereta. Ta struja u zavojima armature stvara novo protjecanje, a ono izgraduje u stroju magnetsko polje koga u praznom hodu nije bilo. To novo magnetsko polje stvara s postojećim (uzbudnim) magnetskim poljem zajedničko rezultantno polje. Pod teretom se, dakle, općenito mijenja magnetsko polje po iznosu i smjeru u pojedinim tačkama stroja jer se mijenja ukupno protjecanje koje ga stvara. Može se, sasvim općenito, očekivati u pojedinim tačkama stroja promjena glavnog toka kako po iznosu tako i po gustoći. To, dakako, izaziva čitav niz promjena u fizikalnom djelovanju stroja. Kako taj proces nastaje učešćem armaturnog protjecanja u ukupnom protjecanju stroja, naziva se cijela pojava s njenim posljedicama reakcijom armature.

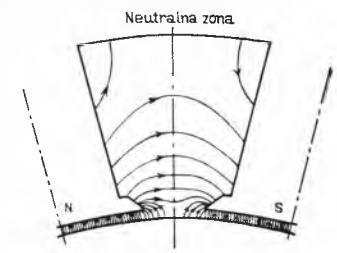
Na sl. 93 prikazana su tri magnetska stanja vrlo pojednostavnenog stroja na kome nema ništa što nije prijeko potrebno za



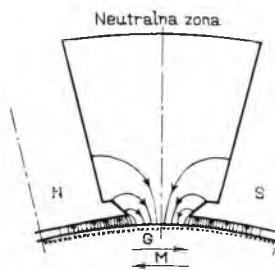
Sl. 93. Načelni raspored magnetskog polja istosmjernog stroja. a Uzbudno polje, b polje reakcije armature, c rezultantno polje s kutom skretanja β

ovo tumačenje. Na sl. 93 a ucrtano je polje u praznom hodu, na sl. 93 b polje što ga stvara protjecanje armature, tj. struja označenog smjera, i to pod pretpostavkom da uzbudnim namotom ne teče nikakva struja. Sl. 93 c prikazuje stvarno pogonsko stanje stroja u kome su superponirana stanja prikazana na sl. 93 a i b. Tada uz normalnu uzbudu sa statorske strane armaturom teće još i neka struja tereta. U odnosu prema stanju magnetskog polja u neopterećenom stroju (sl. 93 a), magnetsko polje opterećenog stroja pokazuje dvije bitne razlike vidljive i na slici. Polje, naime, više nije homogeno porazdijeljeno na površini pola i u zračnom rasporu, a neutralna se zona pomaknula iz geometrijske simetrije medupolnog prostora za neki kut β .

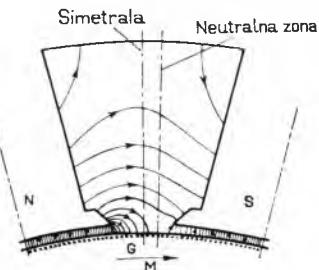
Kako te slike polja izgledaju na realnim strojevima prikazano je za uzbuden a neopterećen stroj na sl. 94, za neuzbuđen stroj sa strujom u armaturi na sl. 95, a za pogonsko stanje, tj. uzbuden i opterećen stroj, na sl. 96.



Sl. 94. Magnetsko polje u praznom hodu

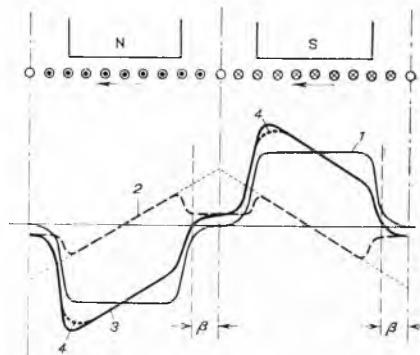


Sl. 95. Polje reakcije armature kod neuzbuđenih glavnih polova



Sl. 96. Rezultantno polje stroja bez pomoćnih polova

Posljedice deformacija magnetskog polja mogu se uočiti i iz sl. 97. Tanjom linijom I predviđena je gustoća magnetskog polja



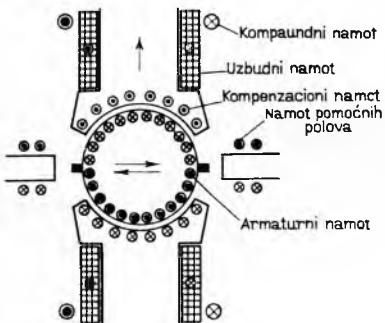
Sl. 97. Rezultantno magnetsko polje i njegove komponente u istosmjernom stroju bez pomoćnih polova. 1 tok glavnog pola, 2 tok armature, 3 rezultantno polje, 4 korekcija rezultantne krivulje polja

u zračnom rasporu pri praznom hodu. Polje uslijed uzbude od armaturne struje predstavljeno je tankom crtanom linijom 2. Ono se pod polom mijenja po pravcu ako je armaturna uzbuda jednoliko raspodijeljena po obodu rotora. Kad ne bi bilo promjene širine zračnog raspora, taj bi se pravac produžio i u međupolno područje, kako je to tačkastom linijom označeno. U stvarnosti, uslijed povećanja magnetskog otpora, u međupolnom prostoru opada indukcija kako je prikazano daljim tokom tanko izvučene crtkane linije 2. Superpozicijom tih dviju krivulja (uz pretpostavku linearne ovisnosti polja o uzbudi) dobije se stvarni iznos indukcije za pretpostavljeno pogonsko stanje, što je na slici prikazano punom debelom linijom 3. Iznos glavnog toka ostaje isti kao pri neopterećenom stroju, što se i na slici vidi. Taj prikaz vrijedi, međutim, samo za magnetski nezasićene strojeve, gdje indukcija na bilo kom mjestu u željezu ne postiže veće vrijednosti.

U magnetski zasićenom stroju postojeće protjecanje protjera manji tok kroz opterećeniji vršak polnog nastavka jer se je na tom mjestu povećao magnetski otpor željeza. U tom slučaju dolazi do korekcije rezultantne krivulje polja 3, kako je debelom crtanom linijom 4 prikazano na sl. 97. To je redovni slučaj u normalno gradenom stroju.

Reakcija armature izaziva tri osnovne neugodne posljedice: uslijed smanjenja glavnog toka smanjuje se EMS E , stroj je slabije iskorišten, a gubi i od pogonskih svojstava; uslijed povećanja maksimalne indukcije rastu gubici u željezu zubova rotora, stroj nešto gubi od snage, a raste i napon među lamelama na ne-povoljnem mjestu, što može dovesti do iskrenja ili čak do podržavanja luka među lamelama (tj. do pojave tzv. kružne vatre); uslijed pomaka električne neutralne zone, četkice, koje ostaju u simetričnoj međupolnoj prostoru (geometrijskoj neutralnoj zoni), spajaju svitke čije se strane nalaze u magnetskom polju, što može također dovesti do iskrenja.

Smetnje uslijed reakcije armature to su veće što je stroj veći, pa ih je potrebno ograničavati, pogotovo kad su snage stroja veće.

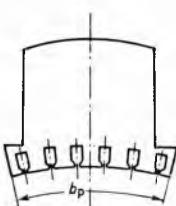


Sl. 98. Načelni raspored svih namota istosmjernog stroja

Primjenjuju se tri zahvata za ograničavanje djelovanja reakcije armature i njenih posljedica, od kojih, međutim, nijedan nije potpuno uspješan. U stroj se mogu ugraditi kompaundni namot, kompenzacioni namot i pomoćni polovi s namotima pomoćnih polova. Stroj sa svim tim elementima shematski prikazuje sl. 98. Za sva tri nova namota karakteristično je da su spojeni u seriju s armaturnim namotom, pa su njihova protjecanja proporcionalna struji armature, tj. opterećenju stroja.

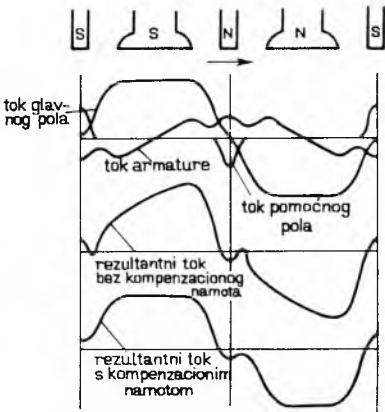
Kompaundni namot ugrađuje se na glavne polove tako da njegovo protjecanje potpomaže protjecanje uzbudnog namota. Time se može nadoknaditi (djelomično, potpuno ili čak i s r-etičkom) gubitak glavnog toka uslijed reakcije armature, ali se ostale mane nešto pojačavaju.

Kompenzacioni namot uložen je u utor glavnog pola (sl. 99), a kroz njega protječe struja smjera suprotog smjeru struje armature (v. sl. 98); on stvara protjecanje koje poništava deformaciju magnetskog polja pod glavnim polovima, te svodi djelovanje reakcije armature samo na međupolni prostor, i to znatno oslabljeno.



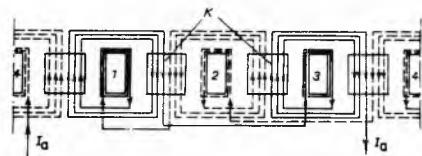
Sl. 99. Lim glavnog pola s utorima za kompenzacioni namot

Pomoći pol, izveden od feromagnetskog materijala i smješten tačno u neutralnu zonu, smanjenjem magnetskog otpora na tom mjestu izazvao bi pogoršanje situacije kad ne bi svojim protjecanjem djelovao nasuprot protjecanju armature i u međupolnom prostoru obavio onu funkciju koju kompenzacioni namot obavlja pod glavnim polovima. Sam za sebe, pomoći pol može obaviti funkciju suzbijanja reakcije armature u međupolnom prostoru, ali ne može utjecati na deformaciju magnetskog toka pod glavnim polovima. Stoga se gradi stroj ili samo s pomoćnim polovima ili s pomoćnim polovima i kompenzacionim namotom. U oba



Sl. 100. Raspodjela magnetskih polja u opterećenom istosmjernom stroju (bez kompenzacijom namota)

slučaja broj zavoja koji se protive protjecanju armature mora biti jednak, tj. ima li stroj samo namot pomoćnih polova, taj namot mora imati toliko zavoja koliko bi namot pomoćnih polova i kompenzacioni namot imali oba zajedno. To je jasno, usporede li se protjecanja na sl. 98. Razlika djelovanja vidi se i sa sl. 100. Kompenzacioni namot i namot pomoćnih polova čine i tehničku cjelinu, što se vidi na sl. 101 koja prikazuje razrezan, u ravni razvijen i sa strane rotora gledan stator. Na sl. 100 vidi se još da protjecanje pomoćnih polova nadmašuje u međupolnom prostoru protjecanje armature, tako da u neutralnoj zoni postoji rezultirajući magnetski tok, ali smjera suprotog smjeru što ga izaziva reakcija armature. Protjecanje pomoćnog pola namjerno se dimenzionira jače nego bi to zahtijevalo poništenje reakcije armature, da bi se poboljšao proces komutacije. Poboljšanje komutacije glavno je, dakle, djelovanje pomoćnog pola. Stoga su pomoći polovi potrebni veći u sasvim malim strojevima snage ispod 1 kW. Kompenzacioni namot, naprotiv, potreban je tek u vrlo velikim strojevima, pa se zbog skupe izgradnje samo u njima i predviđa. Strojevi srednjih snaga grade se s pomoćnim polovima, uz eventualnu ugradnju kompaundnog namota.



Sl. 101. Shema povezivanja kompenzacionog namota i namota pomoćnih polova. $I \cdots 4$ Pomoći polovi, K kompenzacioni namot

Komutacija. Pri prolazu kroz neutralnu zonu mijenja se polaritet induciranih napona svitaka. U neutralnoj zoni četkica kratko spaja svitak, što u praznom hodu ne predstavlja problem jer je na mjestu gdje se nalazi svitak iznad ispod četkice, svitak je prešao u drugu granu namota, te se u njemu inducira napon smjera suprotog smjeru što ga je imao prije. Pod teretom ova je pojавa zamršenja. Do nailaska svitaka pod četkicu u njemu teče struja one grane kojoj svitak u tom trenutku pripada. Nakon prolaska ispod lamele svitak pripada drugoj grani namota, pa u njemu teče struja suprotog smjera. Za vrijeme dok je svitak kratko spojeno,

tj. dok četkica pokriva dve lamele, struja u svitku mora najprije pasti na iznos nula, a zatim porasti u suprotnom smjeru. Na sl. 102 vidi se trenutak tog procesa.

Poteškoće pri komutaciji u nepovoljnim prilikama očituju se u *iskrenju pod četkicama*. To iskrenje može oštetići bilo četkice bilo kolektor ili se čak može pretvoriti u dugačke lukove koji mogu sasvim onesposobiti stroj. Zbog toga se pri pogonu istosmjernog stroja nastoji sprječiti iskrenje na kolektoru. Da li će se pri komutiraju pojavit i skrenje ili ne, to ovisi o mnogim okolnostima, a uzroci iskrenja gotovo su uvijek ili mehanički ili električnog karaktera. Najčešći mehanički uzroci su neokruglost i istrošenost kolektora i njegove vibracije koje uzrokuju poskakivanje četkica. Zatim dolaze: neuglačanost četkica, izderanost površine četkica ili kolektora uzrokovana prašinom, nečistocom ili agresivnom atmosferom. Uzrok može biti i u lošem vodenju četkica u držaćima, neispravnom pritisku ili smjeru pritiska na četkice itd. Električni se uzroci mogu svestri na problem nastajanja i podržavanja električnog luka između četkice i lamele kolektora. Taj luk može nastati u trenutku kada neka lamela upravo izlazi ispod četkice, jer je pojava rastavljanja lamele i izlaznog brida četkice vrlo slična otvaranju kontakta električnog kruga. O općem stanju tog električnog kruga ovisi hoće li se stvoriti prilike povoljne za nastanak luka i iskrenje.

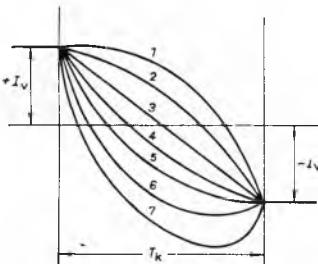
Od trenutka kad lamela svitka izade ispod izlaznog brida jedne četkice do trenutka kad uđe pod ulazni brid druge četkice teče svitkom struja vodiča ili struja grane I_v . Na sl. 103 označeno je to trajanje konstantne struje sa T_{1v} , a mnogo kraće vrijeme koje proteće od ulaza lamele pod ulazni brid četkice do njezina izlaza ispod izlaznog brida sa T_k . Za vrijeme T_k (trajanje komutacije) mijenja se struja od vrijednosti $+I_v$ na vrijednost $-I_v$. Vremenski tok promjene struje I_v u svitku nije još poznat; zato je na sl. 103 tok struje I_v za vrijeme T_k označen isprekidano. Tok struje za vrijeme T_k može općenito teći nekom od varijanti krivulja $1 \cdots 7$ na sl. 104. Krivulja 3 prikazuje linearni tok i dobije se u (teoretskom) slučaju kad proces komutacije nije ni ubrzavan ni usporavan nikakvim vanjskim ili unutarnjim utjecajima. Područje iznad



Sl. 102. Svitak pri komutaciji. I_v Struja vodiča prije i poslije komutacije, i tok struje u kratko spojenom svitku (označen debjle) za vrijeme komutacije

krivulje 3 zove se područje potkomutacije, a područje ispod krivulje 3 područje natkomutacije. Luk i iskra, koji se žele osjetiti, u principu nastupaju zbog postojanja energije magnetskog polja svitka $L i^2/2$ uslijed struje koja se mehanički prekida, pa ona izazove na »kontaktima« napon $L(di/dt)$. Postigne li se da je u trenutku rastavljanja kontakta iznos $di/dt = 0$, nema napona ni iskra. Takva je komutacija prikazana krivuljom 5 na sl. 104. Prema tome treba naročito izbjegavati potkomutaciju ili jaku natkomutaciju. Podržavanje iskre, dugački lukovi i vatrica na kolektoru mogući su ako se komutacijom nastala iskra održi i podrži uopće visokim prosječnim naponom među lamelama; stoga se taj napon ograničava na $16 \cdots 20$ V.

Svaki svitak u kome se mijenja struja stvara promjenljivo magnetsko polje i ono inducira u njemu napon koji se protivi



Sl. 104. Krivulje komutacije. T_k trajanje komutacije, I_v struja vodiča prije ili poslije komutacije; i i 2 tok struje za vrijeme komutacije u području potkomutacije, $4 \cdots 7$ u području natkomutacije, 3 linearni tok komutacije

promjeni struje. Dakle i bez vanjskog magnetskog polja svitak sam po sebi pokazuje tendenciju potkomutacije i stvaranja uvjeta za iskrenje. Zato se i uvođi u stroj pomoćni pol s namotom čije protjecanje stvara, u zoni gdje svitak komutira, magnetsko polje koje poništava vlastito magnetsko polje svitka i još nešto ubrzava vremensku promjenu struje. Zadatak je pomoćnog pola da stvara blagu natkomutaciju (krivulje 4, 5 na sl. 104), koja osigurava pogon bez iskrenja. Dominacija njegovog magnetskog polja u neutralnoj zoni vidljiva je na sl. 100.

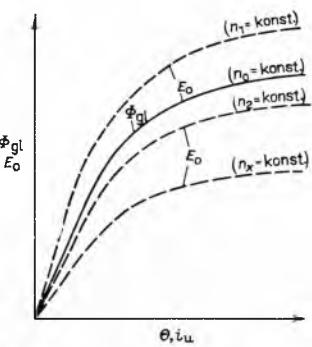
Kompenzacija vlastitog magnetskog polja svitka u komutaciji magnetskim poljem pomoćnih polova ipak nije potpuna, jer se ne može u cijelini postići kompenzacija na svakom mjestu, iako se postiže kompenzacija u ukupnom iznosu. Stoga je naponom samoindukcije e_s koji bi se inducirao u svitku pri komutaciji u slobodnom prostoru određena gornja granica jakosti struje pri kojoj se još može komutirati. Time je ujedno ograničena mogućnost izgradnje velikih istosmjernih strojeva na snage koje su znatno manje od snaga izmjeničnih strojeva bez kolektora. Ograničenje struje bitno utječe i na glavne dimenzije aktivnih konstrukcionih dijelova stroja i na njegovo oblikovanje; on se nastoji graditi tako da je napon samoindukcije što manji. Iz tih se razloga istosmjerni stroj gradi s otvorenim utorima i s malom duljinom paketa, četkice se po obodu prave široke da se produlji vrijeme komutacije, ograničuje se širina (prekrivanje) glavnog pola da strane svitke u komutaciji ne dospiju pod glavno polje, ograničava se strujni oblog da polje reakcije armature ne bude prejako, itd.

Četkice kolektora izrađuju se od ugljene ili grafitne prašine, ponekad pomiješane s metalnom (bakarnom) prašinom, sinterovane pod visokim pritiskom i temperaturom. Ugljen se odabira kao materijal za četkice jer on od svih materijala za kontakte pokazuje kudikamo najmanju sklonost za formiranje luka, a ima visok prelazni otpor prema metalima, što je povoljno s obzirom na komutaciju. Učvršćenje četkica perima u držaćima četkica izvodi se na više načina, pri čemu treba uvijek najviše paziti na to da se postigne slobodan »hod« četkice, kako ne bi došlo do iskrenja zbog mehaničkih razloga. Ugljene četkice podnose relativno mala opterećenja strujom, tj. gustoću struje od $8 \cdots 10$ A/cm², zbog čega kolektori strojeva s velikom strujom imaju veliku duljinu. No s obzirom na ostale prednosti ugljenih četkica taj se nedostatak tolerira.

Vrste istosmjernih električnih strojeva

Na glavnom polu stroja namotan je jedan uzbudni namot ili više njih. Ako je namotano više namota, stroj može biti uzbudivan iz više izvora. Kad raznim uzbudnim namotima istog pola teku struje u istom smjeru, protjecanja pojedinih namota se zbrajavaju; kad struje teku u suprotnim smjerovima, protjecanja se namotom odbijaju jedno od drugoga. Svojstva stroja ovise uvelike o vrsti uzbude.

Osnovna karakteristika stroja iz koje izviru sva razmatranja jest *krivulja magnetiziranja* stroja. Ona je za sve vrste strojeva jednako definirana kao funkcionalna ovisnost magnetskog toka o ukupnom uzbudnom protjecanju, tj. $\Phi_{gl} = f(\Theta)$. Ta krivulja, prikazana na sl. 105, karakterizira magnetski krug stroja i neovisna je o tome da li stroj stoji ili se vrti bilo kojom brzinom. Vrti li se stroj kao generator bez tereta nekom konstantnom brzinom vrtnje, njegova je *karakteristika praznog hoda* $E_0 = f(\Theta)$ proporcionalna karakterističi magnetiziranja stroja. Variranjem konstantnih brzina vrtnje n dobiva se porodica krivulja praznog hoda. Nalazi li se na polovima samo jedan uzbudni namot sa w_u zavojom, on sam daje i ukupno protjecanje $\Theta = i_u w_u$. Za takav slučaj može se karakteristika magnetskog kruga i karakteristika praznog hoda prikazati kao funkcija uzbudne struje i_u .



Sl. 105. Karakteristika magnetiziranja $\Phi_{gl} = f(\Theta)$ i praznog hoda $E_0 = f(\Theta)$ odnosno $E_0 = f(i_u)$

Vrste uzbude električnog stroja mogu biti različite, a ovise o načinu spajanja armaturnih i uzbudnih namota među sobom i s izvorima struje.

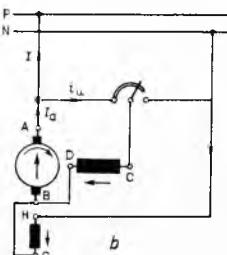
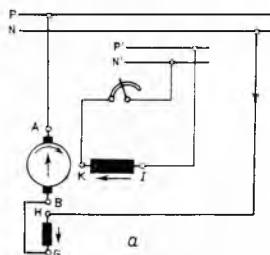
Nezavisna uzbuda. Uzбудni namot priključen je na vanjski izvor napona koji je potpuno neovisan o zbijanjima u stroju. Iznos uzbudne struje može se podešavati neovisno o stroju ako u strujnom krugu uzbude postoji promjenljiv otpornik. Stroj u takvom spoju zove se nezavisno uzbudeni generator ili motor.

Poredna uzbuda. Uzбудni je namot priključen na vlastite stezeljke ili vlastitu mrežu. Uzbudna struja može se podešavati samo vanjskim promjenljivim otpornikom. Stroj s takvom uzbudom zove se poredni generator ili motor.

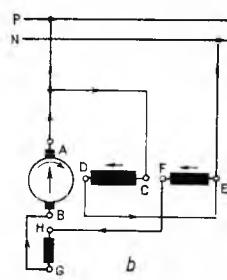
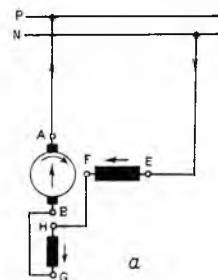
Serijska uzbuda. Uzбудni namot priključen je u seriju s armaturom namotom. Uzburdna struja ne može se podešavati neovisno o struci armature, nego samo zajednički s pomoću predtora izvan stroja ili otpornikom koji je priključen paralelno s uzbudnim namotom. Stroj s takvom uzbudom zove se serijski motor ili generator.

Složena uzbuda. Stroj ima dva uzbudna namota koji djeluju zajednički. To je kombinacija nezavisne i serijske uzbude ili poredne i serijske uzbude. Učešće pojedine uzbude u ukupnom protjecanju uvjetuje zahtijevana vanjska karakteristika, tj. zahtijevana ovisnost napona stezeljki o struci tereta (za generator), odn. brzine vrtnje o razvijenom momentu (za motore). Tako nastaju kompaundni generatori i motori, kojima se vanjske karakteristike kako mijenjaju u ovisnosti o procentnom učešću serijske uzbude u ukupnom protjecanju i o tome da li serijska komponenta uzbude potpomaže ili se suprotstavlja nezavisnoj, odnosno porednoj.

Vrste istosmjernih generatora. Na sl. 106 i 107 prikazane su spojne sheme za četiri osnovne vrste istosmjernih generatora. One se razlikuju po svojim *vanjskim karakteristikama*.



Sl. 106. Sheme spoja nezavisno uzbudjenog (a) i poredno uzbudjenog generatora (b)



Sl. 107. Sheme spoja serijskog (a) i kompaundnog generatora (b)

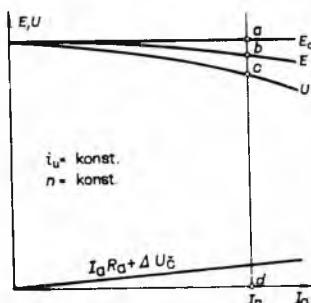
Nezavisno uzbudeni generator. Armaturom ovog generatora, dok je opterećen, teče struja tereta I_a . Zbog reakcije armature smanjuje se u vezi s time glavni tok, pa se smanjuje i inducirana EMS (sl. 108) od vrijednosti E_0 na vrijednost E . Struja I_a uzrokuje još padove napona $I_a R_a$ na otporu armature i ΔU_c na četkicama, tako da na stezeljkama ostaje napon U .

Poredni generator ima vanjsku karakteristiku vrlo sličnu vanjskoj karakteristici nezavisnog generatora, samo mu se napon pod teretom smanjuje nešto jače jer mu se i uzbudna struja smanjuje (uzbuda je priključena na vlastiti napon), dok je u nezavisnom generatoru uzbudna struja konstantna. Stoga se kaže da nezavisni generator ima nešto »tvrdju« karakteristiku od porednog, tj. da mu je napon manje osjetljiv prema promjenama struje tereta I_a .

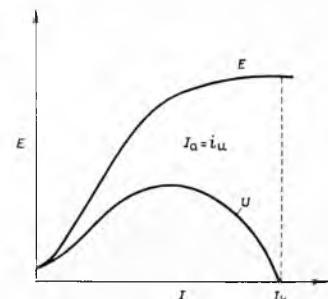
Serijski generator, ako je neopterećen, ne daje uopće napon na svojim stezeljkama, jer dok nema struje tereta ($I_a = 0$) i struja uzbude je jednaka nuli. Njegova je vanjska karakteristika prikazana na sl. 109. Kao izvor električne energije serijski je generator sasvim nepriskidan jer ima potpuno »mekanu« karakteristiku, te je napon U jako ovisan o struji opterećenja I_a .

Složeno uzbudeni ili kompaundni generator radi istovremeno s poređnom i serijskom uzbudom na glavnim polovima. Pri tome serijska uzbuda može da potpomaže poređnu, kao što je to u generatoru spojenom prema sl. 107 b, ili da je ruši, u kom je slučaju spoj sličan onom na sl. 107 b, samo je serijska uzbuda priključena obratno na stezeljkama EF. Različite mogućnosti izvedbe složeno uzbudjenog generatora navedene su u nastavku.

Ako je serijska uzbuda upravo tolika da pokriva gubitke napona zbog reakcije armature i padova napona, napon je približno konstantan počevši od praznog hoda do nekog određenog tereta (struje). Takav generator zovemo *potpuno kompaundiranim generatorom*; njemu ne treba regulator napona. Vanjska karakteristi-



Sl. 108. Vanjska karakteristika nezavisno i poredno uzbudjenog generatora



Sl. 109. Karakteristike serijskog generatora. I_a Struja opterećenja, I_k struja kratkog spoja, i_u struja uzbude

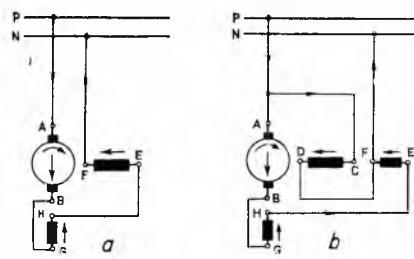
stika mu je prikazana krivuljom a na sl. 110, a ta ista karakteristika za generator bez serijske uzbude (*potkompaundirani generator*) prikazana je krivuljom c .

Ako je serijska uzbuda jača od uzbude potpuno kompaundiranog generatora, posredji je *natkompaundirani generator*. Njegov napon raste s teretom, što je obično nepoželjno. Vanjsku mu karakteristiku prikazuje krivulja b na sl. 110.

U kompaundnom generatoru kome je serijska uzbuda suprotna porednoj, napon se naglijie ruši, vanjska karakteristika je »mekana« i biva to meša što je procentni udio serijske uzbude veći. Vanjska karakteristika takvog *protukompaundiranog generatora* predstavljena je krivuljama d na sl. 112. Protukompaundirani generator primjenjuje se obično za rad u nekom sklopu s motorom, kad pogon traži upravo takvu mekanu karakteristiku izvora.

Vrste istosmjernih motora. Spojne sheme nezavisno i poredno uzbudjenog istosmjernog motora iste su kao sheme istim načinom uzbudjenih generatora (v. sl. 108), uz promjenjen smjer struje armature. U serijskom i kompaundnom motoru treba zbog toga zamijeniti priključke E i F serijskog uzbudnjog namota (sl. 111). Četiri osnovne vrste istosmjernih motora razlikuju se po svojim vanjskim karakteristikama $n = f(M)$.

Vanjska karakteristika slijedi iz osnovne jednadžbe za



Sl. 111. Sheme spoja serijskog (a) i kompaundnog motora (b)

elektromotornu silu E inducirano u istosmjernom motoru (bez obzira na njegov spoj):

$$E = k \Phi_{gl} n,$$

gdje je $k = p z/a$ takozvana *konstanta stroja*. Osnovni zakon za brzinu vrtnje u stacionarnom stanju, pod bilo kojim opterećenjem, glasi:

$$n = \frac{1}{k} \frac{E}{\Phi_{gl}}.$$

Glavni tok Φ_{gl} sagrađen je ukupnim protjecanjem; on uz konstantnu uzbudnu struju ovisi u opterećenom stroju još samo o reakciji armature. Inducirana EMS E u idealnom je praznom hodu jednaka naponu mreže; pod opterećenjem određena je uvjetom ravnoteže u strujnom krugu armature, i to drugim Kirchhoffovim zakonom. Kako je napon mreže konstantan ($U = \text{konst.}$), u stacionarnom radu stroja, tj. kad je ustaljena struja armature, EMS motora mora biti:

$$E = U - I_a R_a - \Delta U_e.$$

Tako definirani Φ_{gl} i E određuju brzinu vrtnje motora. Može se ukratko reći da se pri određenom magnetskom toku, sagrađenom ukupnim protjecanjem, istosmjerni stroj mora vrtjeti takvom brzinom da se inducira potrebna EMS (protu-EMS), određena u prvom redu naponom mreže U , prema kojem su padovi napona zbog struje opterećenja obično maleni. Tačno vrijedi jednadžba

$$n = \frac{1}{k} \frac{U - I_a R_a - \Delta U_e}{\Phi_{gl}}.$$

Nezavisno uzbuden motor spojen je prema shemi na sl. 106 a. Ako je takav motor potpuno kompenziran, njegov glavni tok Φ_{gl} ostaje nepromijenjen bez obzira na struju armature, a to znači i bez obzira na moment stroja, jer je struja, prema jednadžbi $M = k \Phi_{gl} I$, u tom slučaju proporcionalna momentu. Naprotiv, pri porastu struje rastu padovi napona, pa je s porastom struje (odnosno momenta) potrebna sve manja protu-EMS. Kako padovi napona predstavljaju relativno mali postotak napona U , brzina vrtnje blago opada s porastom momenta. Kvalitativno vanjska karakteristika odgovara krivulji a na sl. 112.

U motoru bez kompenzacijom namota

tok se mijenja s opterećenjem, tj. on opada. Odmah se vidi da će vanjska karakteristika biti »tvrd« od karakteristike kompenziranog motora, tj. da će ležati iznad krivulje a u sl. 112. Njezin izgled ovisit će o tome da li u ovisnosti o struji brže pada tok Φ_{gl} ili potrebna protu-EMS. Za slučaj da magnetski tok opada brže (jaka reakcija armature), kvalitativni oblik vanjske karakteristike prikazuje krivulja c na sl. 112. To je nepovoljno jer brzina vrtnje raste s opterećenjem, pa se govori o »nestabilnom« motoru. Opada li glavni tok s porastom tereta podjednako brzo kao EMS, dobiva se konstantna brzina vrtnje bez obzira na teret. Taj »granični slučaj stabilnosti« prikazuje krivulja b na sl. 112.

Poredni motor uopće se ne razlikuje od nezavisno uzbudenog. Kako mu je izvor uzbude mreža konstantnog napona, sve što je rečeno za nezavisno uzbuden motor vrijedi dakako i za poredni (v. sl. 106).

Istosmjerni serijski motor ima uzbudni i armaturni namot spojene u seriju, što znači da teret određuje uzbudu jer je struja armature ujedno i struja uzbude. Kako za moment vrtnje svakog motora vrijedi jednadžba $M = k \Phi_{gl} I$, a u serijskom je spoju kod nezasićenog motora tok Φ_{gl} proporcionalan struji I , to se moment takvog stroja može prikazati jednadžbom $M = k' I^2$.

Iz izraza za brzinu vrtnje $n = E/k \Phi_{gl}$ slijedi da je za nezasićeni serijski motor $n = E/k' I$ ili

$$n = k_s \frac{E}{\sqrt{M}}.$$

Konstanta k_s sadrži sve ranije navedene konstante stroja (k , k' i k''). Izraz vrijedi, dakako, samo za one struje opterećenja koje,

protečeći uzbudnim namotom, još ne uzrokuju zasićenje stroja. Pri zasićenju taj izraz više ne vrijedi. Vanjsku karakteristiku serijskog stroja prikazuje sl. 113, ovisnost brzine vrtnje n o momentu

M izražena je gornjom jednadžbom dok god je moment M proporcionalan kvadratu struje I^2 . Pri većim opterećenjima stroja nastupa zasićenje, pa brzina vrtnje opada brže do stanja mirovanja (kratkog spoja), kako se to na slici i vidi.

Za rad serijskog istosmjernog motora posebno su neugodna stanja malih opterećenja ili čak stanje praznog hoda. Pri malim strujama malen je i magnetski tok, pa brzina vrtnje naglo raste. Rastereti li se motor dokraj, struja mu pada prema vrijednosti nula, a brzina vrtnje

mu raste prema beskonačnosti. Stroj *pobjegne*, tj. brzina vrtnje povisi mu se preko one za koju je konstruiran. Taj »pobjeg« serijskog istosmjernog motora njegovo je prirodno svojstvo.

Pojam »pobjega« istosmjernog motora nije vezan samo uz serijski uzbudeni motor. I ostale vrste motora mogu »pobjegi« i doći u opasnost da se razlete, ako nastupe prilike kad motor, uslijed malog magnetskog toka, nastoji povećati brzinu vrtnje da bi razvio protu-EMS koju uvjetuje narinuti napon (npr. u slučaju prekida u krugu poredne uzbude).

Kompaundni motor ima redovno dva uzbudna namota, jedan poredni (nezavisni) i jedan serijski, slično kao složeno uzbudeno generator. Pri tome djelovanje serijskog namota redovno potpomaže djelovanje porednog namota, pa je slučaj »protokompaundiranog« motora prava rijekost. Osnovni spoj takvog kompaundnog motora prikazan je na sl. 111 b. Protjecanje porednog uzbudnog namota CD istog je smjera kao i protjecanje serijskog uzbudnog namota EF.

Vanjska karakteristika kompaundnog motora pokazuje manju ili veću tvrdcu, tj. bliža je karakteristici porednog ili serijskog motora, već prema tome koliko koji od uzbudnih namota sudjeluju u stvaranju magnetskog polja. Ako je protjecanje poredne uzbude veće od protjecanja serijske, kompaundni motor ima tvrdu karakteristiku, tj. bliži je po svojstvima porednom motoru. Obratno, prevladava li serijska uzbuda nad porednom, kompaundni motor ima mešku karakteristiku, tj. sličniji je po svojstvima serijskom motoru. Kombinirajući različne omjere utjecaja pojedinih uzbuda, mogu se postići različite vanjske karakteristike (sl. 114). Za razliku od brzine vrtnje serijskog motora, teorijska brzina vrtnje kompaundnog motora čvrsta je i konačna. Na sl. 114 označena je ova brzina sa n_0 . Nju određuje uzbuda porednog namota, jer u praznom hodu serijske uzbude kompaundnog namota nema.

Regulacija brzine vrtnje istosmjernog motora

Mogućnost regulacije brzine vrtnje istosmjernog motora upravo je ono svojstvo koje ga je održalo u konkurenčiji s jeftinijim izmjeničnim motorima. Prema ranije izvedenom osnovnom zakonu

$$n = \frac{U - I R_a - \Delta U_e}{k \Phi_{gl}}$$

moguća su dva osnovna načina regulacije: regulacija promjenom narinutog napona U , ili kraće *regulacija naponom*, i regulacija promjenom uzbude i time promjenom magnetskog polja, ili kraće *regulacija poljem*.

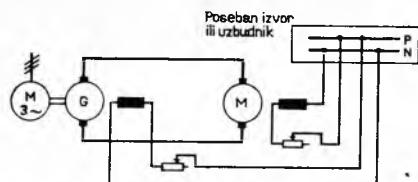
Regulacija naponom efikasna je počevši od brzine vrtnje motora jednake nuli pa do brzine vrtnje koja odgovara nominalnom naponu motora, dakako uz neku konstantnu, obično nominalnu uzbudu, što obično znači punu uzbudu ili »puni tok« motora. To je velik opseg regulacije, i ako je motor hlađen neovisno

o brzini vrtnje, on se u cijelom opsegu regulacije može optereti konstantnom strujom. Kako za moment vrtnje motora vrijedi relacija $M = k \Phi_{gl} I$, to za regulaciju naponom uz »vanjsku ventilaciju« može moment motora ostati konstantan u cijelom području regulacije. U tom je slučaju snaga motora proporcionalna brzini vrtnje, tj. približno proporcionalna narinutom naponu. Hladi li se motor vlastitim ventilatorom, mora mu se smanjivati struja kad se smanjuje brzina vrtnje, da se ne bi pregrijao. Tada se više ne može održati konstantni moment u cijelom opsegu regulacije, nego je uz sporiju vrtnju i moment manji. Tada, dakako, i snaga opada više nego proporcionalno smanjenju brzine vrtnje.

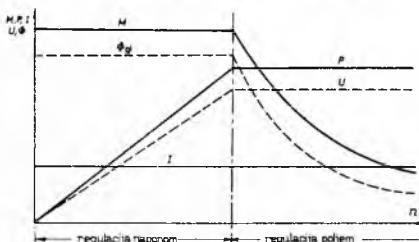
Regulacija poljem izvodi se tako da se narinuti napon drži konstantnim, a polje se smanjuje smanjivanjem uzbudne struje. Opseg regulacije poljem ne može biti po volji velik; za motore normalne izvedbe iznosi otprilike 2 : 1, tj. s regulacijom brzine vrtnje može se ići do dvostrukog povećanja u odnosu prema brzini kod punog iznosa magnetskog toka. Veći omjer brzine vrtnje pri regulaciji poljem može se postići posebnom konstrukcijom motora, ali omjer veći od 3 : 1 redovno se ni tako ne može postići, jer kad je jakost magnetskog polja vrlo mala, motor postaje nestabilan te lako može pobjeći, a nastupaju i teškoće pri komutaciji.

Za regulaciju brzine istosmjernih motora prirodno je, dakle, da se konstantni moment postiže s pomoću regulacije naponom, a konstantna snaga s pomoću regulacije poljem.

Leonardov spoj omogućuje posebno veliki opseg regulacije istosmjernog motora. U tom spoju (sl. 115) motor je jedini potrošač svog generatora, tako da njihove dvije armature predstavljaju zatvoreni strujni krug. Generator je mehanički gonjen od posebnog izmjeničnog motora (iz trofazne mreže). Uzbuda i generatora i motora priključena je odvojeno na isti neovisni izvor. Obje uzbude mogu se regulirati promjenljivim otpornicima.



Sl. 115. Načelna shema Leonardova spoja



Sl. 116. Dijagram promjene veličina U , Φ_{gl} , I , M i P pri regulaciji Leonardove grupe

Regulira li se uzbuda generatora uz konstantnu uzbudu motora, mijenja se napon na motoru, tj. motor se regulira naponom. Regulira li se uzbuda motora uz konstantnu uzbudu generatora, mijenja se magnetski tok motora uz nepromijenjeni napon, dakle motor se regulira poljem. Na sl. 116 nacrtane su promjene karakterističnih veličina (struje I , brzine vrtnje n , momenta M i snage P) i veličinā kojima se izvodi regulacija (napona U i toka Φ_{gl}) u cijelom opsegu regulacije motora u Leonardovu spoju. Tim se spojom do maksimuma iskoristava regulaciona sposobnost istosmjernog porednog motora.

U novije vrijeme počinje se generator u Leonardovu spoju zamjenjivati ispravljačima koji se mogu regulirati. Živin ispravljač s upravljačkom rešetkom ili suhi (silicijumski) »upravljavivi« ispravljači, tzv. tiristori (v. Elektronika, sastavni dijelovi) mogu iz izmjenične mreže dobavljati motoru istosmjerni napon koji se dade regulirati. Izgleda da je budućnost regulacije istosmjernih motora upravo u spoju s upravljavim ispravljačima, čija je tehnika baš sada u burnom razvoju.

Tromost istosmjernog stroja. Istosmjerni stroj sve se više primjenjuje kao element regulacionog procesa. Posljedica je toga da se sve više moraju uzimati u obzir i tromosti koje u stroju postoje, tj. vremenske konstante koje karakteriziraju prelaz iz jednog pogonskog stanja stroja u drugo. Osim mehaničke tromosti, u električnom smislu postoje dvije takve tromosti u istosmjernom stroju. Jedna je tromost uzbudnog namota karakterizirana vremenskom konstantom $T_{uzb} = L_{uzb}/R_{uzb}$, a druga je tromost glavnog ili armaturnog strujnog kruga karakterizirana vremenskom konstantom unutarnjeg kruga stroja $T_a = L_a/R_a$. Pri tome je R_a ukupni otpor svih u seriju spojenih namota u armaturnom krugu, a L_a ukupni induktivitet tog kruga. Induktivitet uzbudnog namota L_{uzb} relativno je velik prema otporu tog namota jer predstavlja glavno magnetsko polje stroja i rasipanje uzbudnog namota, dakle ukupno polje. Induktivitet glavnog strujnog kruga relativno je malen prema otporu tog kruga jer predstavlja samo rasipna polja armaturnog namota, kompenzacijonog namota i namota pomoćnih polova, uz rezultantno polje reakcije armature i pomoćnih polova u komutacionoj zoni. Zbog toga je vremenska konstanta glavnog strujnog kruga obično mnogo puta manja od vremenske konstante uzbudnog kruga. Vrijedi približno $T_{uzb} \approx (5 \dots 20) T_a$, pa se T_a često može zanemariti.

Granične snage istosmjernih strojeva

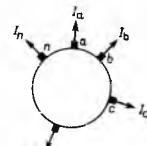
Mogućnosti izgradnje proizvoljno velikih električnih strojeva ograničene su mehaničkim, magnetskim, električnim i toplinskim naprezanjem materijala. Kako se tehnika i tehnologija razvijaju, pronalaze se novi, bolji materijali, oplemenjuju se oni koji postoje, usavršava se konstrukcija strojeva i granične se snage strojeva pomicu prema sve većim vrijednostima. Danas se mogućnosti za sinhronne strojeve približavaju vrijednosti od milion kilovata (1 GW), koja je ~ 10 puta veća nego što je bila granična vrijednost prije 30 godina.

Mogućnosti povećanja snage kolektorskih strojeva ograničene su još i postojanjem kolektora i problemima komutacije. Kolektor se mora graditi s rotorom u tvornici, što ograničuje dimenzije rotora, s obzirom na mogućnosti transporta. Zbog iskrene se napon samoindukcije u svitku koji komutira mora ograničiti, a isto tako i napon među lamelama, što dovodi do daljeg smanjenja maksimalno mogućih dimenzija i snaga. Tako je maksimalna snaga istosmjernog stroja ograničena na $\sim 10\ 000$ kW (10 MW), i to pri niskim brzinama vrtnje; pri višim brzinama vrtnje postepeno opada. Istosmjerni strojevi graničnih snaga primjenjuju se danas najviše u valjaonicama, rudnicima, brodarstvu i aerodinamičkim postrojenjima, gdje se ponegdje već osjeća potreba i za strojevima snage veće od granične.

Specijalni kolektorski strojevi

Istosmjerni stroj bio je osnova iz koje su se tokom vremena razvile mnogobrojne vrste specijalnih istosmjernih i izmjeničnih kolektorskih strojeva, s različnim svojstvima i primjenama. Razvojem tehnike velik je dio tih vrsta dobio bolju zamjenu, zastarje je i ispoz iz upotrebe, kao npr. unipolarni stroj, jednoarmaturni pretvarač, repulzioni kolektorski stroj i uopće mnoge vrste izmjeničnih kolektorskih strojeva. No neke su vrste ostale, te nalaze i danas primjenu i uvjete za razvoj. To prije svega vrijedi za metadine, za jednofazne serijske i neke trofazne kolektorske strojeve, koji su se razvili u samostalnu granu kolektorskih strojeva.

Metadini. U principu je metadin istosmjerni stroj koji može imati četkice položene ne samo u neutralne zone već i u proizvoljno po obodu kolektora. Zbog komutacije moguće su samo manje snage. U principu mogu biti i namoti statora raspoređeni drukčije nego u istosmjernom stroju.



Sl. 117. Armatura istosmjernog stroja sa n četkicama

$$E_{gh} = \sum_{x=a}^n C_{xgh} I_x,$$

gdje su C_{xgh} konstante dane strojem i rasporedom četkica. Ta slika prikazuje princip stroja pretvarača električne energije. Ako su u okolini promatranog rotora razmješteni čvrsti svici 1, 2, 3, ..., m kojima teku neke uzbudne struje $I_{u1}, I_{u2}, I_{u3}, \dots, I_{um}$ (sl. 118), čija protjecanja djeluju na rotor, inducira se među dvjema četkicama elektromotorna sila

$$E_{gh} = \sum_{x=a}^n C_{xgh} I_x + \sum_{y=1}^m C_{uygh} I_{uy},$$

gdje su C_{uygh} konstante odredene oblikom i položajem svakog pojedinog od m svitaka. Zamislimo li te svitke kao namote statora u koji je rotor uvučen, na našoj fizičkoj slici ne mijenja se ništa, mijenjaju se samo vrijednosti konstanti C_x i C_{uy} zbog promjene magnetskog otpora okoline. To je princip gradnje metadinskog motora ili generatora. Različne kombinacije rasporeda svitaka i četkica pružaju mnoge mogućnosti formiranja metadinskih strojeva s posebnim svojstvima, npr. kao pojačalo istosmjerne struje, kao regulacioni element, kao stroj za konstantnu struju, kao regulator napajanja mreže, kao pretvarač napona, kao generator s karakteristikom posebno podesnom za svarivanje itd.

Pod imenima amplidin, autodin, rotorol, Rosenbergov stroj itd. postoji čitav niz metadinskih strojeva; od njih su danas još donekle tehnički važni oni koji su razvijeni za svrhe regulacije, prije svega amplidin.

Amplidin. Već je i normalni istosmjerni generator (sl. 119) pojačalo snage. Uspoređi se snage u rotorskog strujnog krugu $U_{ac} I_2$ (a—c je izlaz pojačala) i u uzbudnom krugu $U_1 I_1$ (ulaz pojačala) uz pretpostavku da je snaga uzbudbe $\sim 1\%$ od snage rotorskog strujnog kruga, dobiva se da je $U_{ac} I_2 \approx 100 U_1 I_1$, tj. impuls u uzbudnom krugu stostruk je pojačava u krugu tereta.

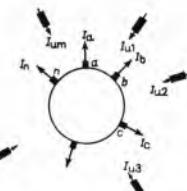
Kad se (sl. 120) doda novi par četkica b i d, a četkice a i c spoje se preko jednog uzbudnog namota (ili jednostavno kratko spoje), potjerat će napon U_{ac} struju I_2 , a ova će stvoriti tok Φ_2 . Taj tok inducira na četkicama b i d napon U_{bd} trošila koje uzima struju I . Struja I , koja teče armaturom, izaziva reakciju armature označenu tokom Φ' . Taj je tok direktno suprotan toku osnovne uzbude Φ_1 , pa bi neposredno rušio napon U_{ac} , a time posredno napon U_{bd} . Zato je dodan kompenzacioni namot, čiji tok Φ_k poništava tok Φ' .

Ako se pretpostavi da je pojačanje drugog stepena, tj. pojačanje od poprečnog kruga a—c prema novom izlaznom krugu b—d, otprilike jednako kao što je bilo pojačanje prvog stepena, može se pisati:

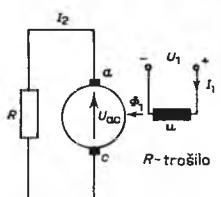
$$U_{bd} \approx 100 U_{ac} I_2 \approx 10000 U_1 I_1.$$

Amplidin je, dakle, pojačalo s pojačanjem snage reda veličine do 1 : 10 000. Zbog tog svojstva i jer uz veliko pojačanje ima, s obzirom na veliku snagu, relativno malu vremensku tromost, amplidin se primjenjuje u regulacionim procesima.

Izmjenični kolektorski strojevi. Promjena polariteta priključenog napona (i na uzbudnom namotu i na četkicama) neće promijeniti smjer vrtnje istosmjernog motora. Načelno se istosmjerni motor može dakle priključiti na izmjeničnu (jednofaznu) mrežu i on će pokazati ista osnovna fizička svojstva kao kad je priključen na istosmjernu mrežu. Uvjet da se omogući i tehničko iskorištavanje te činjenice jednostavan je: cijeli magnetski krug mora biti građen od tankih limova. Iz te su se mogućnosti razvile mnogobrojne vrste izmjeničnih kolektorskih strojeva,



Sl. 118. Istosmjerni stroj sa n četkica na armaturnom namotu i m namota na statoru



Sl. 119. Shema djelovanja istosmjernog generatora kao pojačala

1% od snage rotorskog strujnog kruga, dobiva se da je $U_{ac} I_2 \approx 100 U_1 I_1$, tj. impuls u uzbudnom krugu stostruk je pojačava u krugu tereta.

Kad se (sl. 120) doda novi par četkica b i d, a četkice a i c spoje se preko jednog uzbudnog namota (ili jednostavno kratko spoje), potjerat će napon U_{ac} struju I_2 , a ova će stvoriti tok Φ_2 . Taj tok inducira na četkicama b i d napon U_{bd} trošila koje uzima struju I . Struja I , koja teče armaturom, izaziva reakciju armature označenu tokom Φ' . Taj je tok direktno suprotan toku osnovne uzbude Φ_1 , pa bi neposredno rušio napon U_{ac} , a time posredno napon U_{bd} . Zato je dodan kompenzacioni namot, čiji tok Φ_k poništava tok Φ' .

Ako se pretpostavi da je pojačanje drugog stepena, tj. pojačanje od poprečnog kruga a—c prema novom izlaznom krugu b—d, otprilike jednako kao što je bilo pojačanje prvog stepena, može se pisati:

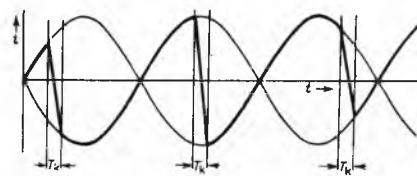
$$U_{bd} \approx 100 U_{ac} I_2 \approx 10000 U_1 I_1.$$

Amplidin je, dakle, pojačalo s pojačanjem snage reda veličine do 1 : 10 000. Zbog tog svojstva i jer uz veliko pojačanje ima, s obzirom na veliku snagu, relativno malu vremensku tromost, amplidin se primjenjuje u regulacionim procesima.

Izmjenični kolektorski strojevi. Promjena polariteta priključenog napona (i na uzbudnom namotu i na četkicama) neće promijeniti smjer vrtnje istosmjernog motora. Načelno se istosmjerni motor može dakle priključiti na izmjeničnu (jednofaznu) mrežu i on će pokazati ista osnovna fizička svojstva kao kad je priključen na istosmjernu mrežu. Uvjet da se omogući i tehničko iskorištavanje te činjenice jednostavan je: cijeli magnetski krug mora biti građen od tankih limova. Iz te su se mogućnosti razvile mnogobrojne vrste izmjeničnih kolektorskih strojeva,

jednofaznih, a zatim i trofaznih. Želio se stvoriti motor s regulacionim svojstvima istosmjernog motora, a s priključkom na uobičajenu izmjeničnu mrežu. To je bilo mnogo ekonomičnije rješenje od primjene Leonardova spoja, koji za isti efekt traži tri stroja. Moderni razvoj ispravljačke tehnike stvorio je medutim nove, još povoljnije mogućnosti priključka istosmjernih strojeva na izmjeničnu mrežu, tako da su mnoge vrste izmjeničnih kolektorskih strojeva izumrle. Samo su neke u tehnici našle posebne primjene.

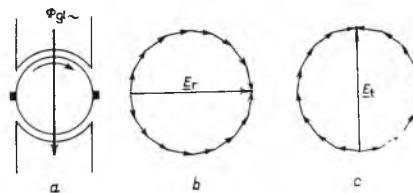
Poteškoće komutacije u izmjeničnim kolektorskim motorima znatno su veće nego u istosmjernim zbog složenijih odnosa induciranih napona u komutacionom svitku. Nepovoljno se odražava i činjenica da se komutiranje dešava pri nekoj proizvoljnoj trenutnoj vrijednosti izmjenične struje koja se mijenja od svitka do svitka (sl. 121). Osim toga se na trofaznim kolektorskim strojevima uopće ne može postaviti pomoćni pol za poništenje napona rotacije. Iz svih tih razloga u načelu se dopušta da izmjenični stroj uvijek malo iskri na četkicama.



Sl. 121. Oblik struje u jednom svitku izmjeničnog kolektorskog stroja. T_k Trajanje komutacije, i struja u promatranom svitku (podebljana crta)

Za jednofazni kolektorski stroj (sl. 122 a) vrijedi ista osnovna fizikalna slika kao i za istosmjerni. Na četkicama u neutralnoj zoni pojavljuje se (sl. 122 b) napon uslijed rotacije

$$E_r = 2 \sqrt{2} w_a p n \Phi_{gl}.$$



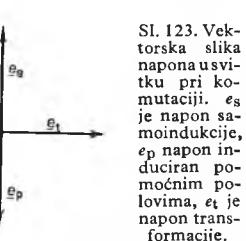
Sl. 122. Izmjenični kolektorski stroj. a) Shematski prikaz stroja, b) vektorski prikaz napona rotacije, c) vektorski prikaz napona transformacije

Istovremeno se u namotu uslijed vremenske promjene glavnog toka Φ_{gl} s frekvencijom mreže f inducira i transformatorski napon

$$E_t = 2 \sqrt{2} w_a f \Phi_{gl},$$

koji prethodi glavnom toku Φ_{gl} i naponu rotacije E_r za 90° . Napon E_t ne izaziva nikakvu struju u armaturi jer se poništava zbog položaja četkica u neutralnoj zoni (sl. 122 c). Ali u svitku koji upravo komutira i koji obuhvaća puni tok inducira se po zavodu napon $e_t = 4,44 f w_a \Phi_{gl}$, koji se ne može poništiti djelovanjem pomoćnog pola. Situaciju pokazuje vektorski dijagram na sl. 123 iz kojeg se vidi da je napon e_t uvisek prisutan u svitku koji komutira, a napon se samoindukcije e_s uvisek poništava naponom od polja pomoćnih polova e_p . Situaciju pogoršava i činjenica da je napon transformacije neovisan o brzini vrtnje, pa je uvisek prisutan (i na mirnom stroju) i ometa komutaciju. Potreba da se ograniči taj napon smanjila je znatno mogućnost građnje većih strojeva, jer to znači da

tok Φ_{gl} mora biti malen. To je, npr., dovelo do toga da se u nekim zemljama kao motori za električne lokomotive upotrebljavaju izmjenični kolektorski strojevi građeni za frekvenciju mreže 16 $\frac{2}{3}$ Hz. Redukcijom frekvencije na 1/3 smanjuje se naime na

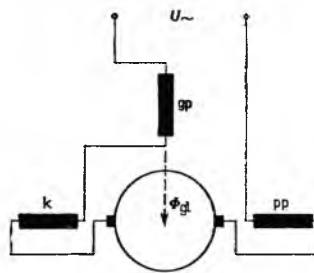


tok Φ_{gl} mora biti malen. To je, npr., dovelo do toga da se u nekim zemljama kao motori za električne lokomotive upotrebljavaju izmjenični kolektorski strojevi građeni za frekvenciju mreže 16 $\frac{2}{3}$ Hz. Redukcijom frekvencije na 1/3 smanjuje se naime na

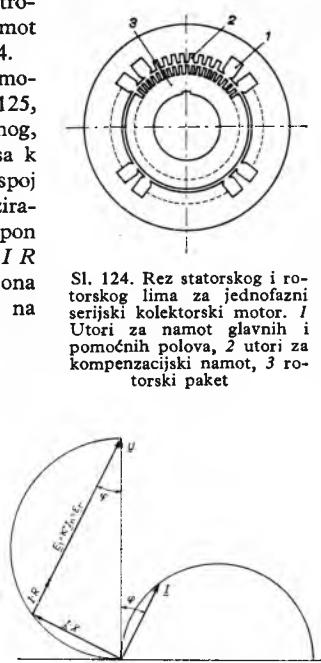
pon transformacije i time omogućuje gradnja motora veće snage (v. *Električna vuča*, TE 3, str. 690).

U nešto većim kolektorskim strojevima porazdijeli se uzbudni namot na uteore kako se vidi na sl. 124.

Jednofazni serijski (kolektorski) motor prikazan je shematski na sl. 125, gdje je sa gp označen namot glavnog, sa pp namot pomoćnog pola, a sa k kompenzacijom namot. U biti je spoj isti kao kod istosmjernih (kompenziranih) serijskih motora. Narinuti napon U troši se (sl. 126) na pad napona $I R$ na radnim otporima, na pad napona $I X$ na induktivnim otporima i na



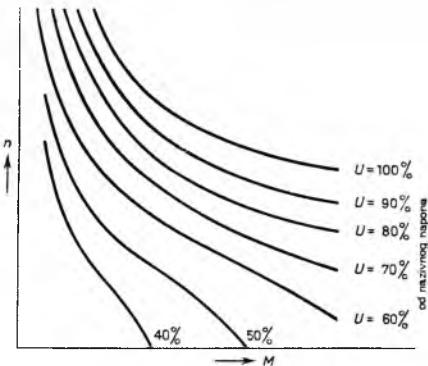
Sl. 125. Načelna shema spoja jednofaznog kolektorskog motora. gp Namot glavnog pola, pp namot pomoćnog pola, k kompenzacijski namot



Sl. 126. Dijagram jednofaznog serijskog kolektorskog motora

svaladanje protuelektromotorne sile $E_1 = k\Phi_{gl}n$ koja je zbog serijskog spoja jednaka $E_r = k'I_n$. Struja I zaostaje za naponom U za neki kut φ .

Osnovna fizikalna razlika između istosmjernog i izmjeničnog serijskog stroja samo je u induktivnom padu napona. Mijenja li se teret motora, mijenja se i struja I , pa stroj mora promjenom brzine vrtnje stvoriti potrebnu EMS za uspostavljanje naponske ravnoteže. Odatle je vanjska karakteristika izmjeničnog serijskog motora (sl. 127) slična karakteristici istosmjernog serijskog stroja (v. sl. 113). Osim primjene izmjeničnih serijskih motora za vuču



Sl. 127. Vanjske karakteristike jednofaznog serijskog kolektorskog izmjeničnog motora [$M = f(n)$]

s frekvencijom od $16\frac{2}{3}$ Hz (koja više nema budućnosti), najveća je primjena malih kolektorskih univerzalnih motora koji se mogu priključiti bilo na istosmjernu bilo na izmjeničnu mrežu. Univerzalni motor je danas dominantan u kućanskim aparatima, aparatima za brijanje i uopće u širokoj potrošnji (v. Mali električni strojevi u ovom članku, str. 221).

Trofazni kolektorski motor može se shvatiti kao trofazni asinhroni motor dopunjeno kolektorm, ili kolektorm i još jednim namotom. Tom dopunom postiže se — u odnosu prema normalnom asinhronom motoru — mogućnost regulacije brzine vrtnje. U rotoru normalnog trofaznog asinhronog motora inducira se napon djelovanjem rotacionog polja, pa je brzina vrtnje motora određena brzinom vrtnje rotacionog polja, tj. frekvencijom i

brojem pari polova. Teret ima pri tome neznatan utjecaj jer on samo određuje koliko će brzina vrtnje asinhronog motora zaostati, sklizati, prema brzini vrtnje rotacionog polja. Žele li se jače promijeniti vanjske karakteristike asinhronog motora, treba na kolute rotora izravno dovesti dodatni napon koji će promijeniti naponsku ravnotežu u rotoru, a s time i brzinu vrtnje, jer se ona onda mijenja tako da ponovo uravnoveži poremećene naponske odnose.

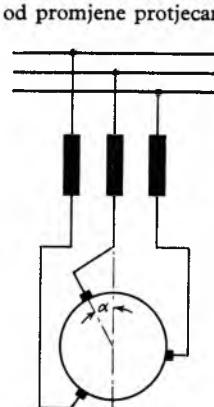
Poteškoća je u tome što frekvencija narunutog napona na rotoru treba da bude jednaka frekvenciji napona induciranoj u rotoru: $f_2 = s f_1$ (s je klizanje), tj. ona mora biti promjenljiva s brzinom vrtnje. Kolektor omogućuje dodatno galvansko spajanje statora i rotora asinhronog motora, dozvoljavajući da se u rotoru dodaje napon upravo potrebne frekvencije. Svojstvo je kolektora da na četkicama daje uvijek frekvenciju koju bi imali i mirni namoti stroja (oni koji ne rotiraju), bez obzira na to koja je frekvencija u kolektorskem namotu — on pretvara frekvenciju (npr. frekvencija je namota istosmjernog stroja jednaka n_p , a frekvencija na četkicama $f = 0$). Na sl. 128. vidi se taj odnos u trofaznom kolektorskem rotoru u usporedbi s kliznim kolutima, koji uvijek daju frekvenciju namota kojem pripadaju. Izvede li se još sistem četkica tako da se četkice mogu pomicati, može se u rotor dodavati i fazno pomaknuti napon, čime se osim brzine može mijenjati i faktor snage motora.

Različite mogućnosti spajanja rotora i statora preko četkica i kolektora, uz različite izvedbe sistema pomicanja četkica, dove do izvedbi različitih vrsta trofaznih kolektorskih motora koji se mogu regulirati u relativno širokim granicama, iznad i ispod sinhronne brzine vrtnje.

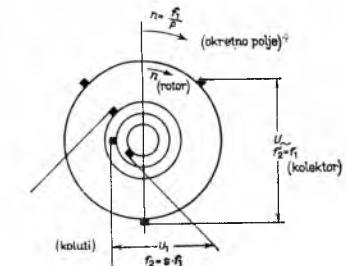
Poteškoće s komutacijom znatne su jer se pomoćni polovi ne mogu uopće ugraditi, pa se dimenzioniranjem stroja mora smanjiti napon komutacije na podnošljivu veličinu.

U praksi su se do danas održali samo trofazni poredni kolektorski motori napajani preko rotora (tzv. Schrage-motori) i, do nekle, trofazni serijski kolektorski motori.

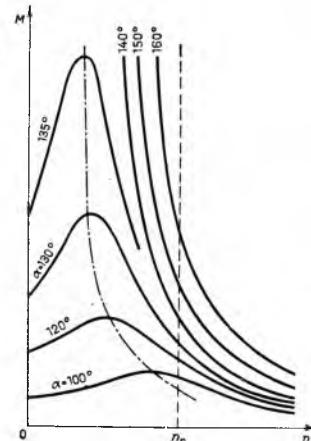
Trofazni serijski kolektorski motor. Izvede li se na rotoru trofaznog asinhronog motora umjesto kliznih koluta kolektor, a na njegove tri četkice koje stoje pod kutom od 120 električnih stupnjeva spoje krajevi faza statora kao na sl. 129, dobije se trofazni serijski kolektorski motor. Sistem četkica može se pomicati po kolektoru. Osnovno magnetiziranje stroja određuju i statorsko i rotorsko protjecanje, pa se pomakom četkica dobiju različita magnetska stanja i različite karakteristike, otprilike kao da su narinuti različiti naponi bez pomaka četkica. Serijski karakter pojedinih karakteristika potječe od promjene protjecanja a



Sl. 129. Shema spoja trofaznog serijskog kolektorskog motora. a Kut pomaka četkica



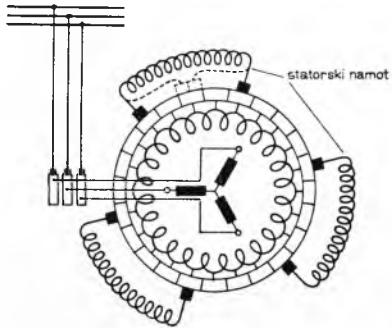
Sl. 128. Frekvencija na kliznim kolutima i na kolektoru kolektorskog namota trofaznog kolektorskog motora



Sl. 130. Vanjske karakteristike $n=f(M)$ trofaznog serijskog kolektorskog motora. a Kut pomaka četkica, n_s brzina vrtnje okretnog polja

s njime i glavnog toka pri promjeni tereta. Vanjske karakteristike pokazuju sl. 130.

Trofazni kolektorski poredni motor sistema »Schrage« ima na rotoru dva odvojena namota, jedan izведен na klixne kolute, a drugi na kolektor. Stator ima normalni trofazni namot, gdje je početak i kraj svake faze spojen na po jednu četkicu na kolektoru (sl. 131). Na mrežu su spojeni klixni koluti tako da je rotorski kolutni namot primar a statorski sekundar (u usporedbi s transformatorom ili asinhronim motorom). U rotorskim namotima



Sl. 131. Spoj »Schrage«-motora

vrlada frekvencija mreže a na kolektoru i statorskom namotu frekvencija sekundara.

Četkica spojena na početak jedne faze statorskog namota i četkica spojena na kraj te faze mogu se pomjerati jedna prema drugoj te se tako može dodavati manji ili veći napon u stator (sekundar). Istovremeno se može pomjerati (zakretati) cijeli sistem četkica i tako mijenjati kut dodatnog napona u statoru. Tako se u praznom hodu postiže promjena brzine vrtanja prema sinhronoj, proporcionalna omjeru dodatnog napona na statoru i vlastitog induciranih napona u statoru. Kako struja tereta

Sl. 132. Vanjske karakteristike »Schrage«-motora

gotovo uopće ne mijenja magnetsko stanje stroja, Schrage-motor ima porednu, tvrdnu vanjsku karakteristiku (sl. 132).

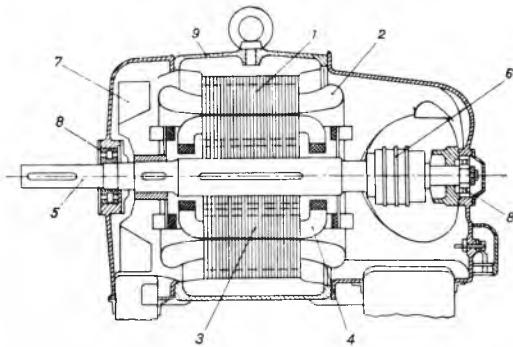
B. Jurković

ASINHRONI ELEKTRIČNI STROJEVI

Sinhroni je generator električni stroj velike snage koji se gradi pojedinačno ili u manjim serijama, asinhroni motor, pak, tipični je predstavnik električnog stroja male snage koji se pretežno gradi u velikim serijama.

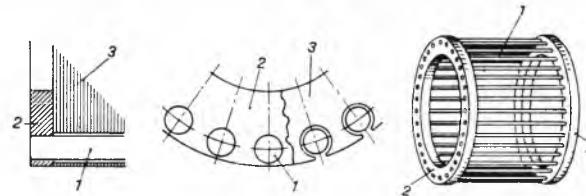
Stator asinhronog stroja u načelu je jednak statoru sinhronog stroja (v. str. 198). Njegov namot, koji je skoro uvijek trofazan a iznimno jednofazan, priključen je na mrežu i predstavlja primarnu stranu asinhronog motora, koja uzima snagu iz mreže.

Rotor asinhronog stroja ima na osovini paket okruglih limova s utorima u koje je smješten trofazni ili, iznimno, dvofazni na-



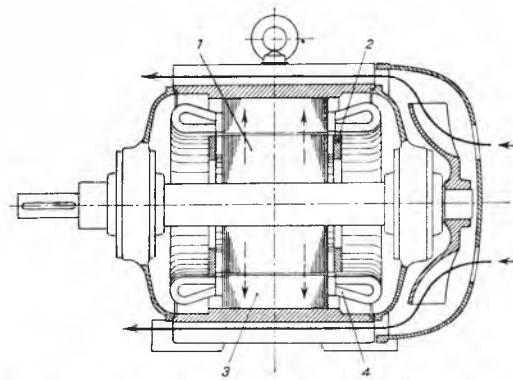
Sl. 133. Kolutni asinhroni motor. 1 Statorski paket, 2 rotorski paket, 3 rotorski namot, 4 rotorski namot, 5 osovina, 6 klixni koluti, 7 ventilator, 8 ležaji, 9 kućište

mot. Krajevi rotorskog namota mogu biti dovedeni na klixne kolute i biti pristupačni preko prislonjenih četkica. Motori s klixnim kolutima (sl. 133) zovu se *kolutni motori*. Danas se većinom grade rotori koji imaju u utorima štapove. Ti su štapovi s obje



Sl. 134. Rotorski namot kavezognog motora. 1 Vodiči u obliku štapova, 2 kratkospojni prsten, 3 rotorski paket

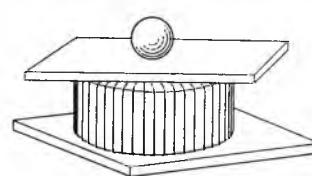
strane rotorskog paketa limova kratko spojeni kratkospojnim prstenima, tako da cijeli namot tvori u sebe zatvoreni kavez (sl. 134). Motori takve izvedbe (sl. 135) zovu se asinhroni motori s kaveznim rotorom ili *kavezni motori*. Rotor je kavezognog motora



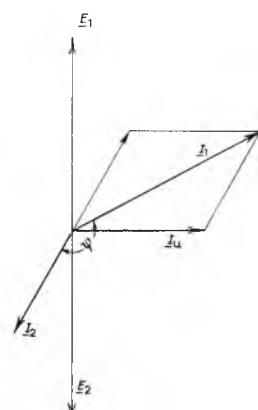
Sl. 135. Presjek kavezognog asinhronog motora. 1 Rotorski paket, 2 kratkospojni prsten, 3 statorski paket, 4 statorski namot

dakako mnogofazan jer zapravo svaki štap za sebe predstavlja posebnu fazu.

Asinhroni motor otkrio je 1882 naš zemljak Nikola Tesla pri ispitivanju malog neispravnog jednofaznog transformatora s jezgrom u obliku prstena. Na gornjoj daski, kojom je transformator bio pokriven, slučajno se našla metalna kugla (sl. 136). Kad je uključio transformator, Tesla je opazio da se kugla okreće. Ustanovio je da transformator ima na sekundarnoj strani spoj među zavojevima. Transformator je vjerojatno bio jako zasićen u željezu, tako da je struja magnetiziranja I_0 bila vrlo velika. Uslijed toga je fazni kut γ između primarne struje I_1 i sekundarne struje I_2 vrlo velik (sl. 137). U prostoru iznad transformatora, gdje se nalazila kugla, postojala su dva rasipna polja, primarno i sekundarno, koja su bila u fazi s primarnom strujom I_1 i sekundarnom I_2 . Uz prostorni pomak između primarnog namota i sekun-



Sl. 136. Pokus u toku kojeg je N. Tesla otkrio okretno polje i princip asinhronog motora



Sl. 137. Vektorski dijagram za tumačenje Teslinog pokusa

darnih kratkospojnih zavoja, i vremenski pomak izmjeničnih polja, nastalo je okretno polje, doduše nesimetrično, ali ipak dovoljno jako da asinhrono za sobom vuče kuglu. To je bio prvi asinhroni motor. Razmišljajući o tome Nikola Tesla je otkrio tajnu višefaznog sistema koji daje okretno polje. Već godine 1883 izradio je prvi model asinhronog motora, a dalje je razvio išao brzo.

Osnove asinhronih električnih strojeva

Asinhroni stroj u svojoj biti predstavlja električni transformator (v. *Transformator*).

Fizikalna slika asinhronog električnog stroja. Priključi li se na primarni (statorski) namot stroja trifazni izmjenični napon, taj napon protjeran kroz namot struju magnetiziranja dovoljnu da se uzbudi toliko okretno polje koliko je potrebno da se u primarnom namotu inducira napon jednak i suprotan narinutom naponu. Time je udovoljeno drugom Kirchhoffovom zakonu koji kazuje da suma svih napona u jednom zatvorenom krugu mora biti jednak nuli. U sekundarnom namotu (u rotoru) okretno polje inducira napon E_2 koji će biti veći ili manji od primarnog napona E_1 u omjeru rotorskog i statorskog broja zavoja N_2/N_1 i njihovih faktora namota f_{n2}/f_{n1} (v. str. 198):

$$E_2 = \frac{N_2 f_{n1}}{N_1 f_{n2}} E_1.$$

Pri tome se prepostavlja da je rotor zakočen, tj. da se ne može okreći.

Ako je sekundarni (rotorski) namot kratko spojen, sekundarno inducirani napon E_2 protjerat će preko rotorskog namota, koji ima impedanciju $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_{2\sigma}^2}$ (gdje $X_{2\sigma}$ znači rasipnu reaktanciju rotora), struju:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2\sigma}^2}}.$$

Ta struja u rotoru s magnetskim tokom okretnog polja Φ uzbudnjem od statorskog namota izaziva po Biot-Savartovom zakonu silu na pojedinim vodičima rotora na obodu, a time i okretni moment M u smjeru okretnog polja, koji je proporcionalan struci I_2 , toku Φ i kosinusu kuta φ_2 (tj. kuta između osi toka i osi strujnog obloga):

$$M = k I_2 \Phi \cos \varphi_2.$$

$I_2 \cos \varphi_2$ radna je komponenta struje u rotoru, a k faktor ovisan o konstruktivnim veličinama stroja.

Ako rotor nije čvrsto zakočen, počet će se okreći. Brzina vrtnje rotora n rast će i približavati se sinhronoj brzini n_s , tj. brzini vrtnje okretnog polja, koja iznosi $n_s = f_1/p$, gdje f_1 znači mrežnu frekvenciju, a p broj pari polova. Povećanjem brzine vrtnje smanjuje se zaostajanje rotora i rotorskog namota za okretnim poljem, a time i brzina kojom okretno polje sa svojim silnicama siječe vodiće u rotorskim utorima. Za to zaostajanje rotora za okretnim poljem uveden je pojam *klizanja* s , koje je određeno jednadžbom:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s},$$

gdje n znači brzinu vrtnje rotora.

Ako rotor stoji, $n = 0$, a $s = 1$; ako se rotor okreće sinhrono, $n = n_s$, a $s = 0$.

Dok rotor stoji, frekvencija f_2 napona inducirano u rotoru jednaka je primarnoj frekvenciji f_1 . Kad se rotor okreće u smjeru okretnog polja i sve manje za njim zaostaje, frekvencija napona u rotoru f_2 pada proporcionalno klizanju, tj. $f_2 = s f_1$, dok pri sinhronizmu ne postigne vrijednost nula, $f_2 = 0$.

Omjer primarnog i sekundarnog napona pri okrećanju rotora diktiran je, dakako, brojem zavoja N , faktorom namota f_n i frekvencijama struje u statoru f_1 i rotoru f_2 , pa iznosi

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{f_1 N_1 f_{n1}}{f_2 N_2 f_{n2}} = \frac{N_1 f_{n1}}{s N_2 f_{n2}}.$$

Ako je E_{20} sekundarni napon kad rotor miruje, uz primarni napon E_1 , tj. pri $s = 1$, sekundarni je napon u rotirajućem rotoru pri klizanju s

$$E_2 = s \frac{N_2 f_{n2}}{N_1 f_{n1}} E_1 = s E_{20}.$$

Proporcionalno povećanju brzine vrtnje pada klizanje s , a pada i napon E_2 u rotoru. (Pri sinhronizmu ne inducira se uopće nikakav napon u rotoru.) Pada li napon, pada i struja.

Okretni moment motora mijenja se s radnom komponentom struje. Motor će se ubrzavati dok se pri određenom klizanju s ne izjednači moment motora M i moment tereta M_t i time uspostavi stanje ravnoteže $M = M_t$. Kad nema tereta, motor se vrti u praznom hodu. On tada nema korisnog momenta ali još

uvijek mora svladavati moment trenja u vlastitim ležajevima, moment trenja rotora u zraku i moment ventilatora. Za svladavanje tih momenata potrebna je neka vrlo mala struja I_2 , a time također vrlo mali napon E_2 i vrlo malo klizanje s_0 (koje ipak nije jednako nuli), pa asinhroni motor bez vanjske pomoći ne može postići sinhronu brzinu vrtnje. Zato se i zove asinhroni motor.

Ekvivalentna shema asinhronog električnog stroja. Kad se zbog rotacije promijeni frekvencija napona inducirano u rotoru, mijenja se time i induktivni otpor rotora $X_{2\sigma}$ prema jednadžbi

$$X_{2\sigma} = 2 \pi f_2 L_{2\sigma} = 2 \pi s f_1 L_{2\sigma} = s X_{2\sigma},$$

ako se sa $X_{2\sigma} (= 2 \pi f_1 L_{2\sigma})$ označi rasipni induktivni otpor rotora kad on stoji.

Ako se u jednadžbu za struju I_2 , koja vrijedi samo kad rotor miruje, unese za induktivni otpor rotora X_2 izraz $s X_{2\sigma}$, a za napon E_2 inducirano u rotoru izraz $s E_{20}$, dobiva se

$$I_2 = \frac{s E_{20}}{\sqrt{(R_2/s)^2 + (s X_{2\sigma})^2}}.$$

Ta jednadžba vrijedi za svako pogonsko stanje, tj. i kad se rotor okreće bilo kojom brzinom.

Dijeljenjem brojnika i nazivnika ove jednadžbe sa s dobiva se ekvivalentna jednadžba

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_{2\sigma}^2}},$$

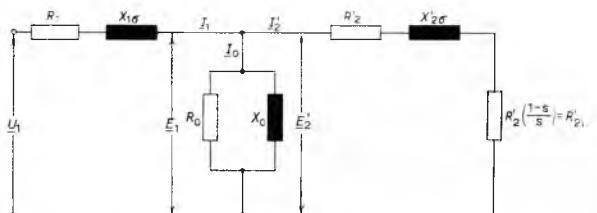
koja pokazuje da promjena veličine radnog otpora od R_2 na R_2/s daje kad rotor miruje istu vrijednost struje I_2 koju bi u stvarnom pogonu dalo klizanje s .

Frekvencija struje u rotoru koji se okreće nekom određenom brzinom vrtnje svakako se razlikuje od frekvencije struje u statoru, no ta razlika ne utječe ni na snagu ni na okretni moment, pa stoga ne utječe ni na rezultate naših razmatranja.

Asinhroni je stroj u biti transformator, pa za njega vrijedi ista ekvivalentna shema kao u teoriji transformatora, uz uvjet, dakako, da se rotor ne vrti. Ekvivalentna jednadžba omogućava primjenu ekvivalentne sheme ako se za radni otpor unese vrijednost R'_2/s . Kako je preračunata vrijednost stvarnog otpora rotorskog namota R'_2 , u shemu se dodaje odvojeno fiktivni otpor

$$R'_{2f} = \frac{R'_2}{s} - R'_2 = R'_2 \frac{1-s}{s},$$

što se vidi na sl. 138.



Sl. 138. Ekvivalentna shema asinhronog motora

Analogno kao za ekvivalentnu shemu transformatora, tako treba i za ekvivalentnu shemu asinhronog stroja sve vrijednosti veličina u sekundarnom krugu preračunati na primarnu stranu (v. Transformator). Preračunate vrijednosti označene su crticom:

$$I'_2 = I_2/s, \quad E'_{20} = E_{20}s, \quad R'_2 = R_2s^2 \quad \text{i} \quad X'_2 = X_2s^2,$$

gdje je s omjer transformacije, koji za asinhronne motore ovisi o broju zavoja i faktorima namota statora i rotora.

Bilanca snage asinhronog motora slijedi iz ekvivalentne sheme koja nadomešta shemu pogonskog stanja tog motora, pa mora vjerno prikazivati i energetske odnose. Produkt $m_2 I_2^2 R_2$ predstavlja »električnu snagu« P_e , zapravo gubitke zbog Jouleove topline u rotorskom namotu motora sa m_2 fazama u rotoru. Kako je već spomenuto, dodatni otpor $R_2(1-s)/s$ fiktivan je i u pogonskom stanju asinhronog motora ne postoji. Zbog toga gubici Jouleove topline u tom fiktivnom otporu, tj. $m_2 I_2^2 R_2(1-s)/s$, ne mogu biti drugo nego ekvivalent mehaničke snage P_{mh} koju motor razvija. Iz toga slijedi zaključak da je

$$\frac{P_{el}}{P_{meh}} = \frac{m_2 I_2^2 R_2}{m_2 I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s}} = \frac{s}{1-s}.$$

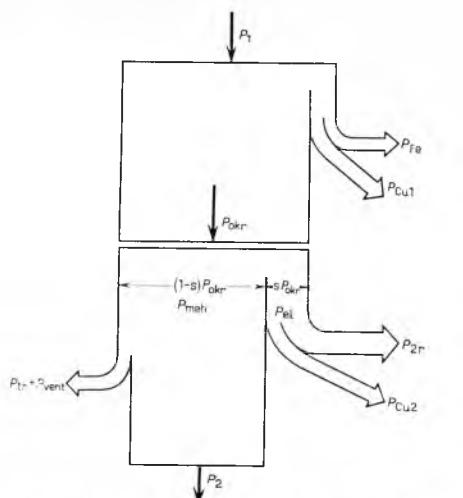
Ovaj izraz vodi do spoznaje koja je vrlo važna za asinhroni motor: da se snaga koja se preko okretnog polja prenosi kroz zračni raspored iz statora u rotor, tzv. snaga okretnog polja P_{okr} , dijeli na električnu i mehaničku snagu u omjeru $s : (1-s)$. S porastom klizanja s raste udio električne snage P_{el} u rotorskom krugu, a sve je manji udio razvijene pogonske snage P_{meh} :

$$P_{okr} = P_{el} + P_{meh} = P_{el} + P_{el} \frac{1-s}{s},$$

$$P_{el} = s P_{okr}.$$

Odatle slijedi da je $P_{meh} = (1-s)P_{okr}$.

Električna snaga troši se u obliku gubitaka zbog Jouleove topline u otporima rotorskog kruga. Osim otpora rotorskog namota R_2 može se u rotorski krug preko kliznih koluta uključiti dodatni radni otpor R_{2r} (stvarni otpor, a ne onaj fiktivni iz ekvivalentne sheme). Električna snaga utrošena u rotorskog namota predstavlja gubitak i uzrokuje zagrijavanje rotora. Nasuprot tome može se električna snaga utrošena u dodatnom otporu R_{2r} korisno upotrijebiti, npr. za električno grijanje, i ona ne grijje motor.



Sl. 139. Energetski dijagram asinhronog stroja

Na osnovi tog razmatranja dobiva se bilanca električne snage za asinhroni motor prikazana na sl. 139. Motor sa m_1 fazama u statoru uzima iz mreže snagu $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$. Mali dio nje troši se na gubitke u bakru statora P_{cu1} i na gubitke u željezu P_{fe} . Kad se odbiju ti gubici, preostaje snaga okretnog polja P_{okr} , koja preko zračnog raspora ulazi u rotor. Ona se dijeli u omjeru $(1-s) : s$: na mehaničku snagu P_{meh} i električnu snagu P_{el} . Čista mehanička snaga P_2 na osovini motora dobiva se ako se od P_{meh} odbije snaga pretvorena u gubitke zbog trenja P_{tr} i ventilacije P_{vent} . Električna snaga P_{el} dijeli se na gubitke zbog Jouleove topline u bakru rotora P_{cu2} i na električnu snagu P_{2r} koja izlazi iz rotora preko kliznih koluta. Ona se obično troši u dodatnom otporu uključenom u rotorski krug radi regulacije brzine vrtnje, pa se zato taj dodatni otpor označuje sa R_{2r} .

Karakteristika momenta asinhronog motora. Karakteristika tereta motornih pogona gotovo je uvijek dana jednadžbom momenta tereta M_t u ovisnosti o brzini vrtnje $M_t = f(n)$.

Za rješavanje je elektromotornih pogona zbog toga važno da se okretni moment motora M prikaže u ovisnosti o brzini vrtnje n ili o klizanju s , što je ekvivalentno jer je s funkcija od n :

$$M = f(n) = f(s).$$

Ta karakteristična ovisnost momenta motora o brzini vrtnje zove se i *vanjska karakteristika motora*.

Iz mehanike je poznato da je okretni moment $m = P_{meh}/\omega$. Kako je $\omega = (1-s)\omega_s$, slijedi:

$$M = \frac{(1-s)P_{okr}}{(1-s)\omega_s} = \frac{P_{okr}}{\omega_s},$$

gdje ω znači kutnu brzinu motora, a ω_s kutnu brzinu okretnog polja (sinhronu kutnu brzinu): $\omega_s = 2\pi n_s$.

Dalje slijedi:

$$P_{okr} = \frac{P_{el}}{s} = \frac{m_2 I_2^2 R_2}{s},$$

pa prema tome jednadžba momenta glasi:

$$M = \frac{P_{okr}}{2\pi n_s} = \frac{m_2 E_{20}^2 R_2}{2\pi n_s \left[\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_{2\sigma}^2 \right] s}.$$

Iz gornje jednadžbe slijedi da je moment motora ovisan o jednoj jedinoj varijabli, tj. o klizanju motora s , odnosno o njegovoj brzini vrtnje n , koja je funkcija klizanja.

Prema tome, pri određenim otporima R_2 i $X_{2\sigma}$ svakoj brzini vrtnje odgovara jedan određeni moment motora, definiran jednadžbom momenta.

Prekretnim momentom M_{pr} naziva se obično maksimalni moment. On predstavlja važnu veličinu. Ako, naime, opterećenje motora koji je prije radio u praznom hodu sve više raste, brzina vrtnje sve više pada. Moment najprije raste do maksimalne vrijednosti i time dolazi do prekretne tačke, tj. poslije toga moment počinje opadati i motor stane. Moment je maksimalan kad je izraz

$$\left[\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_{2\sigma}^2 \right] s$$

iz jednadžbe momenta minimalan. Derivacijom po s i izjednačavanjem s nulom dobiva se pripadno prekretno klizanje, označeno sa s_{pr} :

$$s_{pr} = \pm \frac{R_2}{X_{2\sigma}}.$$

Uvrsti li se s_{pr} u jednadžbu momenta, dobiva se jednadžba pomoću koje se može odrediti prekretni moment M_{pr} :

$$M_{pr} = \frac{m_2 E_{20}^2}{2\pi n_s \cdot 2 X_{2\sigma}}.$$

Ova jednadžba pokazuje da je prekretni moment određenog motora pri konstantnom naponu ovisan samo o induktivnom otporu, a neovisan o radnom otporu. Što je veći rasipni induktivni otpor $X_{2\sigma}$ to manji će biti prekretni moment. Ako treba postići velik prekretni moment i time veliku preopteretljivost motora, mora se graditi motor da ima što manje rasipanje. Tako ima npr. motor s otvorenim utorima malo rasipanje i velik prekretni moment.

Dijeljenje jednadžbe momenta s jednadžbom prekretnog momenta daje

$$\frac{M}{M_{pr}} = \frac{2 X_{2\sigma}}{\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_{2\sigma}^2} \cdot \frac{R_2}{s},$$

i s pomoću jednadžbe prekretnog klizanja

$$\frac{M}{M_{pr}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{pr}} + \frac{s_{pr}}{s}}.$$

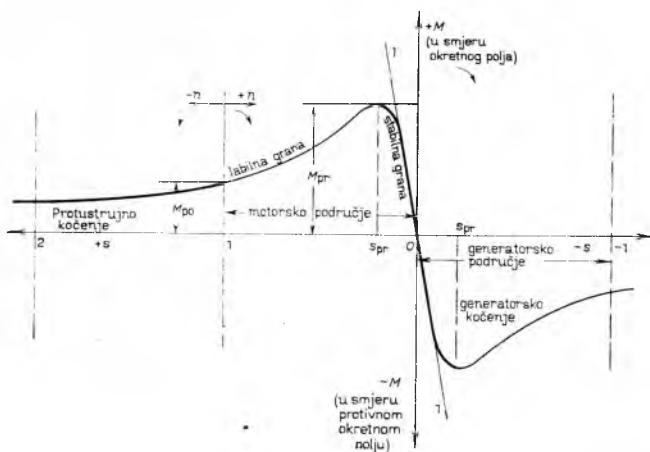
To je, u pojednostavnjenu obliku, tzv. Klossova jednadžba, koja pokazuje da je karakteristika momenta ovisna samo o prekretnom momentu M_{pr} i o prekretnom klizanju, odnosno omjeru $R_2/X_{2\sigma}$. Pomoću Klossove jednadžbe ucrtana je u sl. 140 cijela karakteristika momenta.

U toj karakteristici naneseni su iznad osi apscisâ pozitivni momenti, koji okreću rotor u smjeru okretnog polja, a ispod osi apscisâ negativni momenti, koji djeluju na rotor u suprotnom smjeru.

Tačka $s = 1$ na osi apscisâ označuje stanje kada rotor stoji; nadesno od nje raste brzina vrtnje u smjeru vrtnje okretnog polja, a nalijevo raste u suprotnom smjeru.

Područje s istim smjerom momenta i brzine vrtnje predstavlja motorsko područje, tj. od $s = 0$ do $s = 1$. Tamo gdje su smjerovi

momenta i brzine vrtnje različni nalaze se kočna područja i to: za $s < 0$ generatorsko kočno područje u nadsinhronizmu i za $s > 1$ protustrujno kočno područje.

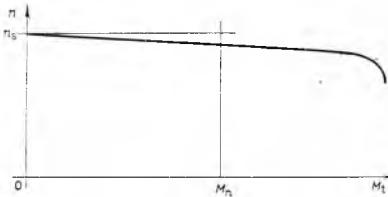


Sl. 140. Karakteristika okretnog momenta asinhronog stroja konstruirana pomoću Klossove jednadžbe

Onaj dio karakteristike momenta u kojem stroj normalno radi izvučen je u sl. 141 debelom crtom. Uvjet je stabilnosti motornog pogona da povećanjem klizanja moment motora brže raste od momenta tereta, što se može izraziti nejednadžbom:

$$\frac{dM}{ds} > \frac{dM_t}{ds}.$$

Pri konstantnom momentu tereta to je tako samo u dijelu karakteristike od sinhronizma ($s = 0$) do prekretnog momenta ($s = s_{pr}$), pa se taj dio često naziva »stabilnom granom« motorske karakteristike, za razliku od »labilne grane« između $s = s_{pr}$ i $s = 1$.



Sl. 141. Stabilni dio vanjske karakteristike asinhronog motora, $n = f(M_t)$

Često se govori o vanjskoj karakteristici motora, koja treba da predstavlja ovisnost brzine vrtnje o momentu tereta $n = f(M_t)$, te je u stvari samo za 90° zaokrenuta karakteristika momenta. Vanjska karakteristika prikazana je u sl. 141; redovito se crta samo njezin stabilni dio.

Kružni dijagram omogućava utvrđivanje pogonskih veličina (npr. struja, snaga, klizanja itd.) asinhronog motora pri raznim opterećenjima. Vektorski dijagram može se crtati samo s vektorima (zapravo kazaljkama, v. str. 162) električnih veličina iste frekvencije. Zbog toga tek ekvivalentna shema omogućuje prikazivanje rada asinhronog motora s pomoću vektorskog dijagrama. Ako se u početku zanemare primarni otpori R_1 , $X_{1\sigma}$, kao što je učinjeno i u dosadašnjem razmatranju, inducirat će se u namotu rotora koji miruje konstantan napon E_{20} . Prema ekvivalentnoj shemi (v. str. 186) slijedi da struja u rotoru iznosi

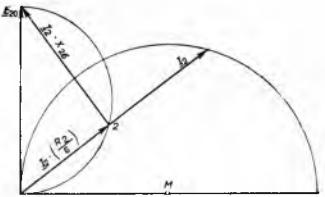
$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{(R_2/s)^2 + X_{20}^2}}.$$

Iz prednje jednadžbe mogu se dobiti pripadni padovi napona koji su, ako se izraze kompleksnim brojevima, po Kirchhoffovom zakonu jednaki E_{20} :

$$I_2 \cdot \frac{R_2}{s} + j I_2 X_{20} = E_{20},$$

gdje je $j = i = \sqrt{-1}$. To je prikazano i u vektorskem dijagramu

na sl. 142. Iz tog dijagrama mogu se izvesti ovi zaključci: tačka 2 vektora $j I_2 X_{20}$ mora ležati na kružnici. Budući da je X_{20} za određeni motor konstantna veličina, struja I_2 mora biti proporcionalna sa $I_2 X_{20}$, a kako je pravac vektora I_2 okomit na pravac vektora $j I_2 X_{20}$, i vrh vektora I_2 treba da leži na kružnici sa središtem u tački M . Iz toga se može zaključiti da za svaki pogonski slučaj, tj. za određeno klizanje s , vrh vektora I_2 mora ležati na određenoj tački kružnice.



Sl. 142. Vektorski dijagram napona (pravokutni trokut napona) i struje za asinhroni stroj kad rotor miruje

Markantne pogonske tačke za asinhroni motor ucrtane su u kružnom dijagramu struja na slici 143.

Kad je motor u sinhronizmu, klizanje s jednako je nuli, a R_2/s je beskonačno, pa je struja $I_2 = 0$. Tome odgovara na kružnom dijagramu tačka P_0 ($s = 0$).

Kad je motor zakočen, klizanje je $s = 1$, $R_2/s = R_2$, te se dobiva vektor struje kratkog spoja I_{2k} koji zaostaje za naponom E_{20} za kut φ_{2k} :

$$\tan \varphi_{2k} = \frac{X_{20}}{R_2}.$$

Vrh vektora I_{2k} određuje tačku P_k ($s = 1$).

U slučaju kad se rotor vrti vanjskom snagom (dovedenom na osovinu) protivno smjeru okretnog polja, klizanje postaje sve veće. Može se zamisliti beskonačna brzina vrtnje rotora, što daje:

$$s = \frac{\infty - n_s}{n_s} = \infty, \frac{R_2}{s} = \frac{R_2}{\infty} = 0,$$

a na kružnom dijagramu tačku P_∞ , koja je određena sa $s = \infty$ i $R_2 = 0$. Budući da je $R_2 = 0$, struja I_2 više nema radne komponente, pa tačka P_∞ ($s = \infty$) mora ležati na osi dijagrama i određena je jednadžbom

$$I_{2\infty} = \frac{E_{20}}{X_{20}}.$$

Iz toga proizlazi zaključak da je promjer kružnice određen induktivnim otporom, a omski otpor rotorskog kruga određuje samo položaj tačke P_k na toj kružnici. Što je veći taj omski otpor to se tačka P_k više pomiče po kružnici prema tački P_0 .

Pojednostavljeni kružni dijagram, određen na naprijed opisani način, konstruiran je uz zanemarenje primarnih otpora (R_1 i $X_{1\sigma}$). Takav kompletan dijagram prikazan je na sl. 144. Dužinom $P_k C$ (koja je paralelna s vektorom napona E_{20}) određena je radna komponenta vektora struje I_{2k} i ona iznosi

$$I_{2kr} = I_{2k} \cos \varphi_{2k}.$$

Analogno vrijedi za proizvoljni vektor I_2 , npr. vektor za pogonsku tačku P . Njegova radna komponenta (dužina \overline{PB}) iznosi

$$I_{2r} = I_2 \cos \varphi_2.$$

Snaga okretnog polja određena je jednadžbom

$$P_{okr} = m_2 E_{20} I_2 \cos \varphi_2,$$

gdje m_2 znači broj faza u motoru.

Uz pretpostavku da je napon E_{20} konstantna veličina, može se zaključiti da radna komponenta vektora struje u svakoj pogonskoj tački (npr. PB) na kružnom dijagramu određuje u nekom mjerilu snagu okretnog polja za dotični pogonski slučaj. Kako je

$M = P_{okr}/\omega_s$, gdje je ω_s (sinhrona kutna brzina) za određeni motor i određenu frekvenciju mreže konstantna veličina, može se tvrditi da radna komponenta vektora struje svake pogonske tačke određuje u nekom mjerilu i veličinu momenta motora za tu tačku. Zbog toga se linija $P_0 - P_\infty$ naziva *linijom momenta*.

Pomoću pojednostavljenog kružnog dijagrama prema sl. 144 mogu se ustanoviti i dalji odnosi između radne komponente, momenta i snage. Pri zakočenom motoru vrijedi jednadžba

$$\tan \varphi_{2k} = \frac{X_{2\sigma}}{R_2} = \frac{\overline{P_0 C}}{\overline{P_k C}} = \frac{\overline{P_0 B}}{\overline{A B}}.$$

Za pogon u motorskom području vrijedi

$$\tan \varphi_2 = \frac{X_{2\sigma}}{R_2/s} = \frac{\overline{P_0 B}}{\overline{P B}}.$$

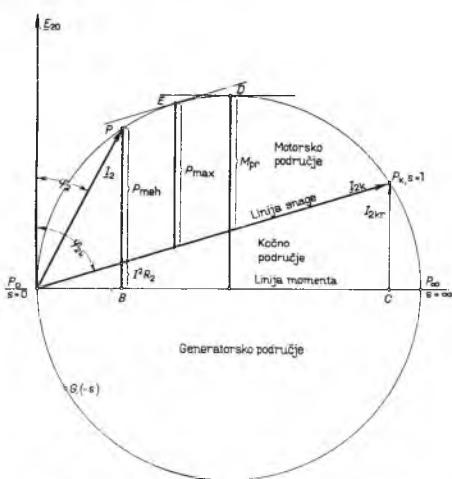
Dijeljenjem jednadžbi dobiva se:

$$\begin{aligned} \frac{R_2/s}{X_{2\sigma}} : \frac{R_2}{X_{2\sigma}} &= \frac{1}{s} = \frac{\overline{P B}}{\overline{P_0 B}} : \frac{\overline{A B}}{\overline{P_0 O}} \\ \frac{PA}{AB} &= \frac{PB - AB}{AB} = \frac{1-s}{s}. \end{aligned}$$

Gornji odnosi dokazuju da pravac $P_0 - P_k$ dijeli radnu komponentu vektora struje bilo u kojoj tački P u odnosu $(1-s) : s$, tj. u odnosu mehaničke i električne snage. Već je prije (v. str. 187) pokazano da se snaga okretnog polja dijeli na mehaničku i električnu snagu u omjeru $P_{meh}/P_{el} = (1-s)/s$. Prema tome, dužina AB predstavlja u nekom mjerilu električnu snagu u rotorskom krugu, a PA u istom mjerilu mehaničku snagu motora. Zato se linija $P_0 - P_k$ zove *linija snage*.

Tangenta na kružnicu paralelna s linijom momenta daje tačku D . Ta pogonska tačka određuje maksimalni moment, tj. prekretni moment M_{pr} asinhronog motora. Tangenta na kružnicu paralelna s linijom snage daje pogonsku tačku E s maksimalnom mehaničkom snagom P_{max} asinhronog motora.

Ako se rotor vanjskom snagom, dovedenom preko osovine, vrti preko sinhronizma u područje negativnog klizanja, pogonska tačka se pomiče po kružnici dalje od P_0 naniže, npr. u tačku G s negativnim klizanjem $-s$. Snaga kojom se mora vrtjeti rotor daje negativnu snagu okretnog polja, koja je suprotnog smjera, tj. ulazi iz rotora preko zračnog raspora u stator i dalje, kad se odbiju svi gubici, kao generatorska snaga odlazi u mrežu. Iz asinhronog motora nastao je asinhroni generator.



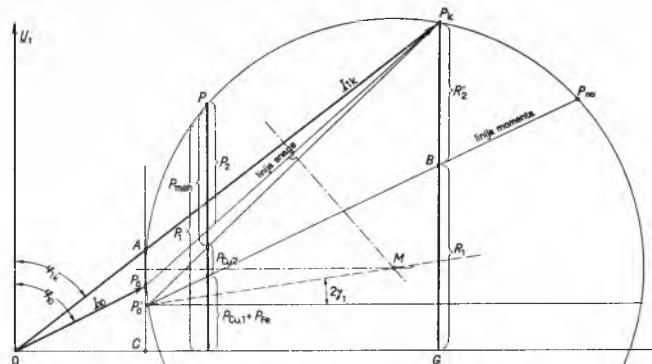
Sl. 144. Pojednostavljeni kružni dijagram asinhronog stroja

Krug kružnog dijagrama, čiji obod prema sl. 144 predstavlja vrhove svih mogućih rotorskih struja, time je razdijeljen na tri područja. *Motorsko područje* seže od $s = 0$ do $s = 1$, odnosno od P_0 do P_k . *Generatorsko područje*, područje negativnih klizanja ($-s$) seže od $s = 0$ do $s = -\infty$, odn. od P_0 do P_∞ na donjem dijelu kružnice. Od tog područja praktički dolazi u obzir samo

okolica tačke P_0 , s neznatnom vrijednosti negativnog klizanja, jer se iz mehaničkih razloga zbog velikih centrifugalnih sila ne smije povećavati brzina vrtanje mnogo preko sinhronizma, niti bi to bilo korisno u električnom pogledu. Povećanjem klizanja rastu naime gubici Jouleovom toplinom u rotoru. *Kočno područje* seže od $s = 1$ do $s = \infty$, odn. od P_k do P_∞ . U tom se području rotor s klizanjem većim od 1 okreće protiv smjera vrtanje statorskog okretnog polja i to s momentom koji ipak djeluje u pravcu okretnog polja. Iz toga slijedi da se moment protivi okretanju rotora, pa rotor treba okretati vanjskom silom. Moment protiv smjera okretanja svakako je kočni moment, pa se to područje zato i naziva kočnim područjem. Klizanju $s = 2$ odgovara sinhrona brzina vrtanje u protivnom smjeru. Analogno kao pri generatorskom pogonu, ni pri kočnom ne smije se znatno prekoracići klizanje $s = 2$ jer to rotor mehanički ne bi izdržao.

Kružni dijagram u sl. 144 prikazuje samo sekundarni strujni krug asinhronog motora. Kružni dijagram primarne struje računski konstruirati vrlo je složen zadatak.

Potpuni kružni dijagram može se, međutim, konstruirati s pomoću podataka dobivenih na nekom konkretnom motoru pri pokušima praznog hoda i kratkog spoja. U tom slučaju treba izmjjeriti primarne struje pri praznom hodu I_{10} i pri kratkom spoju I_{1k} , kao i pripadne kutove faznog pomaka između narinutog napona U_1 i struje praznog hoda, tj. kut φ_{10} , i struje kratkog spoja, tj. kut φ_{1k} . Vektori tih primarnih struja određuju prema sl. 145



Sl. 145. Potpuni kružni dijagram asinhronog stroja

tačke P_0 i P_k , koje svakako leže na kružnici. Tačka P_0 razlikuje se od tačke P'_0 ($s = 0$) jer se u praznom hodu ipak troši mehanička snaga za pokrivanje gubitaka zbog trenja i ventilacije. Zato je potrebna mala rotorska struja I_{20} , a tim i neko malo klizanje, relativno to manje što je veća snaga motora. Jasno je da asinhroni motor u praznom hodu ne može postići sinhronizam, pa se zato na kružnici tačka P_0 nalazi nešto iznad tačke P'_0 .

Središte kruga M treba da leži nešto više od tačke P'_0 , i to pod kutom $2\gamma_1$ (sl. 145). Kut γ_1 slijedi iz jednadžbe

$$\tan \gamma_1 = \frac{I_2 R_2}{U_1}.$$

Osim toga tačka M mora lezati na simetrali dužine $\overline{P_0 P_k}$ jer te dvije tačke leže na kružnici. Praktički se može, međutim, s dovoljnom tačnošću odrediti tačka M tako da se povuče simetrala na dužinu $\overline{P_0 P_k}$ i horizontala na sredini između tačaka A i P_0 . Sjecište tih dvaju pravaca određuje tačku M .

Ako se udaljenost tačke P_k od horizontalne $\overline{P_k G}$, koja određuje gubitke u bakru rotora i statora, dijeli u omjeru tih gubitaka, tj.

$$\frac{I_2'^2 R_2}{I_1^2 R_1} \approx \frac{R_2'}{R_1},$$

dobiva se tačka B , kroz koju mora ići linija momenta.

Dužina $\overline{P_0 C}$ određuje radnu komponentu struje praznog hoda koja pokriva gubitke zbog trenja i ventilacije i gubitke Jouleovom toplinom $I_2'^2 R_1$ u primarnom namotu od struje praznog hoda $\overline{(P'_0 P_0)}$ te gubitke u željezu $\overline{(CP'_0)}$. Ako se izmjere gubici u željezu i gubici zbog trenja i ventilacije, uz praktički

zanemarljive gubitke zbog Jouleove topline, može se izračunati pripadna radna komponenta struje:

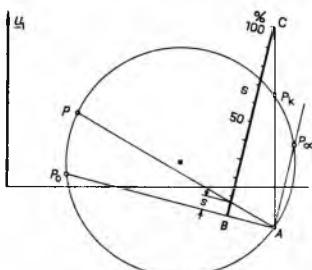
$$\overline{P'_0 P_0} = I_{0 \text{ meh}} = \frac{P_{\text{meh}}}{m_1 U_1},$$

$$\overline{CP'_0} = I_{0 \text{ Fe}} = \frac{P_{0 \text{ Fe}}}{m_1 U_1}.$$

To znači da se može mjerjenjem jednih ili drugih gubitaka odrediti tačka P'_0 te kroz tačke P'_0 i B povući linija momenta.

Vertikala srušena iz proizvoljne tačke P predstavlja snagu koju motor uzima iz mreže, a dijeli se na $P_{Fe} + P_{Cu1}$, P_{Cu2} i P_{meh} kako je to ucrtano u sl. 145. Ta razdioba gubitaka nije potpuno tačna, no u većini slučajeva zadovoljava, naročito za veće motore.

Kružni dijagram može da se upotpuni pomoćnom konstrukcijom za određivanje klizanja za svaku pogonsku tačku. U sl. 146 ucrtana je jedna od najviše uobičajenih iz niza konstrukcija. Tačka A izabrana je proizvoljno na kružnici ispod tačke P_∞ . Iz tačke A povuće se linija kroz tačku P_k . Zatim na proizvoljnom mjestu treba povući paralelu BC s pravcem AP_∞ i podjeliti je na 100 podjeljaka. Linija iz tačke A prema pogonskoj tački P odsijeca na dužini BC toliko podjeljaka koliko iznosi u postocima klizanje za to pogonsko stanje.

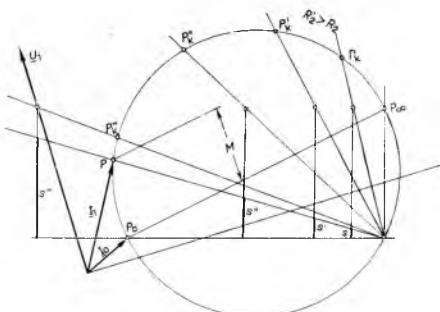


Sl. 146. Pomoćna konstrukcija za određivanje veličine klizanja pomoću kružnog dijagrama

Regulacija brzine vrtnje asinhronih motora

Regulacija brzine vrtnje asinhronih motora može se provoditi na više načina: povećanjem radnog otpora u krugu rotora, promjenom mrežne frekvencije i prespajanjem polova.

Povećanje radnog otpora u krugu rotora ne uzrokuje i promjenu promjera kruga u kružnom dijagramu, već samo pomicanje tačke P_k po obodu kruga u smjeru tačke P_0 , kako je to za različne dodatne otpore ucrtano u kružni dijagram na sl. 147 (tačke P'_k , P''_k , P'''_k). Ako je motor stalno opterećen konstantnim



Sl. 147. Utjecaj povećanja radnog otpora na položaj radne tačke u kružnom dijagramu

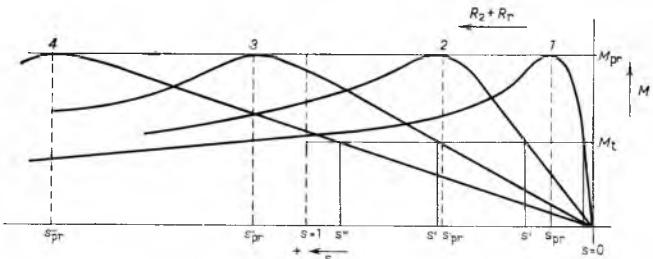
momentom tereta M_t , time je u kružnom dijagramu već određena i pogonska tačka P , u kojoj je moment motora M jednak momentu M_t . To znači da se promjenom otpora u krugu rotora tačka P ne može mijenjati. Nomogrami za određivanje klizanja ucrtani u taj kružni dijagram pokazuju da se pomicanjem tačke P_k u položaje P'_k , P''_k , P'''_k mijenja i pripadajuće klizanje s' , s'' , s''' . Ako je radni otpor uključenog otpornika tako velik da tačka P_k padne u tačku P , klizanje je 100%, tj. rotor stane. Iz toga slijedi da se povećanjem radnog otpora u rotorskom krugu može regulirati brzina vrtnje od punе brzine do nule. Za svaku brzinu vrtnje potreban je određeni radni otpor, koji se zove regulacioni otpor R_r , budući da služi za regulaciju brzine vrtnje.

Mogućnost regulacije brzine vrtnje dodatnim omskim otporom u rotorskom krugu vidi se i iz dijagrama momenata u slici 148.

Povećanjem otpora (krivulje 1...4) u rotorskem krugu raste, kako je već prije pokazano, prekretno klizanje:

$$s_{pr} = \frac{R_2}{X_{2\sigma}}; s_{pr}' = \frac{R_2 + R_r'}{X_{2\sigma}}; s_{pr}'' = \frac{R_2 + R_r''}{X_{2\sigma}}; s_{pr}''' = \frac{R_2 + R_r'''}{X_{2\sigma}},$$

i to proporcionalno otporu $R_2 + R_r$.



Sl. 148. Dijagram momenata asinhronog motora pri različnim iznosima (1...4) otpora R_2 koji se izvana dodaje omskom otporu rotorskog namotaja asinhronog stroja radi regulacije brzine vrtnje. M_{pr} prekretni moment, s_{pr} prekretno klizanje

Cesto je potrebno računski ustanoviti koliko mora biti taj otpor R_r da bi se pri konstantnom momentu tereta M_t postiglo klizanje s' za razliku od klizanja s koje odgovara istom momentu tereta, ali bez regulacionog otpora, tj. sa kratko spojenim kliznim kolutima.

Ako je moment tereta M_t konstantan, mora biti i struja I_2 konstantna po iznosu i po faznom pomaku, što je vidljivo iz kružnog dijagrama na sl. 147. Određenom momentu tereta odgovara samo jedna pogonska tačka na kružnom dijagramu, a toj tački samo jedan vektor struje I_2 . Prema tome može se postaviti jednadžba

$$I_2 = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2\sigma}^2}} = \text{konst.} = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2 + R_r}{s'}\right)^2 + X_{2\sigma}^2}},$$

iz koje slijedi:

$$\frac{R_2}{s} = \frac{R_2 + R_r}{s'}, \quad R_r = R_2 \frac{s' - s}{s},$$

pa pri poznatom R_r pripadno klizanje iznosi:

$$s' = s \frac{R_2 + R_r}{R_2}.$$

Gornji postupak ima za praktično izračunavanje potrebnog regulacionog otpora manu zbog koje nije praktički primjenljiv, iako je fizikalno egzaktan. Veličina otpora R_r je, naime, u gornjim jednadžbama tačno definirana kao otpor kojim se dobiva, uz određeni teret, određena struja I_2 i klizanje s . Mjerjenje R_r i s ne može se izvršiti istovremeno, već treba najprije opteretiti motor u pogonu određenim teretom i mjeriti klizanje, a zatim zaustaviti motor i mjeriti otpor. Rotorski namot se, međutim, nakon zaustavljanja brzo hlađi pa je njegov izmjereni otpor uslijed toga manji. Netačnost mjerjenja otpora R_r i klizanja s mogu u računu djelovati u istom smislu i time se vrlo jako odraziti na izračunato iznosu otpora R_r .

Treba zato naći drugi put za praktično, jednostavno, a dosta tačno izračunavanje otpora R_r regulacionog otpornika. Radi toga treba razmotriti fizikalnu sliku rada motora kad se brzina vrtnje regulira regulacionim otporom. U tom je slučaju okretno polje Φ proporcionalno visini napona, za koji se u daljem računu pretpostavlja da je konstantan. To okretno polje inducira u rotoru napon koji je proporcionalan klizanju: $E_2 = s E_{20}$.

Ako je, po prepostavci, moment tereta konstantan, konstantna je i struja I_2 :

$$M = M_t = k \Phi I_2 = \text{konst.}; \quad I_2 = \text{konst.}$$

Određeni moment tereta zahtjeva određenu struju I_2 . Ta struja traži određeni napon E_2 , a time i određeno klizanje s , pri kome se taj napon u namotu rotora inducira.

Ako je npr. za određeni teret (sa kratkospojnim kliznim kolutima) klizanje 2%, onda i inducirani napon u namotu rotora iznosi 2% napona E_{20} . Taj inducirani napon jednak je padu napona u

rotorskom namotu. Ako se sada uklapanjem regulacionog otpornika otpora R_r u rotorski krug klizanje poveća na 50%, onda se u namotu rotora inducira 50% napona E_{20} . Kako je prema gornjoj pretpostavci struja I_2 ostala nepromijenjena, i omski je pad napona u rotorskom namotu ostao nepromijenjen. Induktivni se otpor može zanemariti jer je $\cos \varphi_2 \approx 1$, pa je relativna vrijednost induktivnog otpora prema omskom otporu vrlo mala. Zato se preostali dio napona mora poništiti uglavnom padom napona na regulacionom otporniku otpora R_r :

$$s E_{20} = I_2 R_r,$$

$$s' E_{20} = I_2 (R_r + R_r).$$

Otpor R_r može se eliminirati iz računa:

$$E_{20} (s' - s) = I_2 R_r,$$

pa slijedi:

$$R_r = \frac{E_{20}}{I_2} (s' - s).$$

E_{20} je napon jedne faze. Za asinhroni motor naveden je uvijek sekundarni napon između kliznih koluta, tj. linijski napon označen malim slovom u , pa tu vrijednost treba dijeliti sa $\sqrt{3}$ da se dobije fazni napon. Struja rotora označena je sa i . Otpor za regulaciju je onda:

$$R_r = \frac{(s' - s) u}{i \sqrt{3}}.$$

Ako se u jednadžbi zanemari relativno mala vrijednost s , dobije se samo nešto veći otpor R_r . To ne smeta jer, radi sigurne mogućnosti reguliranja do tražene vrijednosti klizanja, praktički ionako treba izraditi regulacioni pokrecač s većim ukupnim otporom R_r , kako bi se u pogonu i kad je eventualno nešto manji teret mogla sigurno postići tražena vrijednost klizanja. Može se dakle pisati:

$$R_r \approx \frac{s' u}{i \sqrt{3}}.$$

Struja i ona je struja koja teče u rotoru spojenom u zvijezdu pri određenom teretu i određenom klizanju s' . Treba spomenuti da se dodatni otpornik uvijek izvodi u spoju zvijezde, bez obzira na to kako je spojen rotor.

PRIMJER: Motor koji tjeri centrifugalnu pumpu, pri punoj brzini vrtnje i kraku spojenom rotoru, opterećen je sa 80% svoje nominalne snage. Treba odrediti otpor regulacionog otpornika kojim se može regulirati brzina vrtnje do klizanja $s' = 0,5$. Nazivni napon rotora je $E_{20} = 100$ V i nazivna struja rotora $i_n = 10$ A.

Za $s' = 0,5$, uz kvadratnu ovisnost momenta o brzini vrtnje, iznosit će struja rotora $i = 0,8 \cdot 0,5^2 \cdot 10 = 2$ A.

$$R_r = \frac{s' u}{i \sqrt{3}} = \frac{0,5 \cdot 100}{2\sqrt{3}} = 14,5 \Omega.$$

Da se u ovom računu nije zanemarilo nominalno klizanje s , ispošto bi iznos otpora R_r nešto manji.

Regulacija promjenom frekvencije. Jasno je da se s promjenom frekvencije mora mijenjati i brzina vrtnje asinhronog motora. Za dobivanje struje različnih frekvencija potreban je pretvarač koji se sastoji od motora čija se brzina vrtnje može regulirati i od sinhronog generatora. Danas se može i s pomoću sklopova sa poluvodičkim dijelovima bez rotirajućih strojeva mijenjati frekvencija struje kojom se napaja asinhroni motor.

Ako motor treba da je uz svaku brzinu vrtnje iskorišten, ne smije se mijenjati tok Φ , pa slijedi zaključak da uz promjenu frekvencije treba mijenjati i napon: $f' = a f$; $E' = a E$.

Proporcionalno s promjenom frekvencije mijenja se i induktivni otpor

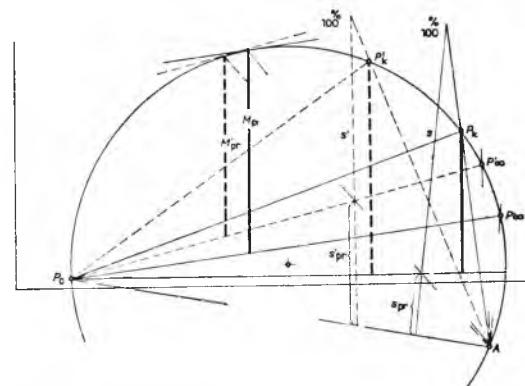
$$X_{1\sigma} + X_{2\sigma} = 2\pi f(L_{1\sigma} + L_{2\sigma}),$$

dok struja

$$I_\infty \approx \frac{E_{20}}{X_{1\sigma} + X_{2\sigma}} = \frac{a E_{20}}{2\pi a f(L_{1\sigma} + L_{2\sigma})}$$

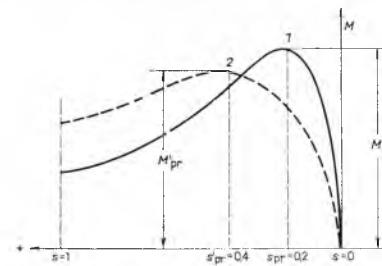
ostaje nepromijenjena, a time i promjer kruga u kružnom dijagramu. Kako omski otpori ostaju nepromijenjeni, oni sa smanjenjem frekvencije, i time sa smanjenjem induktivnih otpora, relativno rastu. Posljedica je toga da se mijenjanjem frekvencije i napona u omjeru $1 : a$ tačke P_∞ i P_k , ako je $a < 1$, pomiču na kružnici u smjeru prema P_0 , kako je to prikazano u sl. 149, a obrnuto, ako je $a > 1$, u protivnom smjeru.

Iz sl. 149 vidi se također da kad je $a < 1$ raste prekretno klizanje: $s_{pr'} > s_{pr}$ i pada prekretni moment: $M_{pr'} < M_{pr}$.



Sl. 149. Pomicanje tačaka P i P_k po obodu kruga kružnog dijagrama kad se pored frekvencije mijenja proporcionalno i napon

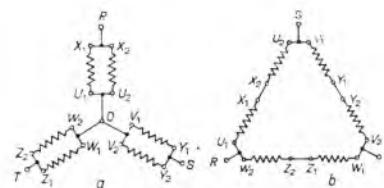
Na sl. 150 prikazana je crtkano nova karakteristika momenta pri napajanju motora strujom niže frekvencije. Kako ne bi prekretni moment pri znatnjem smanjivanju frekvencije i napona previše pao, postupa se tako da se pri frekvencijama koje leže ispod 40% nazivne frekvencije napon snizi u manjoj mjeri nego



Sl. 150. Karakteristika momenta asinhronog motora: 1 pri nazivnoj frekvenciji (veći prekretni moment M_{pr} i manje prekretno klizanje s_{pr}), 2 pri nižoj frekvenciji (manji prekretni moment i veće prekretno klizanje)

frekvencija, tako da, npr., ako se frekvencija snizi na 10%, napon ipak iznosi još 14...16% nazivnog napona.

Regulacija prespajanjem polova. Regulacija brzine vrtnje uvrštavanjem regulacionih otpornika u krug rotora neekonomična je, a regulacija promjenom frekvencije tek rijetko dolazi u obzir. Jedino je ekonomična — a ujedno u izvedbi jeftina — regulacija brzine vrtnje asinhronog motora prespajanjem polova. Dakako, za takvu mogućnost prespajanja mora motor biti posebno građen. Slaba je strana te izvedbe što je regulacija brzine vrtnje moguća samo u vrlo grubim stepenima.

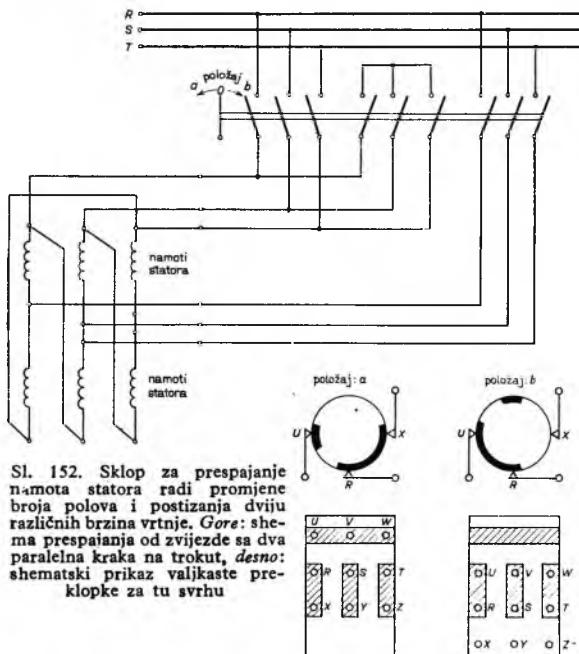


Sl. 151. Spoj zvijezda — trokut za unutarnje prespajanje namota radi promjene brzine vrtnje promjenom broja polova. Položaj a daje namot zvijezde sa dva paralelna namota, položaj b namot u trokutu

Ako se u statorske utore ulože dva namota od kojih je svaki dimenzioniran za drugi broj polova, i ako se upotrijebi kavezni rotor, nakon uklapanja jednog statorskog namota vrtjet će se motor brzinom prema broju polova tog namota, a nakon preklapanja na drugi namot vrtjet će se, dakako, brzinom koja odgovara broju polova drugog statorskog namota.

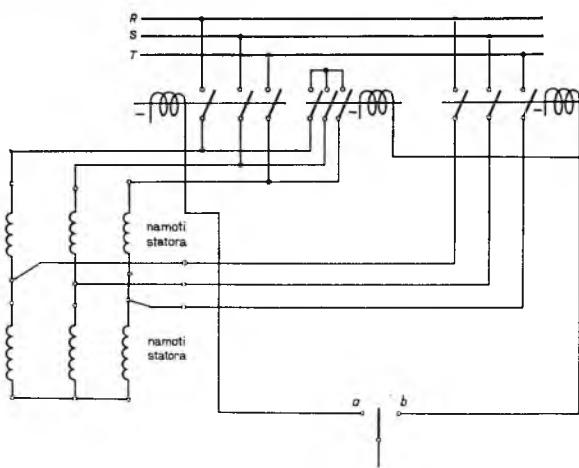
Osim ovog načina prespajanja polova poznat je i drugi, pri kojem stator ima samo jedan namot, a promjena broja polova postiže se unutarnjim prespajanjem samog tog namota u drukčiji redoslijed svitaka. Od ovakvih načina prespajanja najpoznatiji su tzv. *Dahlanderovi spojevi*, koji omogućuju prespajanje broja polova u omjeru 1 : 2.

Pri jednom od tih spojeva preklapa se namot od zvijezde s dvjema paralelnim granama prema sl. 151 a na trokut prema sl. 151 b, a preklop može se izvršiti bilo polužnim sklopkama (sl. 152 a), bilo pogodno spojenim sklopnicima, bilo valjkastom preklopkom prema sl. 152 b. Pri većoj brzini ima motor $\sim 50\%$ veću snagu.



Sličan je drugi spoj, u kojemu trokut odgovara većoj brzini a dvostruka zvijezda manjoj. Snaga je uz obje brzine vrtnje približno jednaka.

Trećim spojem preklapa se namot prema sl. 153 od zvijezde sa dvjema paralelnim granama (polozaj b) na običnu zvijezdu (polozaj a). Time se postiže znatno veća snaga pri većoj brzini, te se zato ovaj Dahlanderov spoj upotrebljava za pogon ventilatora i centrifugalnih pumpi.



Sl. 153. Shema preklapanja polova radi postizanja dviju različnih brzina vrtnje. Spoj u zvijezdi s paralelno spojenim namotima (polozaj a) odgovara većoj brzini vrtnje, a spoj zvijezde sa serijski spojenim namotima (polozaj b) manjoj brzini vrtnje

Ti spojevi mogu se, dakako, upotrijebiti ne samo za kombinaciju dvopolne i četveropolne izvedbe, već i za motore bilo s

kojim brojem pari polova, ali samo ako brojevi pari polova stoje u omjeru 1 : 2.

Postoje i kombinacije spojeva za tri različita broja pari polova. To se dakako ne može više postići sa simetričnim namotom svih polova. Zato se dobiva nesimetrično polje, tj. polje koje osim direktnе komponente ima također inverznu komponentu i znatan utjecaj viših harmonika.

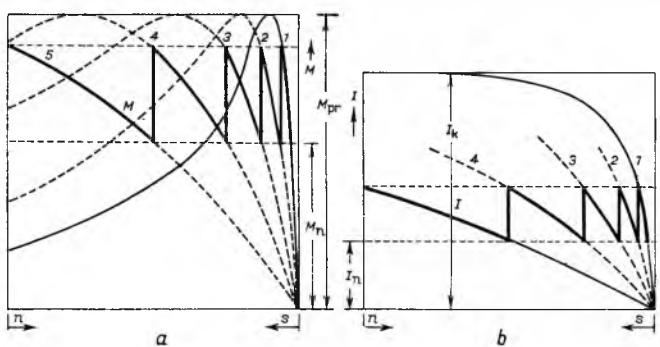
Pretpostavljeno je da svi ovi motori imaju kavezni rotor. Nacelno je moguća i izvedba s kolutnim rotatom, no tada treba prespajati i rotorski namot, pa za Dahlanderov spoj u rotoru treba šest kliznih koluta, kako bi se svih šest krajeva moglo izvesti napolje do preklopke.

Sa dva namota u statoru motora, od kojih je svaki izrađen u Dahlanderovu spoju, dobiva se mogućnost prespajanja za četiri brzine vrtnje. Npr. jedan namot za 4- i 8-polni spoj, a drugi namot za 6- i 12-polni spoj, što daje npr. ove sinhronne brzine vrtnje: 1500, 1000, 750 i 500 o/min.

Pokretanje asinhronih motora

Kad se obični kavezni ili kratkospojeni kolutni asinhroni motor priključi izravno na električnu mrežu, on će prilikom pokretanja povući iz mreže znatnu struju (v. sl. 145, radna tačka P_k) jer njegov rotor u tom trenutku stoji, pa motor djeluje kao transformator s kratkospojenim sekundarom. Da se to sprijeći, poduzimaju se pri pokretanju asinhronih motora (naročito motora veće snage) različne mјere. Tako se npr. pokretanje kolutnih motora može vršiti pomoću regulacionog otpornika uvrštenog u krug rotora, a pokretanje kaveznih motora priključenjem na napon koji je za vrijeme pokretanja manji od nazivnog mrežnog napona. Osim toga grade se danas i kavezni motori specijalne konstrukcije, koji pri pokretanju povlače manju struju.

Pokretanje asinhronih motora s pomoću regulacionog otpornika. S pomoću pokretača uključuje se pri pokretanju kolutnih motora u krug rotora regulacioni otpornik, a zatim se postepeno, kako se brzina vrtnje povećava, omski otpor otpornika smanjuje. Većinom se otpor regulacionog otpornika mijenja u stepenima, a samo vrlo rijetko kontinuirano. Tako se dobiva dovoljan moment tokom pokretanja uz što manju struju pokretanja.



Sl. 154. Prikaz momenata i struja pri pokretanju kolutnog asinhronog motora pomoću regulacionog otpornika (pokretača). a) Porodica momentnih krivulja pri različnim veličinama otpora ($I_1 \dots I_5$), b) porodica krivulja struja pri različnim veličinama dodatnog otpora; M_n nazivni moment, M_{pr} prekretni moment, I_k struja kratkog spoja (pri mirujućem rotoru), I_n nazivna struja

Na sl. 154 a i b prikazane su porodice krivulja momenta $M = f(n)$ i struje $I = f(n)$ koje odgovaraju različnim omskim otporima u pojedinim stepenima pokretača, a debelo su izvučene linije po kojima se tokom pokretanja mijenjaju moment i struja. Ta slika pokazuje da se motor može pokrenuti uz relativno malu struju pokretanja u odnosu prema struci kratkog spoja I_k . To je važno u relativno slabim mrežama koje bi inače teško podnosiše udarac struje kratkog spoja I_k zbog pada napona u mreži koji se time javljuje.

Pokretanje primjenom smanjenog napona upotrebljava se za asinhronne kavezne motore. Mrežni napon može se smanjiti na više načina.

Preklapanje trokut-zvijezda može se primijeniti samo za motore male snage koji pri pokretanju nisu jako opterećeni. Namoti statora priključeni su prilikom pokretanja na mrežu u spoju zvijezde;

nakon pokretanja, tj. u radnom položaju, oni su spojeni u trokut. Takvim prespajanjem postiže se da je struja pri pokretanju tri puta manja nego kad bi se motor u spoju trokuta priključio odmah na mrežu. Budući da je pri tom načinu pokretanja moment pokretanja (potezni moment) također tri puta manji, on se može upotrijebiti samo za motore kod kojih je potezni moment (moment pokretanja) zbog opterećenja pri pokretanju znatno manji od nominalnog.

Smanjenje napona s pomoću prigušnica koje se uvrste prilikom pokretanja u svaku fazu također omogućuje smanjenje struje pokretanja. I ovaj se način može primijeniti samo tamo gdje nije potreban veliki potezni moment pri pokretanju.

Pokretanje s pomoću autotransformatora radi na istom principu, ali motor razvija pod istim uvjetima veći potezni moment.

Kavezni rotori specijalne konstrukcije. Pri upotrebi kaveznih motora ne može se izbjegti neugodnom utjecaju struje kratkog spoja na mrežu. Uz to treba u većih motora očekivati da potezni moment M_p padne ispod nominalnog M_n i postane premašen da bi s vladao moment tereta M_t . Po zakonima sličnosti, naime, relativna vrijednost omskog otpora pada kad rastu dimenzije stroja. Što je veća snaga motora pri istoj brzini vrtnje to je relativno manji njegov potezni moment u odnosu prema nominalnom. Zato već

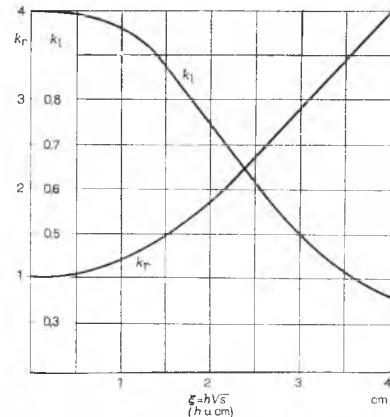
za motore s nekoliko kilovata snage tzv. klasična izvedba kavez s okruglim bakrenim štapovima ne dolazi u obzir.

Od kaveznog asinhronog motora traži se da ima dobar potezni moment M_p , propisani prekretni moment M_{pr} i da minimalni moment, tzv. moment sedla M_s , ne sprečava motor da dostigne punu brzinu vrtnje (sl. 155). To se pri projektiranju kaveznih asinhronih motora postiže primjenom pojave potiskivanja struje.

Kavezni rotor s dubokim utorima. Ako se u dubokom utoru pravokutna oblika nalazi vodič (štapa) istog oblika, kroz koji protjeće struja, rasipno polje koje se oko njega stvara ima oblik prikazan na sl. 156. Iz slike se vidi da je štap u donjem dijelu utora obuhvaćen skoro cijelim rasipnim poljem, a prema vrhu utora sve manjim njegovim dijelom. Iz toga slijedi da je u donjem dijelu štapa po jedinici presjeka bakra induktivni otpor najveći, a da prema gornjem dijelu štapa taj otpor opada. Kako većem otporu odgovara manja struja i obrnuto, nastaje jednostrano potiskivanje struje prema gornjem dijelu štapa, tj. gušća struje u gornjem dijelu štapa raste a u donjem opada u usporedib si srednjom vrijednosti. To dakako vrijedi samo za izmjeničnu struju. Što je viša frekvencija to je potiskivanje struje jače. Kad istosmjerna struja protjeće kroz štap, ne-ma induktivnog otpora jer nema promjene rasipnog polja s vremenom, stoga nema ni potiskivanja, pa se struja podjednako podjeli po cijelom presjeku štapa. Potiskivanje struje uzrokuje veće gubitke Jouleovom toplinom u štalu, pa se to uzima u obzir ekvivalentnim povećanjem omskog otpora R_\sim prema otporu R_\perp koji se suprotstavlja istosmjernoj struci: $R_\sim = k_r R_\perp$, gdje je k_r koeficijent povećanja omskog otpora. Potiskivanjem struje mijenja se i induktivitet cijelog štapa zbog promijenjenog oblika rasipnog polja, pa se i to, analogno kao pri omskom otporu, uzima u obzir izrazom $L_\sim = k_1 L$, gdje je k_1 koeficijent povećanja induktivnog otpora. Što je visina štapa h veća i što je frekvencija struje u rotoru viša, odnosno klizanje s veće, to je veće potiskivanje struje, pa je prema Fieldu:

$$k_r = f_1(\xi); \quad k_1 = f_2(\xi); \quad \xi = h\sqrt{s}.$$

Ovisnost faktora k_r i k_1 od ξ za frekvenciju 50 Hz dana je dijagramom u sl. 157.

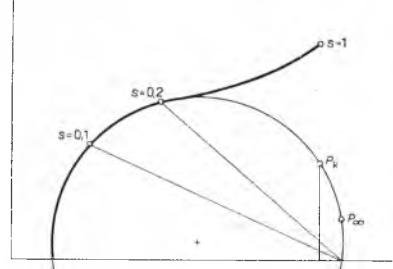


Sl. 157. Fieldov dijagram za određivanje faktora k_r i k_1 pomoću veličine ξ . h je visina štapa, s klizanje

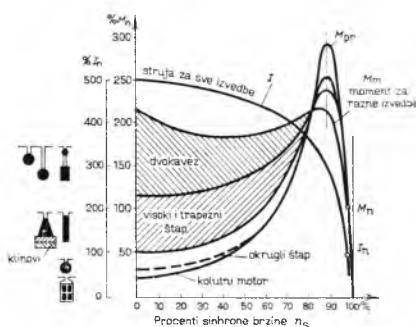
Posljedica je potiskivanja struje, prema tome, da kružni dijagram vrijedi približno u motorskom području od $s = 0$ do $s = 0,2$ a da se, kad su klizanja veća, krivulja diže u smislu povećanja promjera i povlašenja tačke P_k , kako je to prikazano u sl. 158 debelo izvučenom crtom.

Rotori s dvostrukim kavezom, vanjskim i unutarnjim, sa dva reda, a iznimno i više redova utora, služe istoj svrsi kao i rotor s dubokim utorima. Štapovi u vanjskim utorima imaju male induktivne, a relativno velik omski otpor jer su malog promjera; za štapove koji su u unutarnjim utorima vrijedi obrnuto. Pri pokretanju djeluje pretežno vanjski kavez s velikim poteznim momentom, zbog toga što veći dio struje teče u njemu. U pogonu, međutim, kad je frekvencija rotorske struje mala, nestaje utjecaj induktivnog otpora, pa vanjski i unutarnji kavez rade paralelno s relativno malim zajedničkim omskim otporom, tj. s malim klizanjem i malim gubicima. Štapovi su vanjskog kavezeta često načinjeni od mjedi ili bronze kako bi za isti omski otpor imali veći promjer i veću masu nego da su izrađeni od bakra, a time i mogućnost većeg akumuliranja topline koja se razvija u tim vanjskim štapovima pri pokretanju. S dvostrukim kavezom mogu se postići još veći potezni momenti nego s dubokim utorima.

Na sl. 159 prikazane su karakteristike momenta velikih asinhronih motora za različne izvedbe rotora pri istoj poteznoj struci.



Sl. 158. Promjena kružnog dijagrama kaveznih asinhronih motora pri klizanjima većim od 0,2 zbog potiskivanja struje

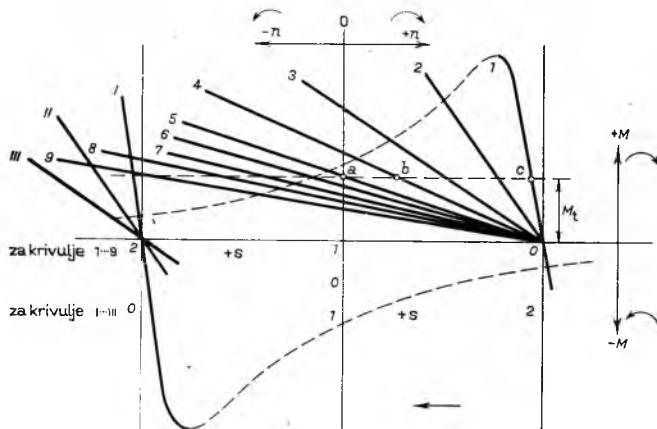


Sl. 159. Karakteristika struje i karakteristike okretnih momenata velikih asinhronih strojeva različnih izvedbi u ovisnosti o procentu sinhronne brzine

Kočenje asinhronim motorima

Cesto u elektromotornim pogonima, a najviše u pogonu dizalica, traži se od asinhronog motora ne samo da pogoni odredene mehanizme nego i da ih koči. Na str. 189 prikazana je mogućnost kočenja u dva područja: generatorskom području rada s negativnim klizanjem ($s < 0$) (to je tzv. korisno ili rekuperativno kočenje u nadsinhronizmu, ili generatorsko kočenje) i u području rada s klizanjem većim od jedan ($s > 1$) (to je tzv. protustrujno kočenje). Kako su električni gubici u rotorskom krugu uvijek proporcionalni klizanju, može se odmah zaključiti da je kočenje u generatorskom području ekonomičnije od protustrujnog, jer se pri generatorskom kočenju postiže kočenje približno s nazivnim momentom već pri nekoliko postotaka klizanja, dok pri protustrujnom kočenju pripadno klizanje iznosi preko 100...200%.

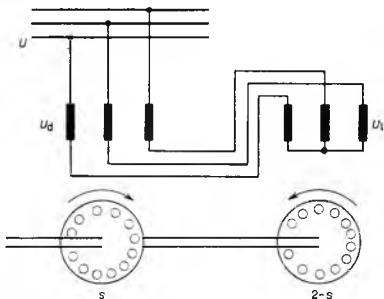
Na sl. 160 prikazana je debelo izvučenom linijom (I i I') karakteristika momenta kratko spojenog kolutnog motora, i to za oba smjera vrtnje. Obje su linije u nestabilnom dijelu karakteristike izvučene crtkano. Kako je taj nestabilni dio za pogon neinteresantan, u daljim je razmatranjima izostavljen, te je ucrtana samo stabilna grana, i to u njezinom praktički linearном dijelu.



Sl. 160. Karakteristika momenta kratkospojenog kolutnog motora za jedan smjer vrtnje pri uvrštanju otpornika različnih otpora (1-9), a I-III za drugi smjer vrtnje

Kad se u rotorski krug uključuju sve veći otpori, stabilni dio karakteristike sve se više naginje naniže, kako je to prikazano na slici karakteristikama 2 do 9.

Kad se priključi dviju faza na statoru jedan drugim zamijene, dobiva se protivni smjer okretanja rotacionog polja, tj. moment vrtnje prikazan za kratko spojeni rotor na sl. 161 linijom I . U



Sl. 161. Jednofazni asinhroni motor može se zamijeniti dvjema jednakim trofaznim motorima spojenim u seriju i montiranim na istu osovinu, ali sa suprotnim smjerovima vrtnje

nadsinhronizmu dobiva se prema toj karakteristici moment s prvočnim smjerom vrtnje, ali u generatorskom području rada. Kad se uključuje omski otpor, naginju se i te karakteristike prema dolje, kako pokazuje usporedba pravca I s pravcima II i III .

Jednofazni asinhroni motor

Mali potrošači priključuju se iz ekonomskih razloga samo na jednu fazu mreže jer je jednofazni priključak jeftiniji od trofaznog. U takvom slučaju potreban je jednofazni asinhroni motor. Obično se takvi motori grade samo za snage do 0,5 kW. Velika primjena kućanskih aparata uvjetovala je snažan razvoj proizvodnje tih motora. Danas u svijetu proizvodnja jednofaznih asinhronih motora snage ispod 0,5 kW daleko nadmašuje proizvodnju trofaznih motora.

Jednofazni namot statora postavlja se obično samo u 2/3 ukupnog broja utora. Namot priključen na napon daje jednofazno stalno pulsirajuće polje kojemu je amplituda indukcije B_m . Svako pulsirajuće polje može se nadomjestiti dvjema okretnim poljima suprotnog smjera vrtnje i polovičnih amplituda prema jednadžbi:

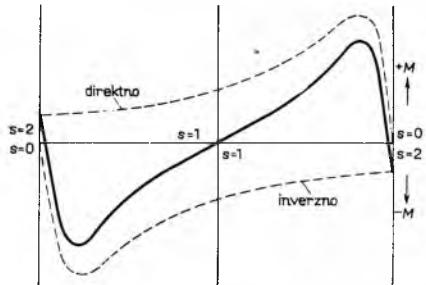
$$B_m \cos \omega t = \frac{1}{2} B_m e^{j\omega t} + \frac{1}{2} B_m e^{-j\omega t}.$$

Stalno pulsirajuće polje amplitude B_m jednako je sumi inverznega okretnog polja amplitute $B_m/2$ i direktnog polja amplitute $B_m/2$. Direktno okretno polje je ono koje se okreće u smjeru vrtnje rotora, a inverzno je okretno polje suprotnog smjera.

Jednofazni asinhroni motor može se prema tome ekvivalentno zamijeniti dvjema jednakim trofazno namotanim motorima na istoj osovini, koji su serijski priključeni na trofaznu mrežu sa suprotnim smjerovima vrtnje (u jednom su motoru dvije faze međusobno zamijenjene, sl. 161.) Raspodjela napona na jedan i drugi namot, a time i veličina direktnog ili inverznega okretnog polja, ovisi o nadomjesnom otporu rotora svakog od motorâ, dakle o klizanju koje je za jedan motor s , a za drugi $2 - s$. Kad je $s = 1$, oba su okretna polja jednaka. I direktno i inverzno okretno polje stvaraju s rotorskim strujama okretne momente, svako u svom smjeru.

Iz tog se vidi da jednofazni motor nema poteznog momenta jer se djelovanja obaju ekvivalentnih motora poništavaju, a ne može ga ni imati jer jednofaznim priključkom nije određen smjer vrtnje. Zato jednofazni motor može krenuti samo vanjskom pomoći ili uz primjenu dodatnih uređaja.

Na sl. 162 prikazani su momenti direktnog i inverznega polja crtkanim linijama, a rezultirajući je moment izvučen punom linijom



Sl. 162. Karakteristika momenta jednofaznog asinhronog motora. Momenti direktnog i inverznega polja (crtežne linije) i rezultirajući moment (puna linija)

njom. Ta karakteristika momenta po svom je karakteru slična karakteristici trofaznog motora.

Kratkospojni rotor jednofaznog asinhronog motora u principu je jednak rotoru trofaznog motora.

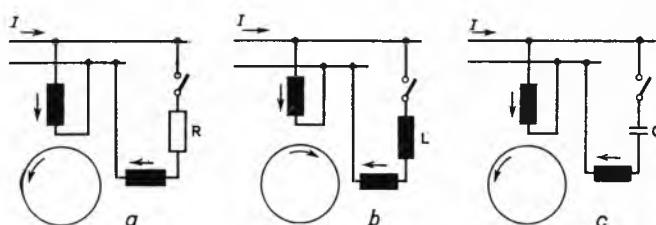
Jednofazni asinhroni motor ima namote samo u 2/3 utora, a faktor namota je mnogo lošiji nego u trofaznih motora. Zato mu je snaga samo ~ 50...60% snage trofaznog motora, uz iste dimenzije željeznog paketa.

Cesto se traže relativno veliki potezni i maksimalni momenti radi sigurnosti pokretanja i rada i pri smanjenom naponu u mreži. To može imati kao posljedicu da se nominalni podaci takva motora određuju s obzirom na momente, a ne s obzirom na zagrijavanje namota.

Pokretanje jednofaznog asinhronog motora. Jednofazni asinhroni motor može se pokretati ručno. Npr. u slučaju remenskog prenosa povuće se remen u željenom smjeru vrtnje. Okretanjem se povećava moment motora (sl. 162), a kad on prevlada

moment tereta, motor dalje povuče sam do pune brzine vrtnje. Taj se način pokretanja rijetko upotrebljava jer je nespretnat; obično se motor pokreće tzv. *pomoćnom fazom*. Glavni (tzv. radni) namot zauzima dvije trećine utora statora. Preostala trećina utora namota se pomoćnom fazom tako da je ona prostorno pomaknuta prema radnoj fazi za električni kut od 90° . Za simetrično okretno polje poznat je uvjet da je prostorni električni kut pomaka faza jednak vremenom kom kutnom pomaku faza. Taj se uvjet pri napajanju iz jednofazne mreže može samo izuzetno zadovoljiti. Međutim, i ako taj uvjet nije tačno ispunjen, tj. ako je vremenski kutni pomak manji od 90° , ipak se dobiva okretno polje, ne simetrično nego eliptično, i ono daje neki potezni moment.

Vremenski pomak pomoćne faze može se postići uključivanjem dodatnog otpora između mreže i pomoćne faze. Može se uključiti omski, induktivni ili kapacitivni otpor, kako je to prikazano na sl. 163 a, b i c. Pomoćna je faza redovito dimenzionirana samo za pokretar, pa se zato isklapa čim motor postigne $\sim 2/3$ pune brzine vrtr e jer bi inače izgorjela.



Sl. 163. Jednofazni asinhroni motor s pomoćnom fazom za pokretanje. a) Sprega s otpornikom, b) sprega s prigušnicom, c) sprega s kondenzatorom

Danas se za pokretanje upotrebljavaju samo omski ili kapacitivni otpori. Omski otpor predstavlja vrlo jeftino rješenje, ali daje relativno mali vremenski pomak faze i zato relativno slab potezni moment, iako se može postići potezni moment jednak nominalnom. Zapravo nije potreban nikakav dodatni omski otpor, već se pri namatanju pomoćne faze jednostavno uzme tanja bakra ţica ili ţica od mjedi. Posljednje rješenje je povoljnije s obzirom na zagrijavanje pomoćne faze, jer mijedena ţica ima uz isti otpor veći toplinski kapacitet, pa se tokom pokretanja toplina akumulira uz manje zagrijavanje.

Za određeno pogonsko stanje, tj. za određeni moment tereta, uklapanjem kondenzatora u pomoćnu fazu može se postići i tačan vremenski pomak faze za 90° . Tako se dobije veoma dobar potezni moment; on može biti i do 3½ puta veći od nominalnog.

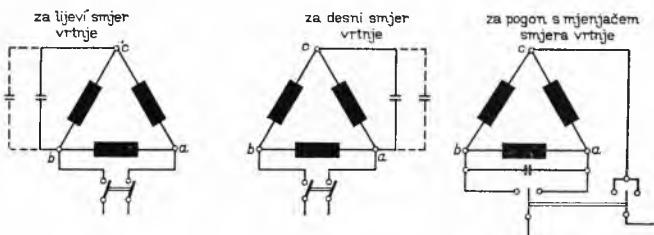
Ako se kondenzator dimenzionira tako da je pri određenom konstantnom momentu tereta i punoj brzini vrtnje fazni pomak jednak 90° , a struja ispod vrijednosti koju može pomoćni namot termički trajno podnosi, pomoćna faza može ostati uklapljeni i u pogonu. Međutim, ako se motor rasterećuje, poremećeno je ovakvo stanje, pa se može dogoditi da se struja u pomoćnoj fazi poveća i da ova u trajnom pogonu izgori.

Ovakvi motori s kondenzatorom za određeni teret zovu se *kondenzatorski motori*. Oni se mogu upotrebljavati samo kad se teret ne može mnogo mijenjati, kao u pogonu ventilatora. Kako pomoćna faza ostaje stalno uklapljeni, dobiva se simetrično okretno polje i time teoretski ista snaga kao od trofaznih motora, dakkako uz jednak dimenziju. Kako ipak treba dopustiti neke tolerancije u pogledu promjene tereta, potrebno je pomoćni namot dimenzionirati tako da podnosi trajno manje promjene tereta, pa se radi toga smanjuje snaga kondenzatorskog motora na 80–85% snage trofaznih motora.

Potezni moment ovakvih kondenzatorskih motora, kojima je kondenzator dimenzioniran za nominalni teret a ne za pokretanje, relativno je malen, a iznosi $\sim 25 \dots 60\%$ nominalnog momenta. Ako je potreban veći potezni moment, može se pri pokretanju paralelno s pogonskim kondenzatorom uklupiti još jedan dodatni kondenzator za pokretanje. Taj je $\sim 2\dfrac{1}{2}$ puta veći

od pogonskog i može ostati uklapljen samo tokom pokretanja, kako se to vidi na sl. 164.

Pri upotrebi kondenzatora može se i normalni trofazni motor bez promjene namota upotrijebiti kao jednofazni motor ako se spoji na mrežu prema jednoj od shema na sl. 165. Trofazni se



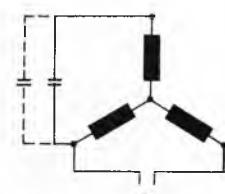
Sl. 165. Priključak normalnog trofaznog motora u spoju trokuta na jednofaznu mrežu uz primjenu dodatnih kondenzatora

motor može upotrijebiti sa stalno uklapljenim pogonskim kondenzatorom (puno izvučeno) ili s kondenzatorom za pokretanje (crtkano izvučeno) ili s oba kondenzatora zajedno.

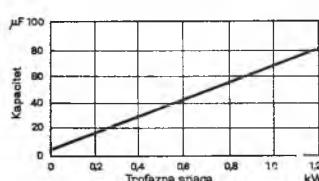
Umjesto spoja u trokut može se upotrijebiti i spoj zvijezda prema sl. 166.

Iz dijagrama na sl. 167 vidi se koliko mora biti kapacitet pogonskog kondenzatora u ovisnosti o trofaznoj snazi motora za kondenzatorski motor od 220 V, 50 Hz. Ovim se kondenzatorskim motorima postižu snage od 70–80% snage trofaznih motora i potezni momenti od 30–35% nominalnog momenta.

Za uklapanje i isklapanje pomoćne faze upotrebljava se obično posebna sklopka koja isklapa automatski, jer kad bi se zaboravila isklupiti pomoćna faza, ona bi pregorjela. Razlikuju se,



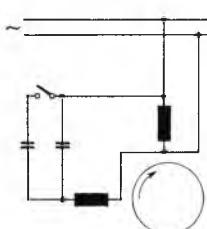
Sl. 166. Priključak normalnog trofaznog motora u spoju zvijezde na jednofaznu mrežu uz primjenu dodatnih kondenzatora za pogon i pokretanje (crtkano)



Sl. 167. Kapacitet pogonskog kondenzatora za kondenzatorski motor 220 V i 50 Hz u ovisnosti o trofaznoj snazi motora

uglavnom, dvije izvedbe sklopki: termičke sklopke, koje pomoću bimetalne isklapaju pomoćnu fazu, i centrifugalne sklopke, koje se nalaze na osovini rotora i koje pri određenoj brzini vrtnje centrifugalnom silom isklapaju pomoćnu fazu.

A. Dolenc



Sl. 164. Shema jednofaznog asinhronog kondenzatorskog motora s pomoćnom fazom za pogon i dodatnim kondenzatorom za pokretanje

Rotor sinhronog stroja vrti se u ustaljenom pogonu jednakom (sinhronom) brzinom kao i okretno magnetsko polje u zračnom rasporu, pa odatle i potječe njegov naziv. Ova se vrsta električnog stroja upotrebljava i kao generator i kao motor, no najšire se primjenjuje kao generator izmjenične struje od najmanjih do najvećih snaga. U pogonu su sinhroni generatori snagâ većih od 500 MVA u jednoj jedinici, a razvijaju se generatori veći čak i od 1000 MVA. Snaga nijedne druge vrste električnih strojeva ne dosiže takve iznose, pa je sinhroni stroj predstavnik strojeva najvećih snaga.

Vrste sinhronih strojeva. Prema različnim obilježjima sinhroni se strojevi mogu svrstati na više načina. Prema vrsti upotrijebljenog pogonskog stroja oni se zovu: turbogeneratori, hidrogeneratori, dizelski generatori, kompenzatori i motori; prema konstrukciji rotora oni se izvode kao strojevi s okruglim rotorom i strojevi s istaknutim polovima, a prema brzini vrtnje (uz frekvenciju 50 Hz) oni se dijele na brzohodne strojeve (750–3000 o/min, 8–2 pola), strojeve srednje brzine (300–600 o/min, 20–10 polova) i sporohodne strojeve (manje od 300 o/min, više od 20 polova).

Turbogeneratori pokreću se parnim ili plinskim turbinama. Redovito se grade sa dva pola i s okruglim rotorom, za široki raspon

snaga do najvećih iznosa. Samo za manje snage (samostalne elektrane u industriji, na brodovima i sl.) grade se turbogeneratori sa četiri istaknutna pola.

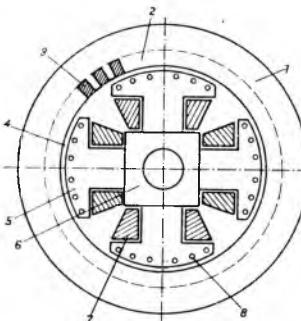
Hidrogeneratori pokreću se vodnim turbinama. Grade se s istaknutim polovima, od sasvim sporohodnih do brzohodnih, u širokom rasponu snaga do preko 500 MVA.

Dizelski generatori pokreću se dizelskim motorima, a grade se za široki raspon brzinu vrtnje, od četiri pola naviše. Snaga dizelskih generatora ograničena je mogućnostima izrade motora, pa dosiže najviše do desetak megavoltampera.

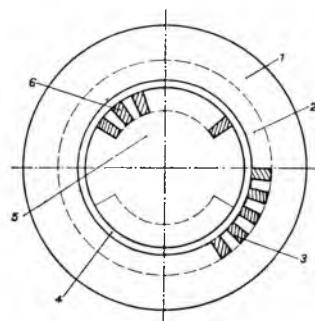
Kompenzatori su posebna vrsta sinhronih strojeva koji rade bez pogonskog stroja. Oni ne služe za elektromehaničku pretvorbu energije nego samo opskrbljuju energetski sistem jalovom energijom. Grade se u velikim jedinicama (10...200 MVA), sa šest ili osam istaknutih polova (1000 ili 750 o/min uz 50 Hz).

Sinhroni motori primjenjuju se za pogone s konstantnom brzinom vrtnje (zagor kompresor, ventilator). Grade se za snage do desetak megavata, u širokom rasponu brzina vrtnje, sa četiri pola i više.

Na sl. 168 i 169 prikazan je osnovni sastav sinhronog stroja s istaknutim polovima i stroja s okruglim rotorom.



Sl. 168. Sinhroni stroj s istaknutim polovima. 1 jaram statora, 2 zona zubova, 3 armaturni namot, 4 zračni raspored, 5 pol, 6 jaram rotora, 7 uzbudni namot, 8 prigušni namot

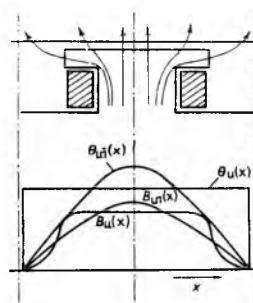


Sl. 169. Sinhroni stroj s okruglim rotorom. 1 jaram statora, 2 zona zubova i utora, 3 armaturni namot, 4 zračni raspored, 5 jaram rotora, 6 uzbudni namot

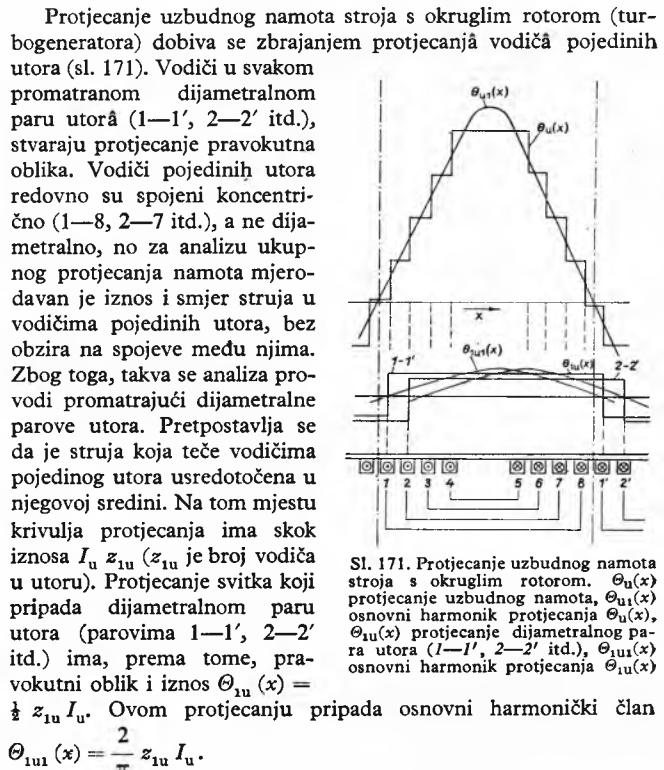
Protjecanje namota sinhronih električnih strojeva. Magnetsko polje u sinhronom stroju nastaje zbog djelovanja protjecanja svih njegovih namota. U njemu postoje dva osnovna namota: uzbudni namot i armaturni namot. Uzbudni namot redovno je smješten na rotoru, a armaturni namot na statoru. Armaturni namot uvijek je porazdijeljen u utorima; uzbudni je namot u strojevima s istaknutim polovima koncentriran, a u strojevima s okruglim rotorom porazdijeljen. Ponekad se u malim sinhronim strojevima, do oko 100 kVA, armaturni namot ugrađuje u rotor, a uzbudni namot u stator. Ovakvu izvedbu nalažu konstruktivni razlozi, a fizikalno djelovanje stroja ostaje nepromijenjeno. Osim tih osnovnih namota u rotor se često ugrađuje i pričušni namot; on ne utječe na osnovnu fizikalnu sliku stroja, već ima posebne zadatke u nekim pogonskim stanjima.

Protjecanje uzbudnog namota. Protjecanje uzbudnog namota stroja s istaknutim polovima ima pravokutni oblik, prema sl. 170. Protjecanje po jednom polu iznosi $\Theta_u = N_u I_u$, gdje N_u znači broj zavoja na jednom polu a I_u struju uzbude.

Pomoću harmoničke analize određuje se osnovni harmonički član protjecanja; amplituda mu je $\Theta_{ui} = \frac{4}{\pi} N_u I_u$. Protjecanje i duljina silnice u zračnom rasporu, uz zasićenje željeza, određuje magnetsku indukciju na pojedinim mjestima povrta statora.



Sl. 170. Protjecanje uzbudnog namota i indukcija u zračnom rasporu stroja s istaknutim polovima. $\Theta_u(x)$ Protjecanje uzbudnog namota, $\Theta_{ui}(x)$ osnovni harmonik protjecanja $\Theta_u(x)$, $B_u(x)$ indukcija u zračnom rasporu uslijed protjecanja $\Theta_u(x)$, $B_{ui}(x)$ osnovni harmonik indukcije $B_u(x)$



Sl. 171. Protjecanje uzbudnog namota stroja s okruglim rotorom. $\Theta_u(x)$ protjecanje uzbudnog namota, $\Theta_{ui}(x)$ osnovni harmonik protjecanja $\Theta_u(x)$, $\Theta_{uh}(x)$ protjecanje dijametalnog parova utora ($1-1'$, $2-2'$ itd.), $\Theta_{ui}(x)$ osnovni harmonik protjecanja $\Theta_{ui}(x)$

Ukupno protjecanje raspodijeljenog uzbudnog namota određuje se zbrajanjem protjecanja pojedinih promatranih dijametalnih parova utora. Na taj se način dobije stepeničasta krivulja protjecanja $\Theta_u(x)$, prikazana na sl. 171. Osnovni harmonički član takvog protjecanja dobiva se kao geometrijski zbroj osnovnih harmoničkih članova protjecanja pojedinih dijametalnih parova utora. Ovo se zbrajanje može provesti najprije algebarski, pa zatim rezultat pomnožiti s faktorom namota. (Pokazano je na str. 161 da je faktor namota omjer između geometrijskog i aritmetičkog zbroja sinusnih napona pojedinih vodiča namota.) Taj se isti faktor može primijeniti pri zbrajanju sinusnih protjecanja pojedinih parova utora. Prvi harmonički član protjecanja porazdijeljenog uzbudnog namota po jednom polu bit će, prema tome,

$$\Theta_{ui} = \frac{2}{\pi} \frac{N_u f_{ui}}{p} I_u,$$

gdje N_u znači broj zavoja uzbudnog namota, p broj pari polova i f_{ui} faktor namota uzbudnog namota za prvi harmonički član.

To je protjecanje stvoreno istosmjernom strujom, njegov raspored u odnosu na rotor miruje, pa se naziva stoećim. Mehaničkom vrtnjom ono se u odnosu na stator pretvara u okretna protjecanje. Uzbudni namot stroja s okruglim rotorom zauzima tek 2/3 oboda rotora. U odnosu prema kutu od 180 električnih stupnjeva koji pripada jednom polnom koraku, ovaj namot zauzima zonu od 120 stupnjeva.

Protjecanje armaturnog namota. Za razliku od uzbudnog namota ovim namotom teče izmjenična struja. Jednofazni namoti također se grade sa zonom od 120 stupnjeva. Njihovo je protjecanje jednakoo kao u porazdijeljenom uzbudnom namotu, ali ga uzbuduje izmjenična struja. Ovo protjecanje ima, stoga, nepomičnu magnitudu osi, a zbog izmjenične struje koja ga uzbuduje, njegov se iznos neprestano mijenja. Najveća moguća amplituda, u skladu s izrazom za porazdijeljeni uzbudni namot, iznosi, izražena pomoću efektivne vrijednosti struje armature:

$$\Theta = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{N_a f_{ai}}{p} I_a$$

gdje N_a znači broj zavoja armaturnog namota, p broj pari polova i f_{ai} faktor namota armaturnog namota za prvi harmonički član.

Takvo pulsirajuće protjecanje može se rastaviti na dva okretna protjecanja (v. str. 194) koja se vrte u suprotnim smjerovima.

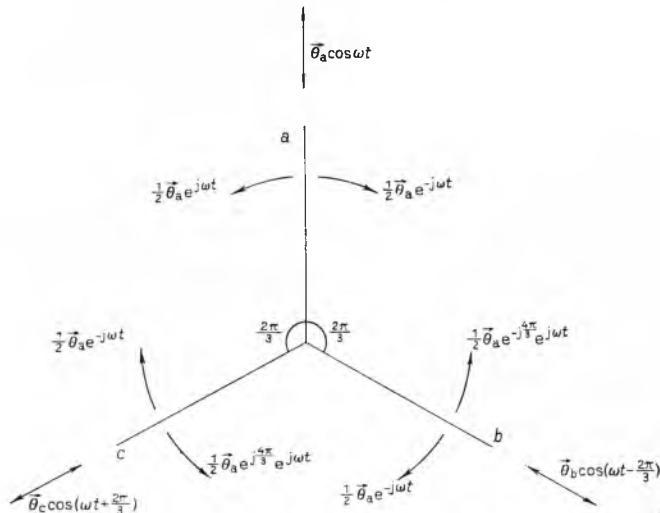
Postavi li se u smjer magnetske osi promatranog jednofaznog namota vektor $\vec{\Theta}(t)$, njegov se iznos mijenja u ovisnosti o izmjeničnoj struji prema jednadžbi

$$\vec{\Theta}(t) = \vec{\Theta} \cos \omega t.$$

Taj vektor, koji izražava pulzirajuće protjecanje, može se rastaviti na dvije komponente

$$\vec{\Theta} \cos \omega t = \frac{1}{2} \vec{\Theta} e^{j\omega t} + \frac{1}{2} \vec{\Theta} e^{-j\omega t}.$$

Amplituda svakog dionog okretnog protjecanja jednaka je polovici amplitude stvarnog pulzirajućeg protjecanja.



Sl. 172. Protjecanje trofaznog namota

Trofazni namot redovno se gradi sa zonom od 60 stupnjeva. Magnetske su osi namota pojedinih faza pomaknute jedna prema drugoj prostorno za električni kut od 120 stupnjeva, a u stacionarnom stanju njima teku struje koje su vremenski pomaknute za fazni kut također od 120 stupnjeva. Ukupno protjecanje dobiva se zbrajanjem protjecanjem triju faza, dakle šest dionih okretnih protjecanja (sl. 172), što daje:

$$\vec{\Theta}(t) = \frac{3}{2} \vec{\Theta}_a e^{-\omega t} + \frac{1}{2} \vec{\Theta}_a \left(1 + e^{j\frac{4\pi}{3}} + e^{-j\frac{4\pi}{3}} \right) e^{j\omega t} = \frac{3}{2} \vec{\Theta}_a e^{-j\omega t}.$$

Prema tome, trofazni namot kroz koji protječe trofazna struja stvara okretno protjecanje s amplitudom $1\frac{1}{2}$ puta većom od amplitude pulzirajućeg protjecanja pojedinih faza.

Magnetsko polje u zračnom rasporu sinhronog stroja nastaje zajedničkim djelovanjem protjecanja uzbudne i armature. U stacionarnom stanju ta su dva protjecanja jedno u odnosu prema drugom nepomični i rotiraju sinhronom brzinom vrtnje. Prvenstveno je značajan osnovni harmonički član magnetske indukcije jer o njemu ovisi osnovni harmonički član inducirani napona. Viši harmonički članovi induciranih napona u načelu su nepoželjni, pa ih treba svesti na najmanju moguću mjeru, što se postiže prikladnim projektiranjem namota i pogodnim oblikovanjem polnog stopala.

U stroju s okruglim rotorom krivulje protjecanja uzbudnog i armaturnog namota stepeničasta su oblika. Njihovi su osnovni harmonički članovi u stacionarnom stanju u prostoru jedan u odnosu prema drugom nepomični i razmaknuti za kut koji ovisi o opterećenju stroja. Osnovni harmonički član rezultirajućeg protjecanja dobiva se geometrijskim zbrajanjem osnovnih harmoničkih članova protjecanja pojedinih namota. Struja armature reducirana na uzbudnu stranu I' definira se kao ona struja kroz uzbudni namot koja će dati jednaku amplitudu osnovnog harmonika protjecanja kao i stvarna struja armature I koja teče kroz trofazni namot armature:

$$\frac{2}{\pi} \frac{N_u f_{u1}}{p} I' = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{N_a f_{a1}}{p} I,$$

$$I' = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{N_a f_{a1}}{N_u f_{u1}} I.$$

U strojevima s istaknutim polovima prilike su složenije: krivulje protjecanja namota imaju različite oblike (za uzbudni namot je pravokutnik, a za namot armature stepeničasta krivulja), a magnetski se otpor duž oboda stroja znatno mijenja. Protjecanje Θ_d koje djeluje u osi polova (uzdužnoj osi) ima pred sobom znatno manji magnetski otpor od protjecanja Θ_q koje djeluje u osi međupolnog prostora (poprečnoj osi).

Da bi se odredila pravila redukcije struje armature na uzbudnu stranu, treba zasebno promatrati uzdužnu, a zasebno poprečnu os. Pri tome se smatra da namoti imaju jednak magnetsko djelovanje ako stvaraju isti osnovni harmonički član indukcije (sl. 173 i 174), jer ovdje se, zbog promjenljivog magnetskog otpora uzduž oboda armature, ne može, kao u slučaju okruglog rotora, pretpostaviti proporcionalnost osnovnih harmoničkih članova indukcije i protjecanja.

Za redukciju struje armature I_d , koja stvara protjecanje Θ_d u smjeru osi polova d , uvjet je da reducirana struja I'_d , kad teče uzbudnim namotom, stvara isti osnovni harmonički član magnetske indukcije (mjerodavan za inducirani napon) kao stvarna struja I_d u trofaznom namotu armature. Mora dakle biti (sl. 173) $B_{u1} = B_{ad1}$, a odatle:

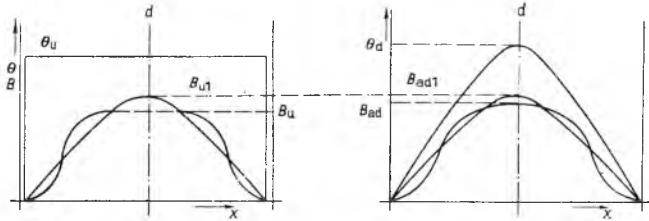
$$I'_d = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} \frac{N_a f_{a1}}{N_u} k_d I_d,$$

gdje je $k_d = \frac{B_{ad1}/B_{ad}}{B_{u1}/B_u}$ faktor reakcije armature u uzdužnoj osi; on ovisi o dimenzijama polnog stopala i o zasićenju.

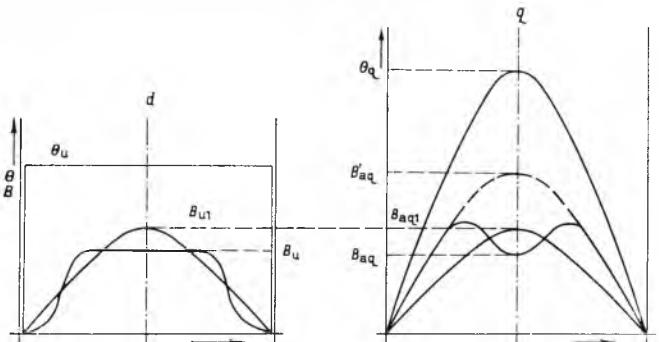
Za redukciju na stranu uzbude struje armature I_q (koja stvara protjecanje u osi međupolnog prostora) postavlja se uvjet da reducirana struja I'_q , kada teče uzbudnim namotom, stvara isti osnovni harmonik kao stvarna struja I_q u trofaznom namotu armature. Mora dakle biti (sl. 174) $B_{u1} = B_{aq1}$, a odatle

$$I'_q = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} \frac{N_a f_{a1}}{N_u} k_q I_q,$$

gdje je $k_q = \frac{B_{aq1}/B_{aq}}{B_{u1}/B_u}$ faktor reakcije armature u poprečnoj osi;



Sl. 173. Magnetsko polje u zračnom rasporu sinhronog stroja s istaknutim polovima u uzdužnoj osi; Θ_u protjecanje uzbudnog namota, Θ_d komponenta protjecanja armaturnog namota u uzdužnoj osi (tjedena vrijednost), B_u indukcija u zračnom rasporu u osi pola d uslijed protjecanja Θ_u (tjedena vrijednost), B_{u1} osnovni harmonik indukcije B_u (tjedena vrijednost), B_{ad} indukcija u zračnom rasporu u osi pola uslijed protjecanja Θ_d (tjedena vrijednost), B_{ad1} osnovni harmonik indukcije B_d (tjedena vrijednost), d os pola



Sl. 174. Magnetsko polje u zračnom rasporu sinhronog stroja s istaknutim polovima u poprečnoj osi. Θ_u protjecanje uzbudnog namota (u uzdužnoj osi), Θ_q komponenta protjecanja armaturnog namota u poprečnoj osi (tjedena vrijednost), B_u indukcija u zračnom rasporu u osi polova uslijed protjecanja Θ_u (tjedena vrijednost), B_{u1} osnovni harmonik indukcije B_u (tjedena vrijednost), B_{aq} indukcija u zračnom rasporu u sredini međupolnog prostora uslijed protjecanja Θ_q , B'_{aq} indukcija u zračnom rasporu u sredini međupolnog prostora uslijed protjecanja Θ_q uz pretpostavku konstantnog zračnog raspora kao u osi pola, B_{aq1} osnovni harmonik indukcije B_{aq} (tjedena vrijednost), d uzdužna os pola, q poprečna os pola

on ovisi o dimenzijsama polnog stopala i o zasićenju.

Protjecanje armaturnog namota sinhronog stroja vrti se u stacionarnom stanju sinhronom brzinom i pomaknuto je prema protjecanju uzbudnog namota za određeni kut, koji je ovisan o opterećenju. U strojevima s istaknutim polovima krivulju protjecanja armaturnog namota (osnovni harmonik) treba rastaviti na dvije komponente: uzdužnu komponentu $\Theta_d(x)$ s amplitudom koja je trajno u osi polova i poprečnu komponentu $\Theta_u(x)$ s amplitudom koja je pomaknuta za 90 električnih stupnjeva prema osi polova. Na taj se način komponente magnetskog polja i naponi koje one induciraju promatraju odvojeno u svakoj osi. Takav je postupak osnova tzv. *dvoosnoj teoriji sinhronog stroja*. Superpozicija komponenata polja uzdužne i poprečne osi moguća je samo ako se zanemari zasićenje. Sastav rezultirajućeg polja prikazan je na sl. 175. Uz zanemareno zasićenje, osnovni harmonik rezultirajuće krivulje indukcije $B_r(x)$ jednak je zbroju osnovnih harmonika stvorenih pojedinačno strujom uzbude i komponentama struje armature u uzdužnoj i poprečnoj osi.

Zasićenje željeza u magnetiskom krugu stroja izobličuje rezultirajuću krivulju indukcije $B_r(x)$ kako je to crtkano prikazano na sl. 175 dolje. Zbog toga, ako se ne zanemari utjecaj zasićenja, ne može se sastaviti rezultirajući osnovni harmonik $B_{r1}(x)$ zbrajanjem osnovnih harmonika $B_{u1}(x)$, $B_{ad1}(x)$ i $B_{aq1}(x)$.

Namoti sinhronih strojeva

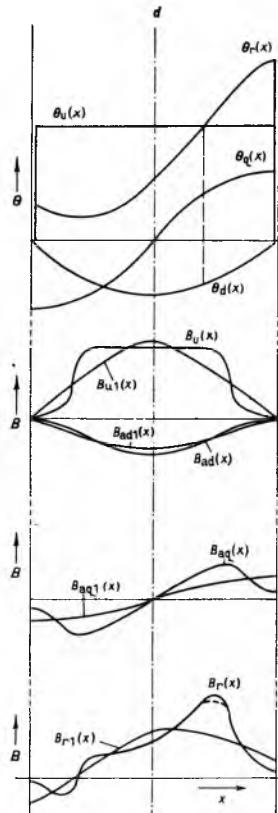
Armaturalni namot sinhronih strojeva obično je raspodijeljen u utorima statora (samo iznimno, u manjim strojevima, u utorima rotora). U jednom se utoru može nalaziti više vodiča (namot sa svicima) ili samo jedan ili dva vodiča (štapni namot).

Naponi koji se induciraju u vodičima jednog utora jednaki su po veličini i faznom položaju. U vodičima pojedinih utora induciraju se naponi koji su jednaki po veličini, ali su jedan prema drugom u fazi pomaknuti. Kut faznog pomaka (električni kut) za N utora i p pari polova iznosi: $\alpha = p \alpha_g = p \cdot 360/N$, gdje α znači električni kut između dva susjedna utora i α_g geometrijski kut između dva susjedna utora.

Promatra li se osnovni harmonički član induciranog napona, može se nacrtati zvijezda napona za bilo koji konačni broj utora. (Vektorsku zvijezdu induciranih naponi u stroju s brojem utora $N = 36$ i brojem pari polova $p = 5$, v. sl. 179.) Spoj pojedinih vodiča treba izvesti tako da ukupni napon osnovnog harmoničkog člana bude što veći, a naponi viših harmoničkih članova što manji. Na sl. 31 (str. 161) prikazan je način spajanja trofaznog namota. Iz te se slike vidi da će ukupni napon biti uvijek manji od algebarskog zbroja napona pojedinih svitaka, a omjer između tih veličina zove se *zonski faktor namota* f_z .

Važan podatak namota je *broj utora po polu i fazi* $q = N/2p m$, gdje je m broj faza. Ako je q cijeli broj, vektorska se slika pod svakim polom ponavlja, pa se zonski faktor može računati samo za jedan pol. Zonski se faktor može izračunati prema sl. 176:

$$f_z = \frac{\sin(q\alpha/2)}{q \sin \alpha/2}.$$

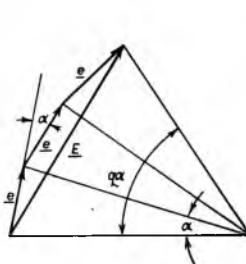


Sl. 175. Sastav rezultirajućeg protjecanja i magnetske indukcije u zračnom rasporu stroja s istaknutim polovima. $\Theta_r(x)$ rezultirajuće protjecanje, $B_r(x)$ rezultirajuća indukcija u zračnom rasporu uslijed protjecanja $\Theta_r(x)$, $B_{r1}(x)$ osnovni harmonik rezultirajuće indukcije $B_r(x)$, d os pola

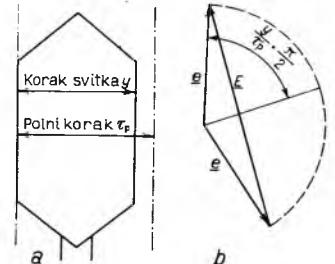
Pojedini vodiči mogu se spajati u zavoje tako da im korak bude manji od polnog koraka τ_p (tj. manji od 180 električnih stupnjeva). U tom se slučaju govorio o *namotu sa skraćenim korakom* (sl. 177 a). Napon jednog zavoja bit će manji od algebarskog zbroja naponi pojedinih vodiča, a omjer između tih veličina zove se *tetivni faktor namota*. Prema sl. 177 b taj faktor iznosi

$$f_s = \frac{E}{2e} = \sin \frac{y \pi}{\tau_p} \frac{\pi}{2}.$$

Ukupni faktor namota f_n očito je umnožak zonskog i tetivnog faktora namota i iznosi $f_n = f_z f_s$.



Sl. 176. Određivanje zonskog faktora f_z namota



Sl. 177. Određivanje tetivnog faktora namota

Poništenje harmoničkih članova. Krivulja magnetske indukcije u zračnom rasporu redovno nije sinusnog oblika, a isti oblik kao ta krivulja imaju i naponi pojedinih vodiča. Ista razmatranja o faktorima namota vrijedit će i za više harmoničke članove. Kako je polni korak v -og harmoničkog člana samo v -ti dio osnovnog polnog koraka τ_p , i električni kut za taj harmonički član povećava se za faktor v : $\alpha v = v p \alpha_g$. Faktori namota viših harmoničkih članova iznose, dakle:

$$f_{zv} = \frac{\sin q \frac{v \alpha}{2}}{v \alpha},$$

$$f_{sv} = \sin \frac{v y \pi}{\tau_p} \frac{\pi}{2}.$$

Vrijednosti zonskog faktora namota dane su u tablici 3. Iz nje se vidi da se upoređo s porastom broja utora po polu i fazi q viši harmonički članovi smanjuju u većoj mjeri nego osnovni član; drugim riječima, uz veći q krivulja napona postaje bliža sinusnom obliku.

Изraz za tetivni faktor namota f_s pokazuje da skraćenje koraka za $1/v$ potpuno poništava harmonički član napona v -og reda (npr. uz $y/\tau_p = \frac{1}{5}$, $f_{s5} = 0$), a istovremeno se osnovni član smanjuje za neznatni iznos ($f_{s1} = 0,95$). Ovom se mjerom također postiže

Tablica 3
ZONSKI FAKTORI NAMOTA

| $q \backslash v$ | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 |
|------------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2 | 0,966 | 0,707 | 0,259 | -0,259 | -0,707 | -0,966 |
| 3 | 0,960 | 0,667 | 0,217 | -0,177 | -0,333 | -0,177 |
| 4 | 0,958 | 0,654 | 0,205 | -5,180 | -0,270 | -0,126 |
| 6 | 0,957 | 0,644 | 0,197 | -0,145 | -0,236 | -0,102 |
| 8 | 0,955 | 0,637 | 0,191 | -0,136 | -0,212 | -0,087 |

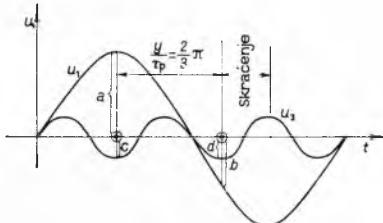
q broj utora po magnetskom polu i faznom namotu, v redni broj harmoničkog člana

Tablica 4
TETIVNI FAKTORI NAMOTA

| $y \tau_p \backslash v$ | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 |
|-------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2/3 | 0,866 | 0 | -0,866 | 0,866 | 0 | -0,866 |
| 4/5 | 0,951 | -0,589 | 0 | 0,589 | -0,951 | 0,951 |
| 6/7 | 0,975 | -0,766 | 0,423 | 0 | 0,455 | 0,799 |
| 8/9 | 0,985 | -0,866 | 0,643 | -0,342 | 0 | 0,342 |
| 10/11 | 0,988 | -0,193 | 0,743 | -0,545 | 0,292 | 0 |

$y \tau_p$ omjer između koraka svitkava i polnog koraka, v redni broj harmoničkog člana

poboljšanje krivulje napona. Na sl. 178 prikazan je vremenski tok napona osnovnog člana u_1 i napona trećeg harmoničkog člana u_3 . Uz skraćenje koraka na $2/3$ bit će u promatranom trenutku u svitku inducirani naponi $u_1 = a - (-b) = a + b$ i $u_3 = (-c) - (-d) = -c + d = 0$.

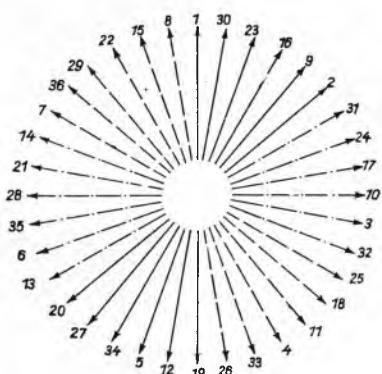


Sl. 178. Utjecaj skraćenja koraka na više harmonike napona

U tabl. 4 navedene su vrijednosti tetivnog faktora namota u ovisnosti o skraćenju koraka. Skraćenje se obično odabira tako da se što više potisnu 5. i 7. harmonički član jer se treći harmonici i njihovi višekratnici poništavaju spojevima trofaznog sistema (sistem bez nul-vodiča).

Odabiranjem velikog q i skraćenjem koraka mogu se poništiti harmonički članovi koji nastaju zbog izobličenja krivulje polja u zračnom rasporu (*prostorni harmonički članovi*). Uslijed vrtnje rotora s istaknutim polovima može doći do stalnih promjena broja utora pod polnim stopalom. To izaziva pulzacije magnetske vodljivosti zračnog raspora, a time i promjene glavnog magnetskog toka. Ove promjene induciraju više harmoničke članove u krivulji napona, koji se zovu *zubni harmonici* jer ovise o broju zubova po jednom polu. Zubni harmonici poništavaju se skošenjem utora statora ili pola za jedan utorski korak.

U generatorima s velikim brojem polova polni je korak razmerno malen, a time je ograničen i mogući broj utora po polu, pa prema tome i broj utora po polu i fazi q . Ako je q manje od tri, pribjegava se tzv. *razlomljenoj namoti*, za koji q nije cijeli broj. U tom slučaju utori iste faze pod različnim polovima ne leže u istom položaju prema osi pola. U zvijezdi se dobiva veći broj vektora po polu, tj. prividno povećanje broja q . Iz vektorske zvijezde na sl. 179, koja pripada namotu sa $N = 36$ utora i $p = 5$ pari polova ($q = 1, 2$), razabira se da je ona identična sa zvijezdom dvopolnog stroja sa $N = 36$ i $q = 6$.

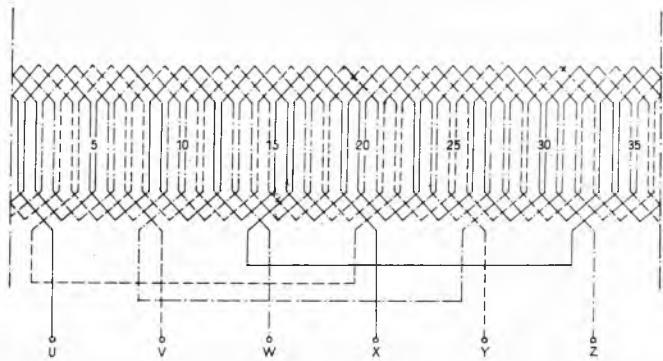


Sl. 179. Vektorska zvijezda induciranih napona u vodičima pojedinih utora. Zvijezda je nacrtana za stroj sa brojem utora $N = 36$ i brojem pari polova $p = 5$

Ako je q cijeli broj, uvijek se može izvesti simetrični višefazni namot jer je broj utora $N = 2p m q$. Ako q nije cijeli broj, moraju za simetrični namot biti ispunjeni ovi uvjeti: za jednoslojni namot da je $N/2 m t$ cijeli broj, a za dvoslojni namot da je $N/m t$ cijeli broj, pri čemu je t najveća zajednička mjera broja utora N i broja pari polova p .

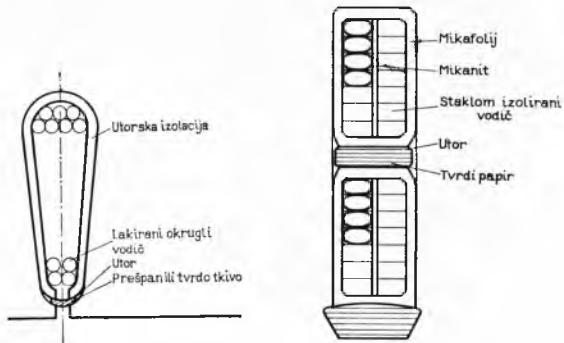
Zvijezda utora ima N/t zraka, a svaka zraka sadrži t vektora (zvijezda se ponavlja t puta). Prividni broj utora po polu i fazi q' iznosi: $q' = N/2 m t$ (ako je N/t parni broj); $q' = N/m t$ (ako je N/t neparni broj).

Sl. 32 (str. 161) prikazuje razvijenu shemu spoja trofaznog jednoslojnog namota, a sl. 180 shemu trofaznog dvoslojnog valovitog namota prema zvijezdi sa sl. 179.



Sl. 180. Shema trofaznog dvoslojnog valovitog namota. U-X, V-Y i W-Z počeci u krajevi namota pojedinih faza

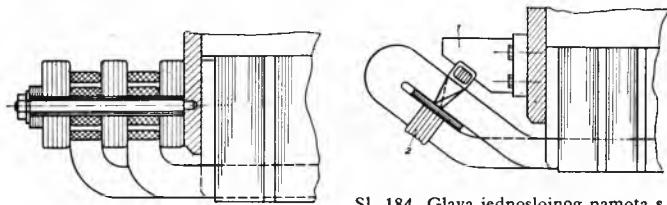
Izvedbe armaturnih namota. Namoti armature pojavljuju se u dvije osnovne izvedbe: kao jednoslojni namoti kad u jednom utoru leži samo jedna strana svitka ili samo jedan štap (sl. 181) i kao dvoslojni namoti kad u utoru leže dvije strane svitka ili dva štapa (sl. 182).



Sl. 181. Jednoslojni usipni namot

Sl. 182. Dvoslojni uložni namot

Prema izvedbi svitaka ili štapova može se u jednoslojnem namotu primijeniti namot s nejednakim svicima (lučni namot), s glavama u dvije ili tri etaže (sl. 183), i namot s jednakim svicima (sl. 184).



Sl. 183. Glava dvoetažnog namota

Sl. 184. Glava jednoslojnog namota s jednakim svicima. 1. Potpora namota, 2. bandaža

U dvoslojnim namotima susreću se, uglavnom, namoti s jednakim svicima koji obično imaju skraćeni korak (sl. 185) i evolventni namot koji se primjenjuje kad je korak namota vrlo velik (dvopolni strojevi).

Prema načinu spajanja svitaka ili štapova razlikuju se petljasti i valoviti namot.

Petljasti namot izведен je tako da se svici jedne faze pod jednim polom spajaju u seriju, a ovakve grupe svitaka spajaju jedna s drugom bilo u seriju bilo paralelno. Paralelni spoj grupa svitaka u tzv. paralelne grane primjenjuje se najčešće u niskonaponskim strojevima. Sl. 32 na str. 161 prikazuje shemu petljastog namota.

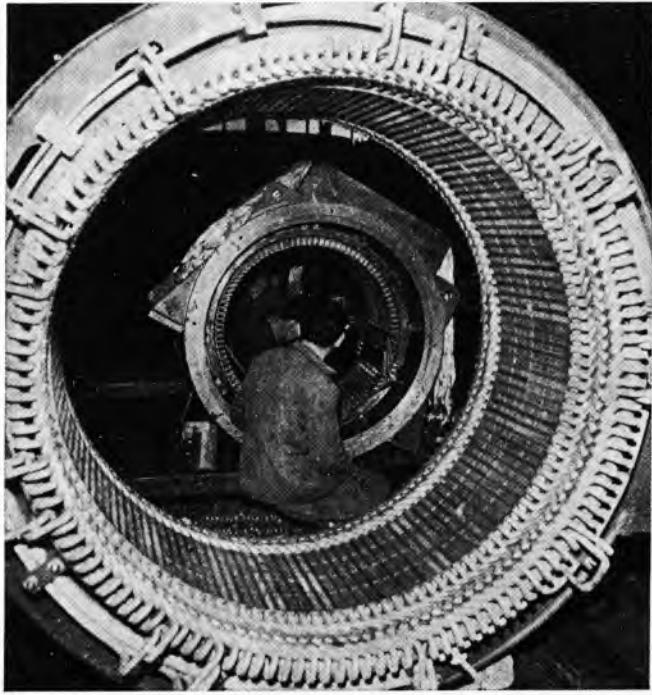
Valoviti namot primjenjuje se u štavnim namotima, a izведен je tako da se svaki štap spaja sa slijedećim štapom pod susjednim polom, uvijek u istom smjeru u odnosu prema prvoru armature. Shemu valovitog namota v. sl. 180.

S obzirom na oblik utora i njihovu izvedbu razlikuju se usipni, utični i uložni namoti.

Usipni namoti upotrebljavaju se kad su utori poluzavoreni i za namote s okruglom žicom. Svici se izrađuju s pomoću šablone, a pojedini se vodiči usipaju jedan po jedan kroz otvor utora (v. sl. 181). Usipni namot primjenjuje se u manjim strojevima i za napone do 4000 V.

Uticni namot primjenjuje se u poluzavorenim utorima i za strojeve srednjih snaga i napona. Svitak se izvodi u obliku slova U i s jedne se strane aksijalno utakne u utor. Drugu glavu svitka treba oblikovati na samom stroju i zavariti s uloženim dijelom. Zbog tehnoloških poteškoća ova se izvedba izbjegava.

Uložni namot sačinjavaju svici ili štapovi koji su potpuno formirani i izolirani prije ulaganja, pa se ulažu u otvorene ute. Ova izvedba namota primjenjuje se za strojeve svih snaga i napona (v. sl. 182).



Sl. 185. Glave dvoslojnog namota

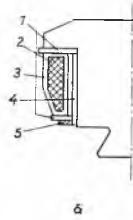
Izolacija okruglih bakrenih vodiča obično se izvodi izolirnim lakom koji može pripadati klasi izolacije E, B ili F. Izolacija utora izvodi se od ploča prešpana, leteroida ili poliesterskih folija (npr. Mylar i sl.) debljine 0,3–1,0 mm. Utori se zatvaraju klinovima od prešpana, drva, tvrdog tkiva i sl. Ovakvi se namoti nakon ulaganja impregniraju u vakuumu i suše u peći.

Uticni i uložni namoti obično se primjenjuju u strojevima većih snaga u kojima se radi boljeg punjenja utora upotrebljavaju profilni vodiči. Ovi su vodiči redovno izolirani lakiranim staklenim opredom. Pri naponima manjim od 4000 V ovakav se namot može izolirati od željeza utorskim oblogom, npr. u usipnim namotima. Pri višim naponima pojavljuju se dvije osnovne izvedbe izolacije: diskontinuirana i kontinuirana. *Diskontinuirana izolacija* ima ljsuk od šelak-mikafolija, asfalt-mikafolija ili epoksidnog mikafolija na ravnem dijelu svitka ili štapa, a glave namota omotane su izolacionim vrpcama. Na mjestu gdje se na izolaciju utora nastavlja izolacija glavu nastaje diskontinuitet, pa odatle naziv ovoj vrsti izolacije. *Kontinuirana izolacija* izvodi se tako da se cijeli svitak ili štap omota posebnim poroznim vrpccima i u vakuumu impregnira umjetnim smolama.

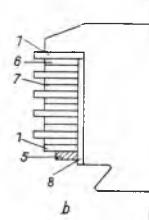
Uzbuđni namoti sinhronih strojeva. U generatorima s istaknutim polovima svici namota uzbuđe mogu imati više slojeva ili imaju samo jedan sloj (sl. 186).

Zbog boljeg odvoda topline nastoji se što češće primjenjivati jednoslojni namot, ako to dozvoljavaju dimenzije vodiča. Jednoslojni se namoti mogu izvesti namatanjem na specijalnim stroje-

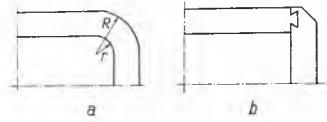
vima ili tvrdim lemljenjem ravnih bakrenih traka (sl. 187). Da bi se poboljšalo hlađenje, jednoslojnim se namotima povećava vanjska površina time što se krajevi bakarne trake na poseban način oblikuju ili time što se nekoliko vodiča za ~ 10 mm istaknu izvan plohe svitka (sl. 188).



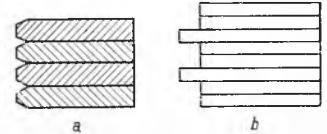
Sl. 186a. Jednoslojni namot



Sl. 186b. Višeslojni namot



Sl. 187. Izvedbe jednoslojnog uzbuskog namota. a Savijeni namot, b tvrdi lemljeni namot

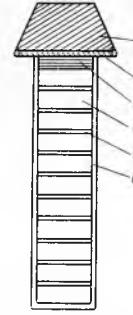


Sl. 188. Načini povećanja rashladne površine u namotima jednoslojne uzbuđene. a Posebno oblikovani krajevi bakarne trake, b vodiči istaknuti izvan plohe

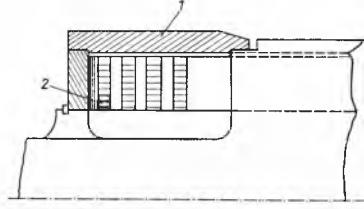
U višeslojnim namotima obično se upotrebljava stakлом izolirani vodič, a svitak je prema jezgri pola izoliran mikafolijom i pločama od tvrdog papira. U jednoslojnim namotima upotrebljava se gol vodič, a između vodiča se uključuje izolacija od azbesta pojačana stakлом i impregnirana umjetnim smolama. Jednoslojni namoti izoliraju se prema jezgri pola slično kao višeslojni.

U strojevima s okruglim rotorom uzbuđni je namot smješten u utorima koji su izgrodani u punom rotoru. Vodiči su goli, a među njima su izolacioni uložci. Prema stijeni utora svici su izolirani ljskom od mikafolija ili staklenog prediva impregniranog epoksidnim smolama (sl. 189). Centrifugalne sile namota unutar utora savladavaju se s pomoću klinova od visokokvalitetnih specijalnih bronzi. Čeoni dio namota učvršćen je kapama od nemagnetnog čelika (sl. 190).

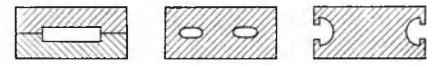
Oblik vodiča ovisi prvenstveno o načinu hlađenja. Pri indirektnom hlađenju upotrebljava se plosnati bakar, a pri direktnom se hlađenju upotrebljavaju šupljiji vodiči različitih oblika (sl. 191).



Sl. 189. Uzbuđni namot na okruglom rotoru. 1 Klin, 2 uložak (mjenjeni lim), 3 tvrdi papir, 4 goli bakreni vodič, 5 vatrazbest, 6 ljsuk epoksid-staklo



Sl. 190. Učvršćenje glave uzbuskog namota na okruglom rotoru. 1 Kapa od nemagnetskog čelika, 2 čeoni dio namota



Sl. 191. Oblici direktno hlađenih vodiča

Pružni namot sinhronih generatora ugrađuje se po pravilu u polna stopala strojeva s istaknutim lameliranim polovima. On se sastoji od okruglih štapova umetnutih u ute u polnom stopalu; štapovi su među sobom povezani s pomoću dva prstena s obiju čeonim strana pola. U strojeve s okruglim rotorom ugrađuje se također prigušni namot kad se predviđa veliko nesimetrično opterećenje.

Vektorske slike i karakteristike sinhronog stroja

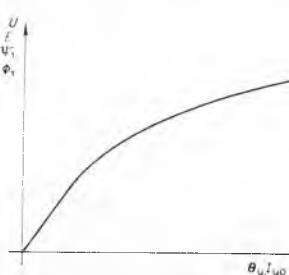
Vektorska slika prikazuje odnose među pojedinim naponima i strujama u stroju. Ovakvo je prikazivanje ograničeno samo na sinusne veličine. Kako je utvrđen način svođenja izmjenične struje

armature na istosmjernu struju uzbude i obratno, može se u vektorskoj slici prikazati i struja uzbude, premda je ona u stacionarnom stanju istosmjerna. Fazni položaj struje uzbude, svedene na stranu armature, jednak je faznom položaju njezina protjecanja, koje je — promatrano sa strane armature — izmjenična veličina s frekvencijom sinhrone brzine. U vektorskim slikama pokazuju se samo vektori prvih harmonika promjenljivih veličina. Vektorske slike stoga ne daju savršeno tačnu sliku dogadaja, ali dobiveni rezultati ipak su gotovo jednakim stvarnim vrijednostima.

Karakteristika praznog hoda (sl. 192) prikazuje ovisnost napona stezaljki U o uzbudnoj struci I_u pri stalnoj brzini vrtnje, $U = f(I_u)$. Pri praznem je hodu statorskog namota generatora otvoren, pa u njemu ne teku nikakve struje. Kako, dakle, nema ni padova napona, napon je stezaljki U u tom slučaju jednak induciranim naponu E . Magnetski tok u zračnom rasporu ovisan je stoga jedino o protjecanju uzbudnog namota Θ_u , odnosno o uzbudnoj (istosmjernoj) struci I_{uo} . Pri malom je toku zasićenost željeza još neznatna, pa se protjecanje troši skoro isključivo za svladavanje magnetskog otpora zračnog rasporna (početni pravocrtni dio krivulje). Povijanje karakteristike nastupa tek kasnije, kad zasićenost postane osjetljivija.

Vektorska slika sinhronog stroja pri praznem hodu (sl. 193) prikazuje odnose među vektorima pojedinih veličina. Tok u zračnom rasporu Φ_1 (prvi harmonik) ovisan je samo o struci uzbude I_{uo} jer namotom armature ne teče struja. Odnos među njima prikazuje karakteristika glavnog magnetskog kruga stroja, koja je jednak karakteristici praznog hoda danoj na sl. 192. Tok Φ_1 sinusno je raspoređen duž zračnog rasporna i vrti se zajedno s rotorom stvarajući time harmoničke promjene magnetskog toka ulančenog namotima armature. Zbog toga može se i ulančeni tok Ψ_1 prikazati vektorom. Vektori I_{uo} , Θ_u , Φ_1 i Ψ_1 međusobno su u fazi. Negativna derivacija ulančenog toka Ψ_1 po vremenu predstavlja inducirani napon, koji je u tom slučaju jednak i naponu stezaljki U . Provede li se derivacija po vremenu u simboličkom računu, dobit će se da vektor induciranih napona E zaostaje za vektorom ulančenog toka Ψ_1 za fazni pomak od 90° . Tok u zračnom rasporu Φ_1 i njegovo ulančenje Ψ_1 proporcionalni su induciranim naponu E .

Vektorska slika opterećenog stroja s okruglim rotorom prikazana je na sl. 194. Ukupni magnetski tok Φ_{ri} uzbuden je rezultirajućim ukupnim protjecanjem Θ_r , koje predstavlja vektorski

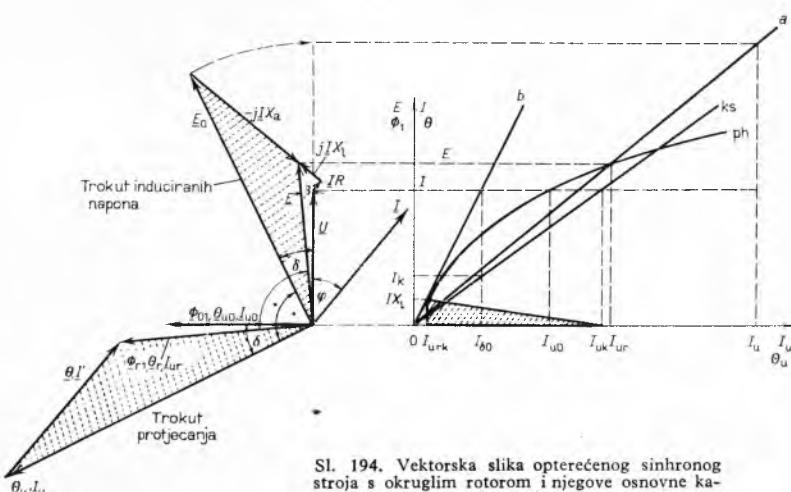


Sl. 192. Karakteristika praznog hoda i karakteristika magnetiziranja

Sl. 193. Vektorska slika pri praznem hodu

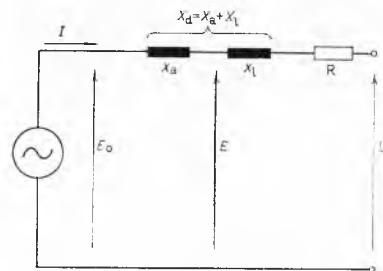
čenog toka Ψ_1 po vremenu predstavlja inducirani napon, koji je u tom slučaju jednak i naponu stezaljki U . Provede li se derivacija po vremenu u simboličkom računu, dobit će se da vektor induciranih napona E zaostaje za vektorom ulančenog toka Ψ_1 za fazni pomak od 90° . Tok u zračnom rasporu Φ_1 i njegovo ulančenje Ψ_1 proporcionalni su induciranim naponu E .

Vektorska slika opterećenog stroja s okruglim rotorom prikazana je na sl. 194. Ukupni magnetski tok Φ_{ri} uzbuden je rezultirajućim ukupnim protjecanjem Θ_r , koje predstavlja vektorski



Sl. 194. Vektorska slika opterećenog sinhronog stroja s okruglim rotorom i njegove osnovne karakteristike

zbroj protjecanja uzbudnog namota Θ_u i protjecanja armature Θ koje se pojavljuje zbog reakcije armature. Vektori protjecanja: Θ_u , Θ i rezultirajućeg ukupnog protjecanja Θ_r sačinjavaju u vektorskoj slici tzv. *trokut protjecanja* (šrafiran). Ukupni magnetski tok Φ_{ri} inducira u namotu armature napon E koji zaostaje iza svog vektora ukupnog protjecanja Θ_r za 90° . Može se zamisliti da svako od ovih komponentnih protjecanja inducira u namotu armature svoj komponentni napon: Θ_u napon E_0 , a Θ napon jednak $-IX_a$. Vektori tih zamišljenih napona i iz njih rezultirajući napon E sačinjavaju u vektorskoj slici tzv. trokut induciranih napona (šrafiran) koji je geometrijski sličan trokutu protjecanja. Rezultirajući napon E tjeru u zatvorenom strujnom krugu generator-trošilo ili izvor-motor struju opterećenja I . Ona zaostaje za naponom stezaljki U za kut φ i stvara u radnom otporu armature pad napona IR , a osim toga uzbuduje i rasipni magnetski tok namota armature. Ovaj je rasipni tok također izmjeničan i uslijed toga se pojavljuje inducirani napon koji zaostaje za strujom za 90° . Prikaže li se ova veličina kao pad napona, tada on prethodi struji opterećenja I za 90° (IX_1 na sl. 194). Vektorski zbroj napona stezaljki U i padova napona IR i IX_1 jednak je vektoru induciranih napona E . Kut između unutarnjeg napona rotora E_0 i naponu stezaljki U zove se kut opterećenja δ .



Sl. 195. Nadomjesna shema stroja s okruglim rotorom. X_a reaktancija armature, X_l rasipna reaktancija, X_d sinhrona reaktancija, E_0 napon rotora, E rezultirajući inducirani napon, U napon stezaljki

Prenese li se (crtkanom linijom) duljinu vektora E u desni dio dijagrama na karakteristiku praznog hoda (magnetiziranja) ph, dobiva se magnetska radna tačka za predočeni režim pogona s koordinatama E i I_{ur} . Zbog preglednosti se karakteristika magnetiziranja ph u toj tački linearizira pomoću pravca a. Svakom opterećenju pripada, dakle, druga radna tačka i druga linearizirana karakteristika. S pomoću ove linearizirane karakteristike svakoj se uzbudnoj struci može pridružiti određeni inducirani napon, no od ovih parova veličina stvarno postoji samo inducirani napon E i ukupna struja uzbude I_u . Linearizacija magnetske karakteristike (pravac a) omogućuje da se ukupnoj uzbudnoj struji I_u koja pri nekom opterećenju teče uzbudnim namotom, pridruži i proporcionalni unutarnji napon rotora E_0 koji zaostaje za strujom I_u za 90° .

Nadomjesna shema sinhronog stroja (sl. 195) olakšava razumijevanje njegovog djelovanja. U toj shemi znači R radni (omski) otpor namota statora, X_l rasipna reaktancija, a X_a reaktanciju armature. Zbroj tih dviju reaktancija predstavlja vrlo značajnu veličinu, koja se zove *sinhrona reaktancija* $X_d = X_a + X_l$. E_0 je tzv. unutarnji napon, napon rotora ili napon iza sinhronih reaktancija; on je i proporcionalan uzbudnoj struci I_u . E je vektorski zbroj svih u armaturi induciranih napona, $E = E_0 - jIX_a$. (IX_a pri tom je napon što se inducira zbog protjecanja armature Θ , kad kroz nju teče struja opterećenja I .) U je napon stezaljki.

Karakteristika trajnog (ustaljenog) kratkog spoja takođe je vrlo važna za analizu svojstava sinhronih strojeva. Ona pokazuje ovisnost struje u armaturi o uzbudnoj struci, $I_k = f(I_{uk})$, za sinhroni stroj koji radi kao generator, koji se vrti sinhronom brzinom i koji ima kratkospojene izlazne stezaljke. Radi određivanja te karakteristike uzbudna se struja

postupno povećava dok pripadna struja kratkog spoja u armaturi ne dostigne nazivnu jakost. Pomoću izmjerjenih vrijednosti I_k i I_{uk} konstruira se karakteristika kratkog spoja. Jakost struje određuju u tom slučaju samo radni i induktivni otpor statora. Budući da je radni otpor generatora R vrlo malen, a s obzirom na to da je omje. X_d/R velik, dozvoljeno je u slučaju kratkog spoja zanemariti pad napona $I R$. Kako se najveća dozvoljena jakost struje postiže već pri malom toku, zasićenje je željeza u generatoru neznatno, pa karakteristika kratkog spoja ima oblik pravca koji prolazi kroz početak koordinatnog sistema (pravac ks na sl. 194).

Vektorska slika sinhronog stroja pri kratkom spoju (sl. 196) pokazuje odnos među vektorima pojedinih veličina uz zanemarenje pada napona $I R$. Budući da kratkospojeni generator predstavlja posvema induktivni otpor, struja kratkog spoja I_k zaostaje za rezultirajućim naponom E za 90° . Taj je napon jednak razlici između napona E_0 i zbog reakcije armature induciranih napona $I_k X_a$. Svakome od tih napona prethodi za 90° odgovarajuće protjecanje Θ_{uk} , Θ_k i Θ_{rk} .

U slučaju kratkog spoja radna je tačka na krivulji magnetiziranja ph u njezinom pravocrtnom dijelu. Nazivno je stanje kratkog spoja ono u kojem kroz kratkospojeni namot armature teče nazivna struja I . Da bi se to postiglo, mora uzbudnim namotom teći struja I_{uk} . S pomoću magnetske radne tačke u kratkom spoju (apscisa I_{uk} , ordinata $I X_1$) i struje uzbude I_{uk} određen je karakteristični trokut prikazan šrafirano na sl. 194 desno. Dulja kateta ovog trokuta ($I_{uk} - I_{urk}$) komponenta je uzbudne struje koja je potrebna da se kompenzira reakcija armature u trajnom kratkom spoju, a I_{urk} je dio uzbudne struje koji je potreban za svaldavanje magnetskog otpora glavnog magnetskog kruga. Linija b povučena iz koordinatnog početka kroz ovu radnu tačku zove se i linija zračnog raspora. Ona služi pri većoj uzbudnoj struci za određivanje onog njezinog dijela koji je potreban za svaldavanje magnetskog otpora u zračnom rasporu.

Kad se uzbuda poveća, a struja opterećenja u armaturi zadrži na istoj vrijednosti, karakteristični se trokut pomiče paralelno prema gore tako da njegov vrh pri tome ostaje na karakteristici praznog hoda. Njegov desni vrh opisuje pri tome karakteristiku čisto reaktivnog opterećenja ($\cos \varphi \approx 0$). Kako pri tome rasipanje rotora nije uzeto u obzir, primjenjuje se radi dobivanja tačnijih rezultata mjesto karakterističnog trokuta radije tzv. Potierov trokut (v. dalje).

Relativne vrijednosti upotrebljavaju se u karakteristikama sinhronog električnog stroja često umjesto absolutnih veličina. To su omjeri između stvarnih i baznih veličina. Za bazne veličine statora redovno se odabiraju nazivne veličine. Relativna vrijednost sinhronih reaktancija X_d može se odrediti iz karakteristika praznog hoda i kratkog spoja. Za baznu impedanciju statora služi omjer između nazivnog faznog napona i nazivne fazne struje.

Iz pokusa kratkog spoja prema nadomjesnoj shemi na sl. 195, a uz zanemarenje pada napona $I R$, slijedi $X_d = U/I_k$. Relativna vrijednost sinhronih reaktancija x_d iznosi dakle:

$$x_d = \frac{X_d}{X_n} = \frac{U I}{U I_k} = \frac{I}{I_k}.$$

Prema sl. 194 slijedi iz karakteristike kratkog spoja ks :

$$\frac{I_k}{I} = \frac{I_{\delta 0}}{I_{uk}} \quad \text{i} \quad I_k = I \frac{I_{\delta 0}}{I_{uk}}.$$

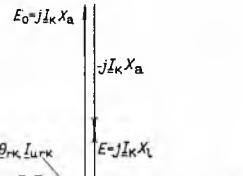
Uvrštenjem ovog izraza u prethodnu jednadžbu dobije se za relativnu vrijednost sinhronih reaktancija izraz $x_d = I_{uk}/I_0$.

Ovako dobivena sinhrona reaktanca vrijedi za nezasićen željezne jezgre jer su magnetske radne tačke koje pripadaju karakteristici kratkog spoja na pravocrtnom dijelu karakteristike magnetiziranja (sl. 194).

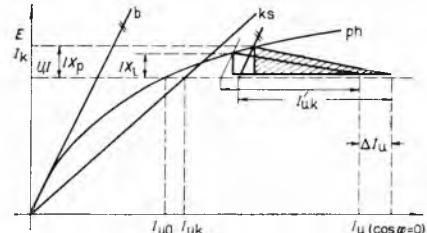
Vektorske slike sinhronog stroja redovno se crtaju u sistemu predznaka generatora (v. str. 162).

Potierov trokut. U vektorskem prikazu na sl. 196 određen je tzv. napon rotora E_0 , razmijeran uzbudnoj struci I_u , ne vodeći

računa o rasipanju uzbudnog namota. Ovo se rasipanje često ipak uzima u obzir približno, računajući s tzv. Potierovom reaktancijom X_p umjesto rasipnom reaktancijom X_1 . Potierova reaktanca uviјek je veća od rasipne reaktancije namota armature upravo za dodatak u kojem je uračunat utjecaj rasipanja uzbudnog namota. Karakteristični trokut sl. 197 u kojem je umjesto pada napona na rasipnoj reaktanciji namota armature naveden pad napona na Potierovoj reaktanciji zove se Potierov trokut. Potierova reak-



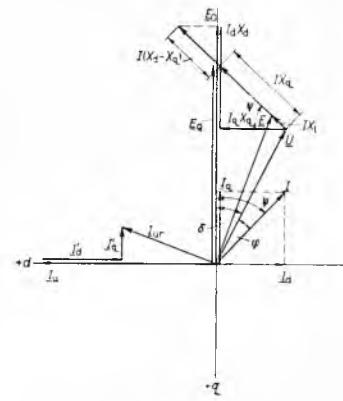
Sl. 196. Vektorska slika trajnog kratkog spoja



Sl. 197. Određivanje Potierova trokuta. Od uzbudne struje za induktivno opterećenje $I_u \cos \varphi = 0$ oduzme se na visini promatrano napona U struja uzbude u kratkom spoju I_{uk} koja pripada tom istom opterećenju. Iz tako dobivene tačke povuči se pravac usporedan s karakteristikom zračnog raspora s sve dok ne presječi karakteristiku praznog hoda ph. Na taj način određen je pad napona na Potierovoj reaktanciji $I X_p$. ΔI_u je dodatak uzbudne struje zbog rasipanja uzbudnog namota.

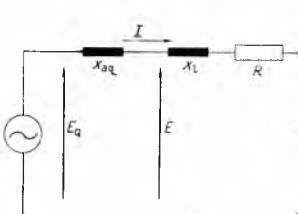
tancija određuje se s pomoću uzbudne struje za određeno induktivno opterećenje, karakteristike kratkog spoja i karakteristike praznog hoda, prema sl. 197. Komponenta uzbudne struje ΔI_u potrebna je zbog rasipanja uzbudnog namota. Postupak s Potierovom reaktancijom uzima ovu komponentu izravno u račun.

Vektorska slika opterećenog stroja s istaknutim polovima prikazana je na sl. 198. U ovim se strojevima promatra



Sl. 198. Vektorska slika opterećenog stroja s istaknutim polovima

reaktancija armature posebno u uzdužnoj i posebno u poprečnoj osi. Svaku od ovih reaktancija pripada odgovarajući pad napona armature ($I_d X_{ad}$ odn. $I_q X_{aq}$) koji za 90° prethodi odgovarajućoj komponenti struje armature (I_d odnosno I_q). Na osnovu toga može se nacrtati vektorska slika prikazana na sl. 198.



Sl. 199. Nadomjesna shema stroja s istaknutim polovima. X_{ad} poprečna komponenta reaktancije armature, X_{aq} rasipna reaktanca, R radni otpor statorskog namota, E_Q poprečna komponenta rotorskog napona, E rezultujući inducirani napon

Vektorska slika pokazuje da se za stroj s istaknutim polovima može sastaviti ista nadomjesna shema kao za stroj s okruglim rotorom, no s drukčijim veličinama (sl. 199). E_Q je napon iza poprečne sinhronih reaktancija X_Q :

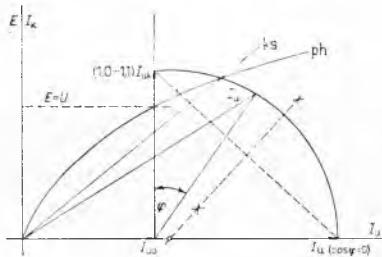
$$E_Q = E_0 - I_d (X_d - X_q).$$

Svedski dijagram. Vektorske slike mogu poslužiti za određivanje uzbudne struje (E_0 odnosno I_u) pri određe-

nom opterećenju. U praksi se u tu svrhu češće primjenjuju iskustvene metode, a vektorske slike služe u prvom redu za fizikalno tumačenje pojava. Proračun pripadne uzbudne struje za određeno opterećenje najčešće se provodi pomoću tzv. švedskog dijagrama (postupkom određenim švedskim normama). Taj je postupak prikazan na sl. 200.

Za konstrukciju švedskog dijagrama potrebno je poznavati uzbudnu struju pri praznom hodu I_{u0} (ona je ovisna o naponu armature i frekvenciji), uzbudnu struju pri kratkom spoju I_{uk} (ona ovisi o struci armature) i uzbudnu struju pri čistom induktivnom opterećenju $I_{u(\cos\varphi=0)}$, koja je ovisna o naponu, frekvenciji i struci armature.

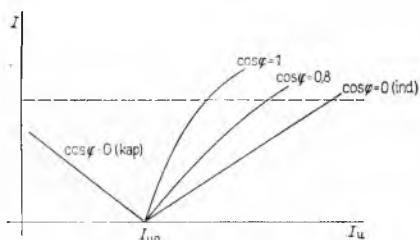
Za odredene iznose napona stezaljki U , frekvencije f i struje opterećenja I , a različite faktore snage $\cos\varphi$, pripadna uzbudna struja I_u određuje se po jednoj krivulji švedskog dijagrama. Za



Sl. 200. Određivanje uzbudne struje pomoću švedskog dijagrama. Na vektor struje praznog hoda I_{u0} , koji je postavljen u os apsisa, okomit se nacrti vektor struje kratkog spoja koji pripada promatranoj opterećenju, pomnožen s iskustvenim faktorom $(1,0 \cdots 1,1) \times I_{uk}$. U os apsisa položi se vektor uzbudne struje $I_u \cos \varphi = 0$ za opterećenje koje je jednak po iznosu ali induktivno. Vrhovi vektora $(1,0 \cdots 1,1) I_{uk}$ i $I_u \cos \varphi = 0$ leže na kružnici kojoj je središte na osi apsisa

neki drugi iznos struje armature I mijenja se pripadna struja kratkog spoja I_{uk} i struja $I_{u(\cos\varphi=0)}$, pa se uzbudna struja I_u određuje po drugoj, novoj krivulji. Isto tako, za drugi napon U ili frekvenciju f mijenjaju se struje I_{u0} i $I_{u(\cos\varphi=0)}$. Struja kratkog spoja u švedskom se dijagramu množi s empiričkim koeficijentom koji iznosi od 1,0 do 1,1. Veći se koeficijent primjenjuje za male strojeve i obrnuto.

Krivulje regulacije također su važna karakteristika sinhronog stroja. One pokazuju ovisnost uzbudne struje o struci armature: $I_u = f(I)$, za različite faktore snage ($\cos\varphi$), uz određeni napon armature i određenu frekvenciju (sl. 201).



Sl. 201. Krivulje regulacije

Elektromagnetski zakretni moment u sinhronim strojevima

Elektromagnetski zakretni moment u stroju nastaje djelovanjem među magnetskim poljem i strujama koje teku vodičima. Ovaj je moment u ustaljenom pogonu suprotan vanjskom momentu kojim na osovinu električnog stroja djeluje pogonski ili radni stroj. U radu generatora elektromagnetski moment djeliće kočno (protumoment), suprotno brzini vrtnje koja ima smjer zakretnog momenta pogonskog stroja. U radu motora elektromagnetski moment pokreće osovinu, a opire mu se moment radnog stroja.

Zakonitosti elektromagnetskog momenta stroja mogu se izvesti promatranjem magnetskog polja, protjecanja i strujnog obloga u zračnom rasporu, tik uz obod armature. Za rad stroja od osnovnog su značenja prvi harmonički članovi tih veličina koji su određeni vektorskom slikom. Osnovni harmonički član rezultirajuće magnetske indukcije $B_r(x)$ (v. sl. 175) iznosi

$$B_r(x) = B_r \sin \frac{\pi}{\tau_p} x,$$

gdje je x prostorna koordinata duž oboda armature, a τ_p polni korak stroja na obodu armature.

Osnovni harmonički član protjecanja namota armature zaoštaje za indukcijom B_r , za kut $\gamma = \frac{\pi}{2} + (\beta + \varphi)$, gdje je $\beta + \varphi$ kut zaostajanja struje opterećenja I za induciranim naponom E (v. sl. 194). On u bilo kojoj tački x iznosi

$$\Theta(x) = \Theta \sin \left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \gamma \right).$$

Između strujnog obloga i protjecanja postoji odnos:

$$A(x) = \frac{d\Theta(x)}{dx} = A \sin \left[\frac{\pi}{\tau_p} x - \left(\beta + \varphi \right) \right].$$

Na dužini oboda dx djeluje, u skladu s definicijom strujnog obloga, struja $A(x) dx$. Magnetska indukcija $B_r(x)$ i struja $A(x) dx$ na tom mjestu daju silu:

$$dF = A(x) B_r(x) L dx,$$

gdje L znači aktivnu duljinu stroja.

Zakretni moment sile dF iznosi

$$dM = A(x) B_r(x) L \frac{D}{2} dx,$$

gdje je D polumjer prvrta.

Ukupni elektromagnetski zakretni moment stroja iznosi

$$M = L \frac{D}{2} \int_0^{2\pi p} A(x) B_r(x) dx,$$

$$M = \frac{D^2 \pi}{4} L A B_r \cos(\beta + \varphi) = V A B_r \cos(\beta + \varphi).$$

Ovaj izraz pokazuje da je elektromagnetski moment stroja s obujmom prvrta $V = \frac{D^2}{4} \pi L$ ovisan o faznom pomaku struje opterećenja I prema induciranim naponu E , o rezultirajućoj magnetskoj indukciji B_r i strujnom oblogu armature A .

Tjedena vrijednost magnetske indukcije B_r u zračnom rasporu može se izraziti pomoću rezultirajućeg ulančenog toka s namotom armature Ψ_r :

$$B_r = \frac{p \Psi_r}{D L N_f a}.$$

Tjedena vrijednost strujnog obloga A može se izraziti pomoću struje armature, pa je za trofazni namot

$$A = \frac{\sqrt{2} \cdot 6 N_f a}{D \pi} I.$$

S pomoću ovih zamjena dobiva se drugi oblik izraza za elektromagnetski moment stroja s trofaznim namotom:

$$M = \frac{3}{2} p \Psi_r (\sqrt{2} I) \cos(\beta + \varphi).$$

Umjesto kuta $(\beta + \varphi)$ između induciranih naponi E i struje opterećenja I može se uvesti kut $\gamma = \frac{\pi}{2} + \beta + \varphi$ između rezultirajućeg ulančenog toka Ψ_r i struje opterećenja I (sl. 194):

$$M = \frac{3}{2} p \Psi_r (\sqrt{2} I) \sin \gamma.$$

Sastav ovog izraza odgovara iznosu vektorskog (vanjskog) umnoška između vektora Ψ_r i $\sqrt{2} I$. Prema tome može se napisati

$$M = \frac{3}{2} p |\Psi_r \times \sqrt{2} I|.$$

Elektromagnetski moment razmjeran je iznosu vektorskog umnoška $\Psi_r \times \sqrt{2} I$. Prema geometrijskom tumačenju, to je površina paralelograma kojeg su stranice vektori Ψ_r i $\sqrt{2} I$. Na primjer, u slučaju čistog induktivnog opterećenja vektori Ψ_r i $\sqrt{2} I$ međusobno su protufazni, paralelogram degenerira u pravac i njegova je površina jednaka nuli. Taj je rezultat trebalo i očekivati jer pri čistom induktivnom opterećenju u stroju nema korisne elektromehaničke pretvorbe energije.

Zakretni moment stroja s istaknutim polovima. Vektorski umnožak može se na poznati način izraziti s pomoću međusobno okomitih komponenata vektora. Ova je okolnost posebno pogodna za analizu momenta u stroju s istaknutim polovima, u kojem se svaka elektromagnetska veličina rastavlja na uzdužnu i poprečnu komponentu. Tok ulančen s namotom armature Ψ_r ima komponente Ψ_d , Ψ_q , a amplituda struje armature $\sqrt{2} I$ komponente i_d , i_q . Iznos momenta izražen pomoću komponenata jest

$$M = \frac{3}{2} p \begin{vmatrix} \Psi_d & \Psi_q \\ i_d & i_q \end{vmatrix} = -\frac{3}{2} p (\Psi_q i_d - \Psi_d i_q).$$

U ovom izrazu pozitivni predznak ima moment koji djeluje u smjeru vrtnje osovine, dakle motorski, kretni moment. U režimu rada generatora elektromagnetski moment se suprotstavlja vrtnji rotoru, on ima generatorski, kočni smjer. Ako se pozitivni predznak prida momentu kočnog smjera, bit će

$$M = \frac{3}{2} p (\Psi_q i_d - \Psi_d i_q).$$

Taj je izraz vrlo pogodan za analizu rada stroja. On određuje iznos elektromagnetskog momenta u svakom stanju, a ne samo u ustaljenom, ako se uvrste veličine koje takvom stanju pripadaju. Iz vektorske slike (sl. 198) slijedi (uz predznaće u skladu s odabranim sistemom osi d i q):

$$\begin{aligned} i_q &= -\frac{\sqrt{2} U \sin \delta}{X_q}, & \Psi_q &= \frac{1}{\omega} X_q i_q, \\ i_d &= -\sqrt{2} \frac{E_0 - U \cos \delta}{X_d}, & \Psi_d &= \frac{1}{\omega} (\sqrt{2} E_0 + X_d i_d). \end{aligned}$$

Uvrštenjem ovih vrijednosti u izvedeni opći izraz za moment dobiva se:

$$M = 3 \frac{p}{\omega} \left[\frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta + \frac{1}{2} U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2 \delta \right].$$

Kako je faktor ω/p mehanička sinhrona kutna brzina rotora, aktivna snaga stroja (snaga koja odgovara momentu u zračnom rasporu) bit će

$$P_r = 3 \left[\frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta + \frac{1}{2} U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2 \delta \right].$$

Sinhroni stroj u pogonu

Sinhroni stroj može raditi u različitim pogonskim prilikama. Dva su krajnja stanja pri tome: rad sinhronog generatora na vlastitu mrežu i rad sinhronog stroja na krutu mrežu.

Sinhroni generator pri radu na vlastitu mrežu u mreži je jedini izvor struje. Tada napon mreže ovisi samo o uzbudi tog generatora, a frekvencija o brzini vrtnje njegova pogonskog stroja. Čim se pod nekim određenim opterećenjem promijeni uzbuda (napon E_0), mijenja se i magnetski tok u zračnom rasporu, a zbog toga i napon U na stezaljkama generatora. Tada su uzbuda, tok u zračnom rasporu i napon stezaljki jedna o drugoj ovisne veličine. U stroju djeluje samo jedno nezavisno protjecanje, ono koje pripada uzbudnom namotu.

Sinhroni električni stroj pri radu na krutu mrežu (u kojoj vlada stalni napon) ima napon stezaljki koji je po iznosu, faznom položaju i frekvenciji nepromjenljiv i određen sistemom na koji je stroj priključen. Da bi se sinhroni stroj priključio na takvu mrežu, prethodno se mora provesti poseban postupak, tzv. *sinhronizacija*. Prije uklapanja treba, naime, postići da frekvencija stroja bude jednaka frekvenciji mreže, napon stroja jednak naponu mreže i redoslijed faza stroja jednak redoslijedu faza mreže.

Uklapanje treba izvesti u trenutku kad je fazni pomak između istoimenih napona stroja i mreže sveden na najmanju moguću mjeru.

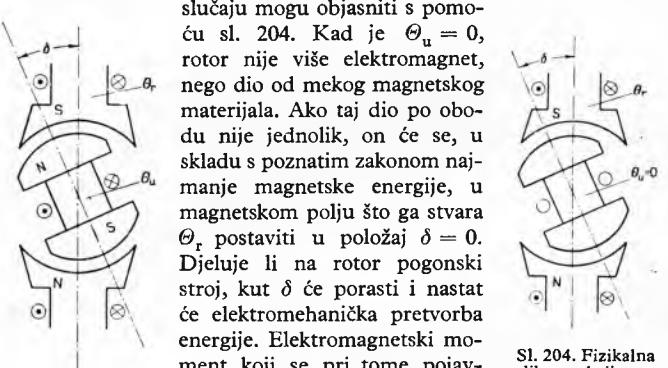
Iz mreže narinuti napon stezaljki U određuje tok u zračnom rasporu, koji se pod različitim opterećenjima mijenja samo u vrlo uskim granicama (samo zbog otpora i rasipanja namota armature), ma kako se mijenjala uzbudna struja. U stroju tada djeluju dva među sobom neovisna protjecanja (uz zanemarenje otpora i rasipanja namota armature), rezultirajuće protjecanje i protjecanje uzbudnog namota. Rezultirajuće protjecanje Θ_r mora stvoriti u zračnom rasporu upravo toliki tok Φ_r da se u armaturnom namotu inducira napon E koji je u ravnoteži s naponom stezaljki U . Protjecanje uzbudnog namota Θ_u može se po volji mijenjati po iznosu i položaju prema rezultirajućem protjecanju Θ_r .

Protjecanje uzbudnog namota Θ_u može se mijenjati s pomoću napona narinutog na uzbudni namot. Fazni položaj prema rezultirajućem protjecanju može se mijenjati dje-lovanjem pogonskog stroja, koji može kao fizički nosilac protjecanja Θ_u pomaknuti rotor u određeni položaj. Na sl. 202 prikazane su mogućnosti promjene protjecanja.

Sinhroni stroj koji je priključen na krutu mrežu može se predoći kao sistem od dva neovisno uzbudena elektromagneta Θ_r i Θ_u (sl. 203). Oba se magneta vrte jednakom, sinhronom brzinom. Kad na rotor ne bi djelovao nikakav zakretni moment, kut opterećenja δ bio bi nula. Djeluje li pogonski stroj na osovinu generatora nekim momentom, npr. u smjeru vrtnje, rotor će se pomaknuti za kut δ , pa između oba elektromagneta nastaje elektromagnetski (sinhroni) moment koji djeluje nasuprot momentu pogonskog stroja. U ustaljenom su stanju ova dva momenta u ravnoteži, pa se magneti i dalje vrte jednakom, sinhronom brzinom. Iz sl. 203 očito je da će se najveći elektromagnetski moment razviti kad je kut $\delta = 90^\circ$, što odgovara prvom članu izraza

$$M = 3 \frac{p}{\omega} \left[\frac{E_0 U}{X_d} \sin \delta + \frac{1}{2} U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2 \delta \right].$$

Tu komponentu sinhronog momenta izaziva uzbudna struja. U stroju s istaknutim polovima elektromagnetski moment se javlja i u posebnom slučaju kad nema uzbude ($E_0 = 0$). Prilikom se u tom



Sl. 204. Fizikalna slika reakcionog momenta

Sl. 203. Fizikalna slika momenta u sljed uzbudne struje

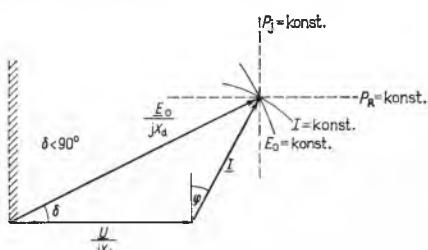
Najveći iznos reakcionog momenta nastaje kad je kut $\delta = 45^\circ$, što se vidi i u malo prije navedenoj jednadžbi za moment ($\sin 2 \cdot 45^\circ = 1$). Iz te je jednadžbe također očito da stroj s potpuno okruglim rotorom ($X_d = X_q$) nema reakcijski momenta, što je i fizikalno jasno iz sl. 204.

Elektromagnetski moment M i aktivna snaga stroja P_r prikazani su u ovisnosti o kutu opterećenja δ na sl. 205. U ustaljenom su radu snaga i moment jedno drugome razmjerni. Ako pogonski

stroj, npr. turbina, razvija snagu P_t , njezin će moment M_t biti uravnovežen s elektromagnetskim momentom M , koji će u takvom radu, generatorskom, djelovati kao protumoment. Elektromagnetskom momentu M pripada radna snaga P_r , a stroj radi s kutom opterećenja δ . Poveća li se moment turbine iznad najvećeg iznosa M_{\max} što ga synchroni stroj može razviti pri određenoj uzbudi, odnosno pri određenom naponu E_0 , nije više moguća jednolika vrtnja rotora, pa prema tome ni ustavljen rad. Stroj tada ispada iz koraka: pri generatorskom radu njegov se rotor sve više ubrzava, a pri motorskom radu usporava. Iz fizikalnog objašnjenja, a i iz matematičkog izraza za moment, očito je da se ispad iz koraka može sprječiti povećanjem elektromagnetskog momenta pogodnom promjenom uzbude, odnosno napona E_0 .

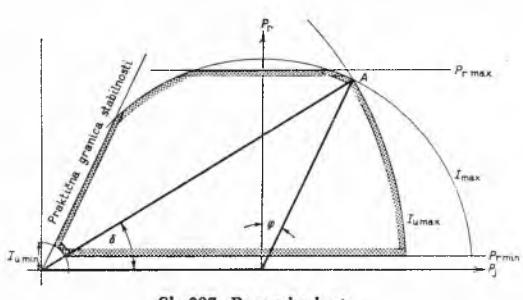
Između rada generatora na vlastitu mrežu i rada stroja na krutu mrežu moguće je još niz različitih pogonskih stanja. Općenito, u nekoj mreži s više izvora napon na stezaljkama synchronog stroja gotovo nikad nije potpuno krut. Mogu se, međutim, naći mesta u mreži u kojima se napon, s gledišta promatranog synchronog stroja, može smatrati krutim.

Pogonska karta. U pogonu synchronog generatora koji radi na mrežu postavljaju se niz ograničenja radi sigurnosti i pogona i samog stroja. Sva se ta ograničenja prikazuju u tzv. pogonskoj karti generadora. Pogonska se karta dobiva iz vektorske slike napona dijeljenjem svih njezinih vektora napona sa jX_d . Na sl. 206 prikazana je konstrukcija pogonske karte na primjeru stroja s okruglim rotorom. Konstrukcija pogonske karte stroja s istaknutim polovima nešto je složenija, ali se temelji na istom postupku.



Sl. 206. Konstrukcija pogonske karte

U nastavku se navode ograničenja koja se postavljaju pri pogonu generatora. Struja armaturnog namota I ne smije biti veća od određenog dozvoljenog iznosa zbog opasnosti od nedopustivog zagrijavanja namota ($I < I_{\max}$). Struja uzbudnog namota I_u ne smije biti veća od određenog dozvoljenog iznosa zbog opasnosti od nedopustivog zagrijavanja namota ($E_0 < E_{0 \max}$). Opterećenje turbine ne smije preći dozvoljeni najveći iznos; zbog toga je ograničena najveća dopuštena aktivna snaga generatora ($P_r < P_{r \max}$). Opterećenje turbine ne smije biti manje od propisanog tehničkog minimuma; zbog toga je ograničena najmanja aktivna snaga ge-

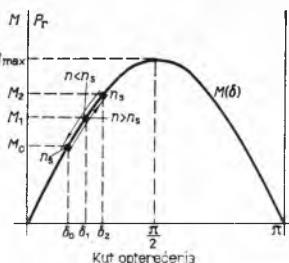


Sl. 207. Pogonska karta

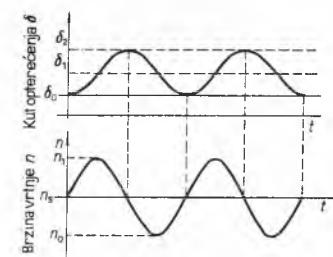
neratora ($P_r > P_{r \min}$). Generator će raditi stabilno jedino ako je kut opterećenja δ manji od 90° (za stroj s okruglim rotorom). Na taj je način određena teoretska granica stabilnosti. Radi veće sigurnosti dozvoljava se, međutim, rad samo do tzv. praktične granice stabilnosti, koja se određuje tako da se do teoretske granice predviđi uvijek rezerva od 10% aktivne snage. Struja uzbude I_u ne smije biti manja od nekog minimalnog iznosa $I_{u \min}$ ($E_0 > E_{0 \min}$). Tom uvjetu redovno udovoljavaju automatski regulatori uzbudne struje. Njima se postiže da se uzbudna struja ne može smanjiti ispod iznosa koji odgovara uzbudnom naponu $E_{0 \min}$, što štiti generator od gubitka stabilnosti.

Djelovanje svih ovih ograničenja prikazano je grafički na pogonskoj karti (sl. 207). Radna tačka A mora uvijek ležati na karti unutar označenog dopuštenog područja rada. U nekim slučajevima, u ovisnosti o karakteristikama generatora i zahtjevima pogona, pojedina od ovih ograničenja ne moraju doći do izražaja.

Elektromehaničke oscilacije synchronog stroja. Synchroni stroj priključen na mrežu ima svojstva titrajnog sistema. Prema sl. 208 stroj pri ustavljenom opterećenju daje aktivnu snagu P_{r0} , moment M_0 i radi s kutom opterećenja δ_0 . Neka u određenom trenutku nastupi promjena momenta pogonskog stroja na iznos M_1 . Rotor zbog tromosti ne može trenutno promijeniti kut opterećenja od δ_0 na δ_1 , nego ispočetka ostaje na kutu δ_0 . Zbog toga nastaje pretičak momenta ($M_1 - M_0$) koji ubrzava rotor. Usljed



Sl. 208. Fizikalna slika elektromehaničkog nijihanja



Sl. 209. Njihanje kuta opterećenja i brzine

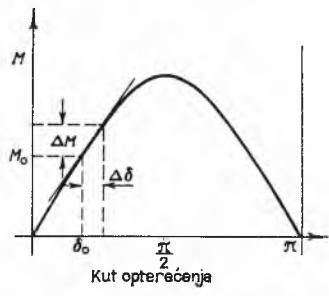
tog ubrzavanja rotor postepeno dosegne kut δ_1 , no njegova je brzina vrtnje tada veća od sinhrone. Zbog tako povećane brzine rotor zauzima kutove veće od δ_1 . U tom je području moment generatora veći od momenta pogonskog stroja, pa pretičak momenta koči rotor. Usljed tog kočenja rotor pri kutu δ_2 opet poprima sinhronu brzinu n_s . Ali tada postoji pretičak momenta ($M_1 - M_1$) koji i dalje usporava rotor, pa njegova brzina postaje manja od sinhrone. Kut opterećenja se smanjuje, tako da rotor u jednom trenutku opet zauzima kut δ_1 , no tada je brzina manja od sinhrone, pa se gibanje nastavlja do kuta δ_0 . Na taj se način rotor nije oko novog ustavljenog stanja (δ_1, M_1). Njihanje kuta opterećenja i brzine vrtnje prikazano je na sl. 209.

Ovakva se nijhanja nazivaju elektromehaničkim oscilacijama synchronog stroja. Ona se mogu razmjerno lako izračunati kad su amplitudne male, te se krivulja $M(\delta)$ može linearizirati oko neke radne tačke (δ_0, M_0) (sl. 210).

$$\Delta M = \left(\frac{dM}{d\delta} \right)_{\delta_0} \cdot \Delta \delta = k_s \Delta \delta,$$

gdje je $k_s = \left(\frac{dM}{d\delta} \right)_{\delta_0}$ sinhronizacioni koeficijent ili koeficijent sinhronizacionog momenta synchronog stroja.

Pri elektromehaničkim oscilacijama rotora synchronog stroja u prigušnom se namotu induciraju naponi, pa u njemu teku struje što stvaraju moment koji se protivi nijhanju. Taj se moment naziva *prigušnim momentom*. Pri malim odstupanjima od sinhronе brzine (malim klizanjima, v. str. 186) prigušni je moment razmjeran klizanju:



Sl. 210. Linearizacija karakteristike momenta

$$M_{pr} = k_D s = k_D \frac{d(\Delta\delta)}{dt},$$

gdje je k_D koeficijent prigušnog momenta.

Kad na osovinu ne djeluje nikakav vanjski izmjenični moment, ona će bilo pri kakvim promjenama slobodno zatitrati, prema jednadžbi

$$\frac{J}{p} \cdot \frac{d^2(\Delta\delta)}{dt^2} + k_D \frac{d(\Delta\delta)}{dt} + k_s \Delta\delta = 0,$$

gdje je J moment tromosti rotora, p broj pari polova i $\Delta\delta$ prirast kuta opterećenja.

Na temelju ove jednadžbe može se postaviti analogija elektromehaničkog titravnog sistema s električnim i mehaničkim titravnim sistemima. Analognе veličine prikazane su u tablici 5.

Tablica 5
ANALOGIJA ELEKTROMEHANIČKIH, ELEKTRIČNIH
I MEHANIČKIH OSCILACIJA

| | Elektromehanički | Električni | Mehanički |
|---------------------------------------|--|--|---|
| Titravni sistem | | | |
| Analogne veličine | prirast kuta opterećenja $\Delta\delta$ moment inercije po paru polova J/p koeficijent prigušenja k_D synchronizacijski koeficijent k_s | naboj q induktivitet L otpor R recipročni kapacitet $1/C$ | pomak x masa m koeficijent prigušenja α konstanta opuge c |
| Vlastita frekvencija (bez prigušenja) | $\frac{1}{2\pi} \sqrt{k_s p}$ | $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L C}}$ | $\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}$ |

Kad na osovinu djeluje izmjenični moment, dolazi do trajnog prisilnog titranja s frekvencijom izmjeničnog momenta. Ako se frekvencija narunutog momenta približi vlastitoj frekvenciji elektromehaničkog sistema, može nastupiti nedopustivo veliko nihanje iznosa kuta opterećenja, stroj ispada iz koraka i pogon je onemogućen. Ovim pitanjima treba posvetiti pažnju pri primjeni dizelskih generatora i motora koji pogone klimne kompresore.

Prigušni kavez sinhronog električnog stroja izvodi se: radi prigušenja inverznih komponenata polja koje nastaju pri nesimetričnim opterećenjima i koje mogu izazvati nepoželjne gubitke i prenapone; radi prigušenja elektromehaničkih oscilacija i da se omogući asinhroni zalet sinhronih motora i kompenzatora.

Prelazne pojave u sinhronim strojevima

Prelazne pojave pokoravaju se dvjema elementarnim zakonima koji glase: a) kinetička energija rotora ne može se skokovito promijeniti i b) magnetska energija akumulirana u stroju ne može se skokovito promijeniti. Ovi se zakoni mogu izraziti i u drugom obliku: a) brzina rotora ne može se skokovito promijeniti i b) magnetski tok ulančen namotima stroja ne može se skokovito promijeniti.

Prelazne pojave nastaju prilikom prelaza iz nekog ustaljenog stanja u novo stanje. One se mogu podjeliti na tri različite vrste. Prva vrsta su pojave u kojima je promjena brzine znatno sporija od promjene ulančenih tokova. Tada se promatra samo mehanička prelazna pojava, u toku koje se elektromagnetske prilike smanjuju.

traju stacionarnim. Na taj se način obično analizira asinhroni zalet sinhronog motora. Druga vrsta su pojave kojima je prvenstveno zanimljiv početak, tj. dio koji se odvija u prvih nekoliko perioda. Tada se brzina može smatrati konstantnom, a promatra se samo prelazna pojava koja nastaje zbog promjene ulančenih tokova. Na taj se način analiziraju prilike udarnih kratkih spojeva, udarnih opterećenja i sl. Treća vrsta su pojave u kojima se mehanička brzina i ulančeni tokovi mijenjaju uporedljivim brzinama pa se ne mogu odvojeno promatrati. To su pojave elektromehaničkih oscilacija, gubitka koraka i sl.

Pravilo o konstantnom ulančenom toku primjenjuje se za promatranje početka prelaznih pojava koje nastaju zbog promjene ulančenih tokova. U zatvorenom strujnom krugu otpora R koji ulančuje tok Ψ bit će (sl. 211):

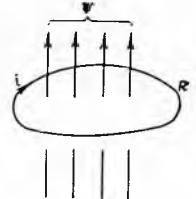
$$\frac{d\Psi}{dt} + iR = 0.$$

U samom početku prelazne pojave može se zbog kratkoće vremena zanemariti energija utrošena u otporu R . Zbog toga će za sam početak vrijediti pravilo konstantnog ulančenog toka:

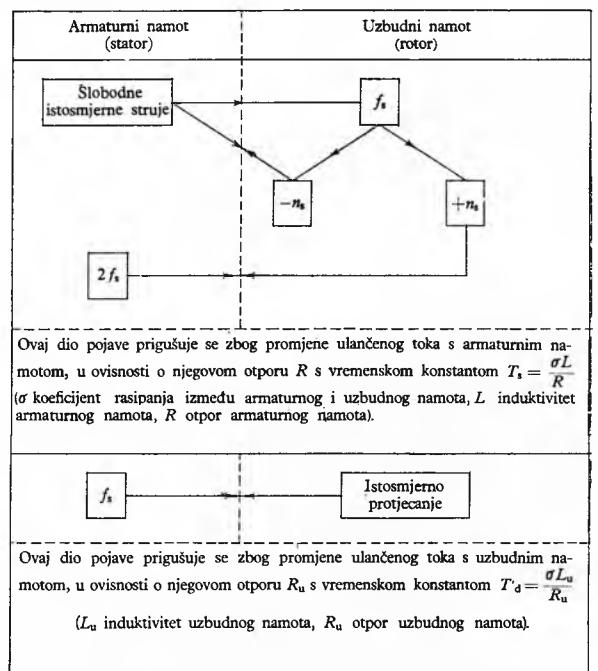
$$\frac{d\Psi}{dt} = 0, \quad \Psi = \text{konst.}$$

Prelazna pojava nastaje zbog određene »smetnje«, tj. namjerne ili slučajne promjene stanja (promjene opterećenja, kratkog spoja i sl.). Ulančeni tok u prvom se trenutku održava konstantnim time što u promatranom namotu poteku komponente struje koje se protive njegovoj promjeni. Takve se komponente struje nazivaju slobodnim ili prelaznim (transientnim) jer za njih ne postoje posebni stalni izvori. Zbog slobodnih struja nastaju u otporima namota gubici koji se podmiruju na račun magnetske energije, putem induciranih napona $d\Psi/dt$. Na taj način dolazi do promjene ulančenog toka koja je to sporija što su gubici manji, dakle što namot ima više bakra, jer je vremenska konstanta u tom slučaju veća.

Fizikalni mehanizam prelazne pojave u sinhronom stroju proučavan je u sl. 212 na primjeru tropolnog udarnog kratkog spoja na stezalkama generatora. Generator je prethodno bio neopterećen i uzbuden na nazivni napon. Uzbudni napon je u toku cijele pojave konstantran. Na jednak se način može protumačiti svaka druga pojava za koju se pretpostavlja da se odvija uz kon-



Sl. 211. Ulančeni tok



Sl. 212. Fizikalno porijeklo i prigušenje komponenata struje kratkog spoja

stantnu brzinu vrtnje stroja. Kad je brzina vrtnje promjenljiva, prelazne su pojave znatno složenije.

Neposredno nakon uspostavljanja tropolnog kratkog spoja na stezaljkama armaturnog namota tok ulančen sa svakom fazom mora ostati konstantan. Taj u odnosu na stator miran tok održavaju slobodne istosmjerne struje u fazama statora. U rotoru taj tok inducira struju frekvencije mreže f_s . Budući da je uzbudni namot jednofazan, ova struja može proizvesti samo pulzirajuće protjecanje, koje se može prikazati dvjema okretnim protjecanjima brzine $(+ n_s)_R$ i $(- n_s)_R$ prema rotoru. Prema statoru brzine su tih okretnih polja $+ 2 n_s$ odn. 0. Nulta brzina okretnog polja sprečava da istosmjerno protjecanje statora naruši početno magnetsko ulančenje rotora, a brzina $+ 2 n_s$ inducira u statoru struje dvostrukе frekvencije $2 f_s$. Istosmjerno protjecanje rotora induciralo bi u statoru znatne trofazne struje (frekvencije f_s) koje bi svojim okretnim protjecanjem promijenile ulančenje rotora kad ne bi dodatna slobodna istosmjerna struja u rotoru uspostavila ravnotežu. Konstantni ulančeni tokovi statora i rotora mogu se zatvarati samo u rasipnim putovima, pa su potrebne znatno veće struje da proizvedu pripadna protjecanja. Pretpostavljeni konstantni magnetski tokovi ipak se troše na održavanje slobodnih struja, pa iščezavaju većom ili manjom brzinom, već prema tome da li su omski otpori na putu slobodnih struja veći ili manji; govori se o manjim ili većim vremenskim konstantama u toku pojedinih faza prelazne pojave. Konačno se uspostavlja trajno stanje ravnoteže, gdje slobodnih struja nema, a struje frekvencije f_s statora (struje trajnog kratkog spoja) drže ravnotežu nametnutom istosmernom protjecanju rotora.

Izloženi odnosi sažeti su na sl. 212. Na toj je slici prikazan i utjecaj otpora namota na prigušenje pojedinih komponenata struja.

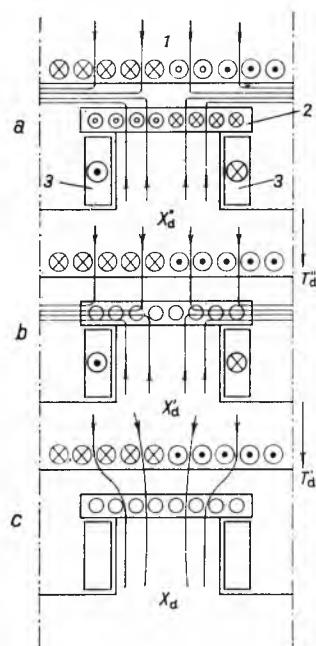
Prigušni kavez na rotoru (v. str. 200) učestvuje u pojavi na isti način: njegove struje nastoje održati konstantan ulančeni tok koji se, međutim, zbog otpora samog namota postepeno prigušuje. Slika magnetskog polja u pojedinim fazama prelazne pojave tropolnog udarnog kratkog spoja prikazana je na sl. 213. Pri tome je pokazano na koji način rotorski strujni krugovi nastoje održati konstantan ulančeni tok i kako se suprotstavljaju protjecanju statora brzine $(n_s)_s$ (prelazna pojava na statoru navedena u gornjem dijelu slike 212 zbog preglednosti je u slici 213 izostavljena).

Sl. 213. Prelazne pojave u rotoru s prigušnim kavezom. 1 Armatura, 2 prigušni namot, 3 uzbudni namot

Protjecanju armature 1 opire se prigušni namot 2 i uzbudni namot se još opire promjeni ulančenog toka. Silnice se zatvaraju kroz polno stopalo, čemu odgovara prolazna (transientna) reaktancija X_d' . Ovakvo stanje prelazi u narednu fazu s vremenskom konstantom T_d''

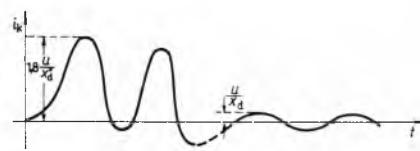
Slobodne su se struje u prigušnom namotu prigušile, no uzbudni namot se još opire promjeni ulančenog toka. Silnice se zatvaraju kroz polno stopalo, čemu odgovara prolazna (transientna) reaktancija X_d . Ovakvo stanje prelazi u ustajeno stanje s vremenskom konstantom T_d'

Uspostavljeno je ustajeno stanje. Nestala je slobodna komponenta struje uzbudnog namota. Silnice većim dijelom prolaze glavnim magnetskim krugom. Ovakvom stanju odgovara sinhrona reaktancija X_d . Potpuna slika magnetskog polja dobit će se ako se dodaju silnice nastale zbog ustanjenog iznosa uzbudne struje, što zbog preglednosti na slici nije označeno



Slična se slika može nacrtati i za poprečnu os, pa se dobije početna reaktancija X_q'' i sinhrona reaktancija X_q .

Najveći mogući iznos udarne struje kratkog spoja i_k približno je, u relativnim vrijednostima, $i_k'' = 1,8 u/x_d''$ (faktor 1,8 uzima u obzir istosmjernu komponentu, sl. 214). Trajna je struja kratkog spoja, u relativnim vrijednostima, $i_k = u/x_d$.



Sl. 214. Udarna i trajna struja kratkog spoja

Iznosi najvažnijih reaktancija (u relativnim vrijednostima) i vremenskih konstanti (u sekundama) navedeni su u tablici 6.

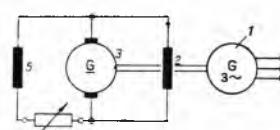
Tablica 6
NAJVAŽNIJE REAKTANCije I VREMENSKE KONSTANTE

| Vrsta stroja | Okrugli rotor (dvopolni) | Istaknuti polovi do $p = 8$ | Istaknuti polovi $p > 8$ |
|--------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| X_d | 1,4 … 2,6 | 0,8 … 1,4 | 0,75 … 1,25 |
| X_q | 1,3 … 2,3 | 0,52 … 0,90 | 0,45 … 0,80 |
| X_d' | 0,16 … 0,21 | 0,22 … 0,35 | 0,24 … 0,40 |
| X_d'' | 0,10 … 0,15 | 0,14 … 0,23 | 0,15 … 0,25 |
| X_q'' | 0,10 … 0,15 | 0,14 … 0,26 | 0,16 … 0,28 |
| T_d' | 0,6 … 2,0 | 0,5 … 2,5 | 0,55 … 2,5 |
| T_d'' | 0,05 … 0,10 | 0,02 … 0,08 | 0,02 … 0,08 |
| T_d | 0,04 … 0,25 | 0,04 … 0,25 | 0,05 … 0,25 |

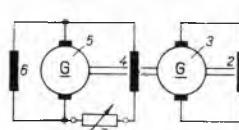
Uzbuda sinhronog stroja

Uzbudni namot sinhronog stroja napaja se iz posebnog izvora istosmjerne struje, tzv. uzbudnog sistema. Uzbudni sistemi dijele se na dvije osnovne skupine: na sisteme u kojima se uzbudni namot glavnog sinhronog stroja napaja iz generatora istosmjerne struje (elektrostrojni sistemi) i na sisteme u kojima se uzbudni namot glavnog sinhronog stroja napaja iz spravljачa (sistemi s ispravljačima).

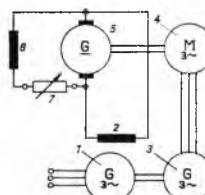
Elektrostrojni sistemi sadrže kao izvor uzbudne struje istosmjerni generator, tzv. uzbudnik, koji može u različnim izvedbama sinhronih generatora biti smješten, pogonjen i upravljan na različite načine. U jednom od postojećih sistema prigraden je uzbudnik na istoj osovini sa sinhronim strojem. U njegovom se uzbudnom krugu vrši regulacija uzbude sinhronog stroja. Ova se izvedba primjenjuje za strojeve do $\sim 5 \text{ MVA}$ (sl. 215). U



Sl. 215. Elektrostrojna uzbuda s uzbudom u poređnom spoju. 1 Sinhroni stroj, 2 uzbudni namot sinhronog stroja, 3 uzbudnik, 4 regulator uzbude, 5 uzbudni namot uzbudnika



Sl. 216. Elektrostrojna uzbuda s glavnim i pomoćnim uzbudnikom. 1 Sinhroni stroj, 2 uzbudni namot sinhronog stroja, 3 glavni uzbudnik, 4 uzbudni namot glavnog uzbudnika, 5 pomoćni uzbudnik, 6 uzbudni namot pomoćnog uzbudnika, 7 regulator uzbude

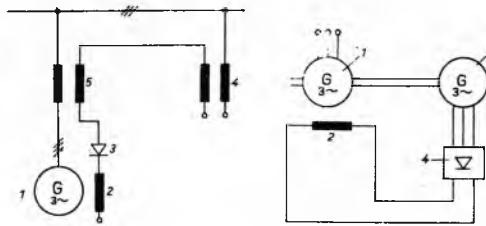


Sl. 217. Elektrostrojna uzbuda s odvojenim uzbudnim agregatom. 1 Sinhroni stroj, 2 uzbudni namot sinhronog stroja, 3 pomoćni sinhroni generator, 4 asinhroni motor, 5 uzbudnik, 6 uzbudni namot uzbudnika, 7 regulator uzbude

drugom sistemu, opet, prigradeni su na istoj osovini sa sinhronim strojem glavni i pomoćni uzbudnik. Regulacija se vrši u uzbudnom krugu glavnog uzbudnika. Ovo se rješenje primjenjuje za velike strojeve, do najvećih snaga (sl. 216). U velikim sporodnjim strojevima upotrebljava se odvojeni agregat s uzbudnicima, pokretan od asinhronog motora. Taj se motor obično napaja iz pomoćnog sinhronog generatora smještenog na osovini glavnog generatora (sl. 217).

Sistemi s ispravljačima sadrže kao izvor uzbudne struje neupravljive i upravljive silicijumske ispravljače. Moguće su dvije osnovne izvedbe: samouzbuđni sistemi, po potrebi s kompaundacijom, i sistemi nezavisne uzbude.

Primjer samouzbuđnog sistema s kompaundacijom prikazan je jednopolno na sl. 218. U samouzbuđnom sistemu s kompaundacijom uzbudna struja dobavlja se ispravljačima od samog napona generatora (transformator 4) i njegove struje opterećenja (transformator 5). S pomoći kompaundacije uzbudna se struja prilagodava opterećenju stroja. Moguće je niz spojeva za samouzbuđu i kompaundaciju. Oni se široko primjenjuju na generatorma do ~ 1000 kVA koji napajaju vlastitu mrežu. Ako se primijene dodatni korekcioni sklopovi, takvi se sistemi mogu upotrijebiti i za generatore najvećih snaga koji rade bilo na kakvu mrežu.



Sl. 218. Samouzbuđni sistem s kompaundacijom. 1 Sinhroni stroj, 2 uzbudni namot sinhronog stroja, 3 ispravljač, 4 naponski transformator, 5 kompaundni transformator

Sl. 219. Nezavisna uzbuda ispravljačima. 1 Sinhroni stroj, 2 uzbudni namot sinhronog stroja, 3 pomoći sinhroni generator, 4 ispravljač

Primjer nezavisnog uzbudnog sistema s ispravljačima prikazan je na sl. 219. Takvi se sistemi primjenjuju na strojevima velikih snaga, a ispravljači su redovno upravljivi.

Glavne dimenzije sinhronog stroja

Nazivna snaga stroja određena je izrazom $P = m U_f I_f$, gdje je m broj faza, U_f nazivni fazni napon i I_f nazivna fazna struja. Ova snaga mjerodavna je za dimenzioniranje stroja.

Aktivnu snagu ($P_r = m U_f I_f \cos \varphi$) određuje pogonski stroj, a nazivna se snaga sinhronog stroja odabira prema potrebi mreže za jalovom snagom. Izborom malog faktora snage povećava se nazivna snaga stroja, pa mu rastu veličina i cijena.

Napon induciran u jednom vodiču iznosi:

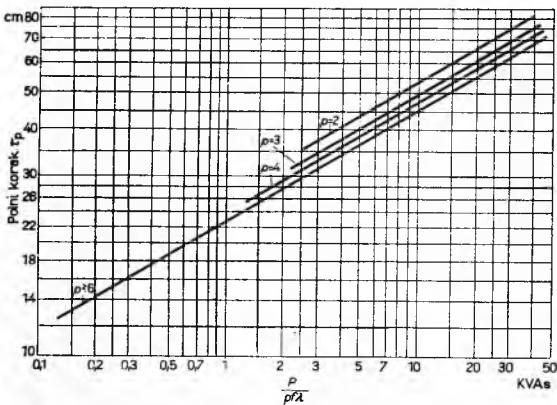
$$e_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} B_1 L v = \frac{1}{\sqrt{2}} \pi D L B_1 n = k D L B_1 n,$$

gdje je B_1 amplituda osnovnog harmonika indukcije u zračnom rasporu, L idealna duljina stroja, v obodna brzina svedena na promjer prvrtka armature i n brzina vrtnje rotora.

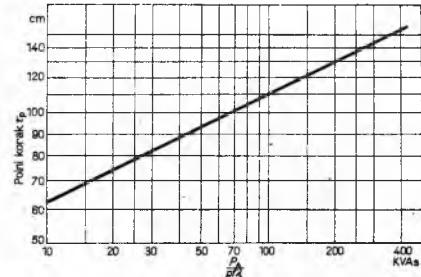
Uz z_1 vodiča po fazi spojenih u seriju i faktor namota f_n , napon jedne faze u praznom hodu iznosi:

$$U_f = f_n z_1 e_1 = k D L f_n z_1 B_1 n.$$

Struja armature može se izraziti s pomoći strujnog obloga A (jakosti struje po jedinici duljine):



Sl. 220. Izbor polnog koraka hidrogeneratora



Sl. 221. Izbor polnog koraka turbogeneratora

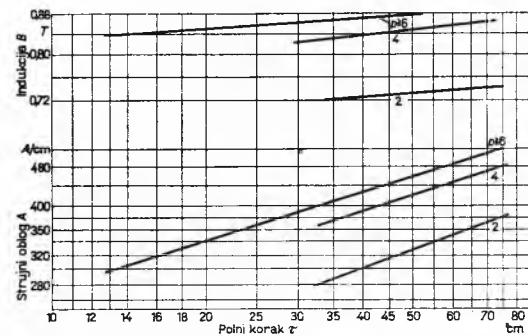
$$A = \frac{m z_1 I_f}{D \pi}.$$

Uvrštenjem izraza za U_f i A u jednadžbu nazivne snage dobiva se

$$P = C D^2 L n,$$

gdje je $C = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} f_n A B_1$ koeficijent, dimenzije energija po jedinici

vremena, zvan *cifra iskorištenja*; on je poznat i pod nazivom Essova konstanta. Njegova vrijednost ovisi o obodnoj brzini i broju pari polova. Uz veću brzinu vrtnje stroja njegovo hlađenje postaje bolje, pa se mogu odabrati veća specifična opterećenja. Kad je broj pari polova veći, veći je i prostor za smještaj uzbudnog namota (ovaj utjecaj nestaje kad je $p > 6$). Cifra iskorištenja C ovisi i o odabranom faktoru snage $\cos \varphi$. Smanjenjem faktora snage smanjuje se cifra iskorištenja.



Sl. 222. Izbor strujnog obloga i indukcije hidrogeneratora

Prema sastavu cifre iskorištenja C i sl. 222 i 223 bilo bi ekonomično konstruirati stroj sa što većim promjerom. To vrijedi samo ako se promatraju aktivni dijelovi stroja, tj. namot unutar utora statorskog paketa, uzbudni namot i magnetski krug. Promatra li se omjer duljine vodiča u utoru prema duljinama vodiča u glavama namota, vidi se da se on naglo smanjuje s porastom polnog koraka. Duljina vodiča u glavi namota razmjerna je polnom koraku, a duljina vodiča u utoru smanjuje se s kvadratom povećanja polnog koraka (uz konstantnu cifru iskorištenja). Očito je da će zbog toga pri većem polnom koraku biti utrošak bakra veći. Također postaju veći i konstruktivni dijelovi stroja (kućište, štitovi, nosači, rotorska zvjezdica, jaram itd.). Obrnuto, ako se smanjuje promjer, uvjeti hlađenja se pogoršavaju. Prema iskustvenim podacima optimalno rješenje postiže se uz odnos $\lambda = L/\tau = (0.3 \dots 0.5) \sqrt{p}$.

Tablica 7
NAJVEĆE OBODNE BRZINE SINHRONIH STROJEVA

| Vrsta stroja | Obodna brzina m/s |
|---|-------------------|
| Turbogenerator | 180 ... 225 |
| Generator s istaknutim polovima i kovanim rotorom | 150 ... 170 |
| Generator s istaknutim polovima i lameliranim rotorom | 120 ... 145 |

Izraze li se u jednadžbi za snagu (str. 208) D i L s pomoću τ_p , p , λ i f , dobiva se izraz $P/p f \lambda = k_2 C \tau_p^3$. Uvrsti li se u taj izraz ovisnost $C = f(p, \tau)$, dobiva se polni korak τ_p , a time i promjer prvrta statora, kao funkcija od $P/p f \lambda$. Ta je ovisnost prikazana na sl. 220 za hidrogeneratore a na sl. 221 za turbogeneratore.

Sva iznjeta razmatranja vrijede kad nema ograničenja promjera rotora zbog mehaničkih naprezanja i zahtjeva za određenom zamašnom masom. Najveća dozvoljena mehanička naprezanja u rotoru, koja nastaju pri brzini pobjega, određuju najveći mogući promjer. Ako je zbog tog razloga promjer ograničen, stroj se mora graditi u duljinu, a promjer treba odabrat na osnovi najveće obodne brzine u tablici 7. Duljina L se u tom slučaju može odrediti s pomoću cifre iskorištenja C , prema jednadžbi $P = C D^2 L n$.

Treba li u rotor stroja ugraditi zamašnu masu koja je veća od prirodne, tj. one koja proizlazi iz elektromagnetskog dimenzioniranja stroja, mora se stroj graditi s većim promjerom i manjom duljinom. Za grubu procjenu zamašnog momenta iz poznatih glavnih dimenzija može poslužiti približna brojčana formula $m D^2 = (2\cdots 2,8) D^4 L$ (u tm^2 za D i L u m), odnosno formula

$$m D^2 = (2\cdots 2,8) \frac{P}{C n} D^2 \quad (\text{u } \text{tm}^2 \text{ za } P \text{ u } \text{kVA}, n \text{ u } \text{min}^{-1}, D \text{ u m}).$$

Manje vrijednosti cifre iskorištenja C treba primijeniti za sporohodne, a veće vrijednosti za brzohodne strojeve.

Cifra iskorištenja C ovisi o umnošku strujnog obloga A i indukcije u zračnom rasporu B . Strjni oblog je ograničen mogućnostima hlađenja stroja, a indukcija zasićenjem željeza. Na sl. 222 i 233 prikazana je ovisnost strujnog obloga A i indukcije B o polnom koraku τ_p za hidrogeneratore i turbogeneratore.

Uz osnovne podatke stroja obično se propisuje i sinhrona reaktancija zbog toga što ona utječe na stabilnost rada stroja.

Sinhrona reaktancija ovisi o zračnom rasporu između statora i rotora. Što je veći raspor to je potrebna veća uzbuda da bi se određeni tok proveo kroz magnetski krug. Sinhrona reaktancija stroja s porastom rasporna postaje manja, ali dimenzije stroja rastu. Veličina zračnog raspora δ u ovisnosti o sinhronoj reaktanciji X_d može se približno odrediti iz brojčane formule:

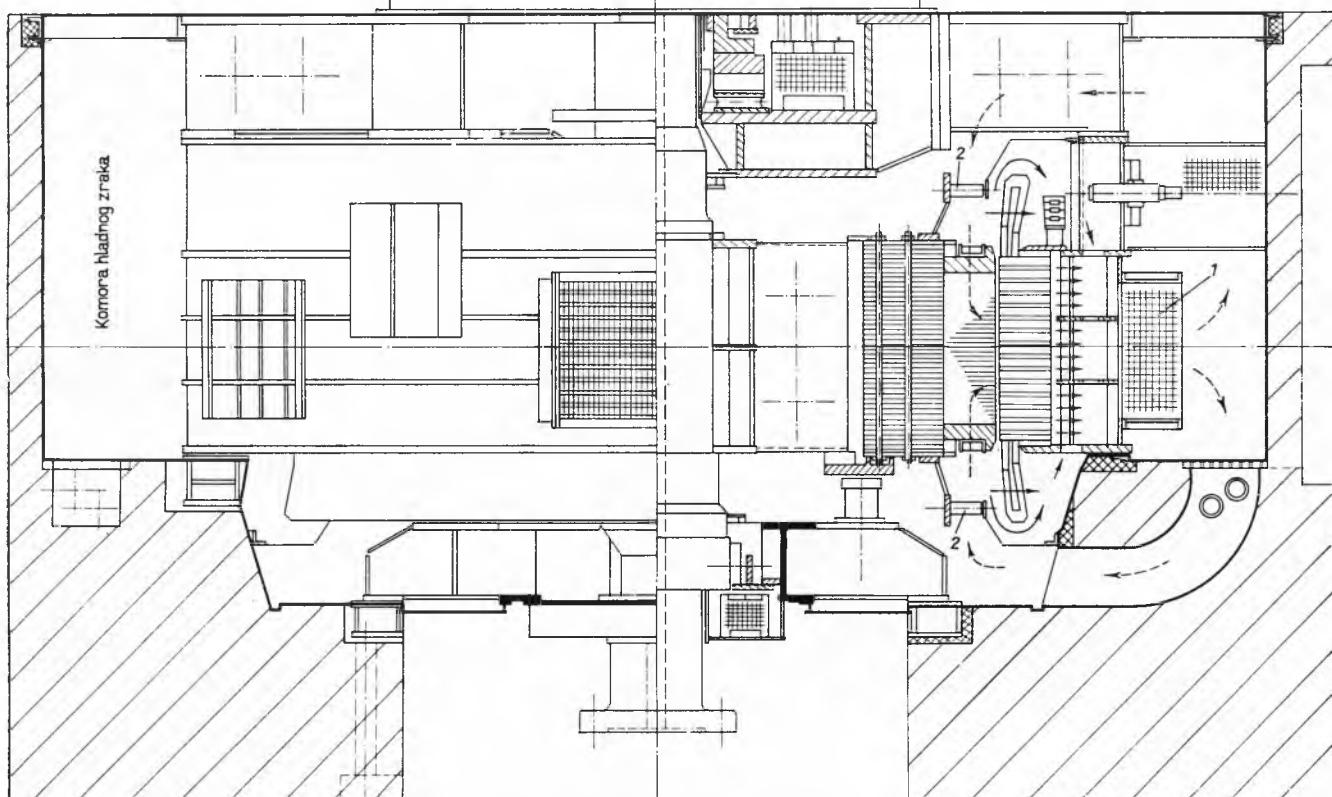
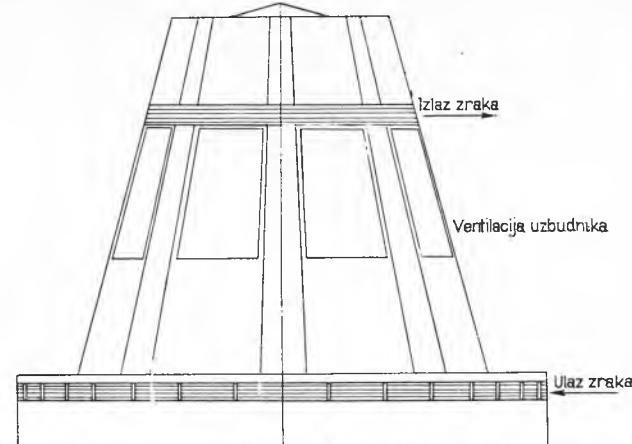
$$\delta = 0,5 \frac{A \tau_p}{B x_d} \cdot 10^{-8}$$

(δ u m za A u A/m , B u T , τ_p u cm, x_d u relativnim vrijednostima).

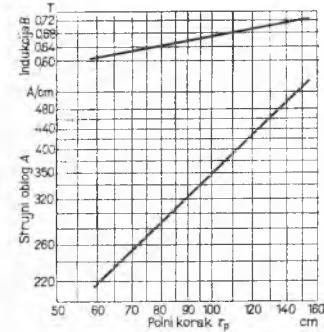
Sl. 223. Izbor strujnog obloga i indukcije turbogeneratora

Ventilacija i hlađenje sinhronih strojeva

Sinhroni strojevi s istaknutim polovima svih snaga i strojevi s okruglim rotorom malih i srednjih snaga pretežno se hlađe zrakom. Mali su strojevi obično otvoreni, te se rashladni zrak uzima iz strojarnice i opet u nju vraća. U strojevima većih snaga krug je rashladnog zraka obično zatvoren. Zrak koji se u stroju ugrijao, indirektno se hlađi vodom u hladnjacima i zatim ponovo uvodi u stroj. Snagu potrebnu za cirkulaciju zraka daju ventilatori ugrađeni na rotoru, a hladnjaci su montirani na kućištu ili unutar opale stroja (sl. 224). Takav način hlađenja sprečava prodiranje

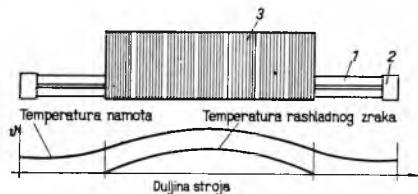


Sl. 224. Rashladni krug hidrogeneratora. 1 Hladnjak, 2 ventilator



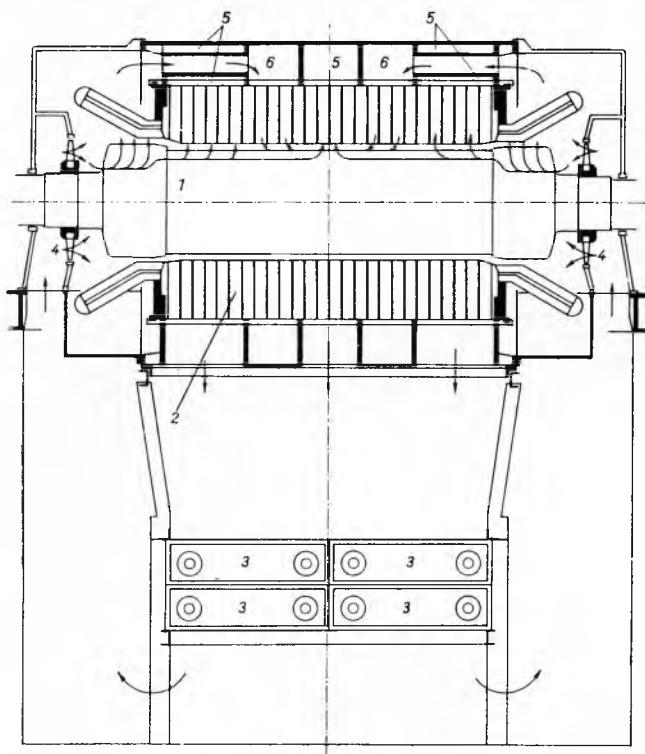
nečistoće u stroj, a omogućuje jednostavnu ugradnju uređaja za gašenje požara (ugljičnim dioksidom i dr.).

U strojevima s istaknutim polovima struja rashladnog zraka prolazi najprije između polova gdje hlađi polni namot, zatim skreće u stator i prolazi kroz rashladne kanale statora, gdje hlađi paket i namot statora. Ugrijani se zrak zatim hlađi u hladnjacima i vraća u stroj. Glave namota hlađi paralelna struja zraka koja se odvaja iz ventilatora i spaja s drugom strujom ispred hladnjaka (sl. 224). Na svom dugom putu kroz stroj rashladni se zrak zagrijava, pa će očito temperatura u sredini stroja biti viša nego na krajevima (sl. 225). Stoga se u turbogeneratorima, gdje je



Sl. 225. Raspodjela temperature u namotu.
1 namot, 2 glava namota, 3 statorski paket

duljina rotora razmjerno velika prema njegovu promjeru, primjenjuje tzv. sekciono hlađenje, što omogućuje dovođenje sveže zrake u sredinu rotora. Kućište statora podijeljeno je u nekoliko sekcija; jedan dio ovih služi za dovod hladnog, a drugi dio za odvod ugrijanog zraka. Na sl. 226 prikazan je takav rashladni sistem



Sl. 226. Rashladni krug turbogeneratora. 1 Rotor, 2 statorski paket, 3 hladnjaci, 4 ventilator, 5 sekcija toplog zraka, 6 sekcija hladnog zraka

s pet sekcija. Jedna struja zraka ulazi u zračni raspornik i prolazi kroz prvu sekciju statora. Druga struja oplakuje glave namota, odатle kroz cijevi ulazi u drugu sekciju, prolazi kroz statorski paket prema rotoru, skreće u akcionalnom smjeru na obje strane i izlazi dijelom kroz prvu a dijelom kroz srednju sekciju. Obje se struje sastaju pred hladnjakom, prolaze kroz nj i vraćaju se u stroj.

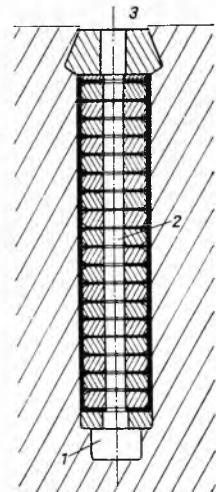
Rotor turbogeneratora može se hlađiti ili isključivo preko vanjske površine, koja može biti povećana kanalima ili rupama u zubovima rotora, ili s pomoću još jedne struje zraka koja se dovodi kroz poseban kanal 1 ispod utora i koja prolazi kroz rupe

u rotorskem namotu i odatle izlazi u zračni raspornik 3 (sl. 227).

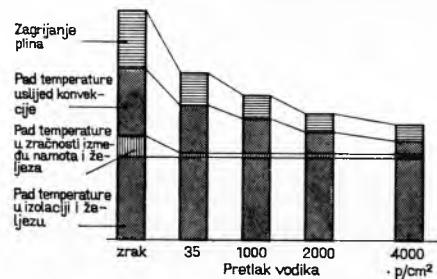
U turbogeneratorima promjer je rotora ograničen mehaničkim naprezanjima. Pri brzini 3000 o/min i brzini vitlanja 3600 o/min najveći mogući promjer je ~ 1150 mm. Zbog toga je prostor za smještaj uzbudnog namota ograničen i određen. Dozvoljenim zagrijavanjem uzbudnog namota određena je ukupna uzbudba, a time i snaga stroja na jedinicu duljine. Duljina je stroja ograničena i iz mehaničkih razloga: zbog kritičnih brzina vrtanja i mogućnosti balansiranja. Jedino je sredstvo za povećanje snage uvođenje efikasnijih sistema hlađenja.

U tablici 8 uspoređena su neka svojstva zraka i vodika. Ako se zamjeni zrak vodikom, smanjuju se (kako se može razabrati iz tablice) gubici uslijed trenja i ventilacije (u omjeru specifičnih masa), a hlađenje je bolje zbog većeg koeficijenta prelaza topline i veće toplinske vodljivosti vodika.

Na sl. 228 prikazano je kako se mijenja zagrijavanje rotorskog namota turbogeneratora kojim protječe konstantna struja, a hlađen je vodikom pod različitim tlakovima. Mala gustoća vodika omogućuje, nadalje, prolaz kroz vrlo uske kanale, što je dovelo



Sl. 227. Hlađenje uzbudnog namota zrakom koji struji kroz utore turbogeneratora. 1 Kanal za zrak ispod utora, 2 rupe u rotorskem namotu, 3 zračni raspornik

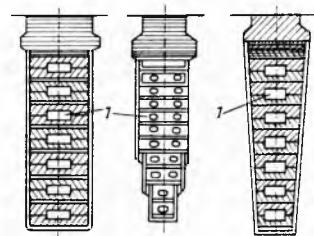


Sl. 228. Usporedba djelovanja zraka i vodika kao sredstva za hlađenje

Tablica 8
USPOREDBA SVOJSTAVA ZRAKA I VODIKA

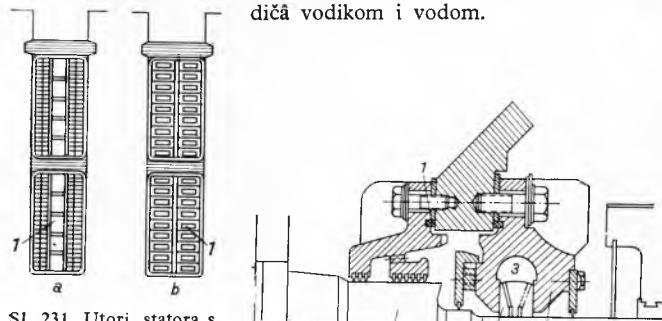
| Svojstvo | Jedinice | Zrak | Vodik |
|--|-------------------|--------|---------|
| Specifična masa na 0 °C i pod 1 at | kg/m³ | 1,2928 | 0,08987 |
| Koeficijent toplinske vodljivosti na 20 °C | kcal m⁻¹ h⁻¹ °C⁻¹ | 0,0219 | 0,160 |
| Specifična toplina na 0 °C i pod 1 at | kcal m⁻³ °C⁻¹ | 0,31 | 0,307 |
| Omjer koeficijenata prelaza topline | | 1,0 | 1,5 |

do tzv. direktnog hlađenja vodiča. Pri takvom se hlađenju rashladni plin dovodi u direktni kontakt s bakrom, dakle s izvorom topline. Na ovo rješenje upućuje i sl. 228, koja pokazuje da pri hlađenju vodikom pod višim tlakom daleko najveći pad temperature nastaje na toplinskem otporu izolacije i željeza. Direktnim hlađenjem taj je otpor izbjegnut i hlađenje je višestruko djelotvornije. Na sl. 229 prikazano je nekoliko rotorskih utora s direktnim hlađenjem vodiča. Sl. 230 prikazuje strujnu opteretljivost uzbudnog namota u ovisnosti o tlaku vodika i vrsti hlađenja.



Sl. 229. Oblici rotorskih utora s direktnim hlađenjem vodiča. 1 Kanal za prolaz rashladnog plina

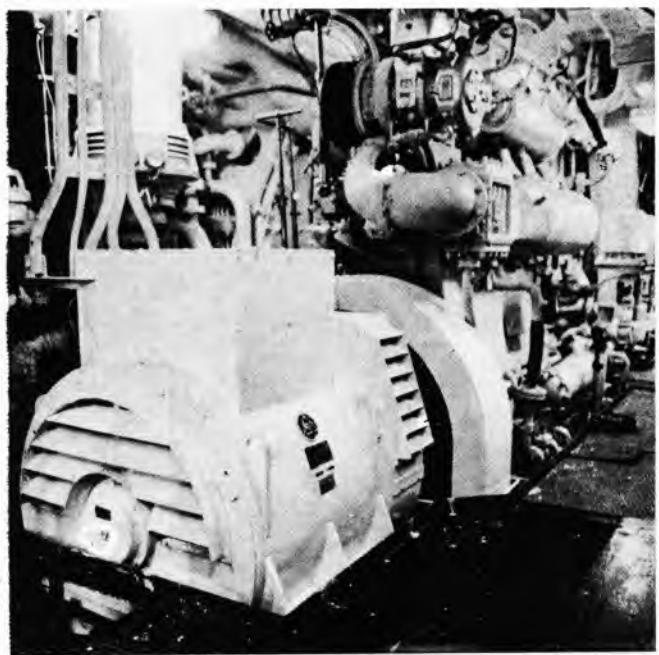
Dalje poboljšanje hlađenja postiže se uvođenjem hlađenja tekućinom (najčešće omeša- nom vodom). Danas se već gradi najveće jedinice (oko 1000 MW) s vodenim hlađenjem vodiča rotora. Izvedba takvih ras- hladnih sistema povezana je s velikim tehnološkim teškoćama, pa se oni primjenjuju samo za najveće jedinice. Uvođenjem direktnog hlađenja vodiča rotora turbogeneratora vodikom naglo je porasla jedinična snaga, pa je nastao problem hlađenja statora. U statoru je onda također uvedeno direktno hlađenje vodiča, i to vodikom ili vodom. Na sl. 231 prikazani su utori statora s direktnim hlađenjem vodiča vodikom i vodom.



Sl. 231. Utori statora s direktnim hlađenjem. a) Hlađenje vodikom; b) hlađenje vodom; 1 kanali za prolaz rashladnog međia

Sl. 232. Brtva na osovini vodikom hlađenog turbogeneratorsa. 1 Gumeni prsten, 2 brtveni prsten, 3 brtveno ulje, 4 kućište brtve, 5 osovina

Hlađenje turbogeneratora vodikom bitno utječe na izvedbu stroja. Mješavina zraka i vodika eksplozivna je između 5 i 75% (volumnih) vodika u zraku, pa kućište mora biti nepropusno za vodik, a na izlazu osovine iz kućišta treba ugraditi posebnu brtvu (sl. 232). Da bi se izbjegla opasnost od eksplozije, plin se u generatoru održava na $\sim 98\%$ čistoće vodika, no usprkos tome kućište treba graditi tako da izdrži 10 at pretlaka, kako bi se izbjegle štetne posljedice eventualne eksplozije.

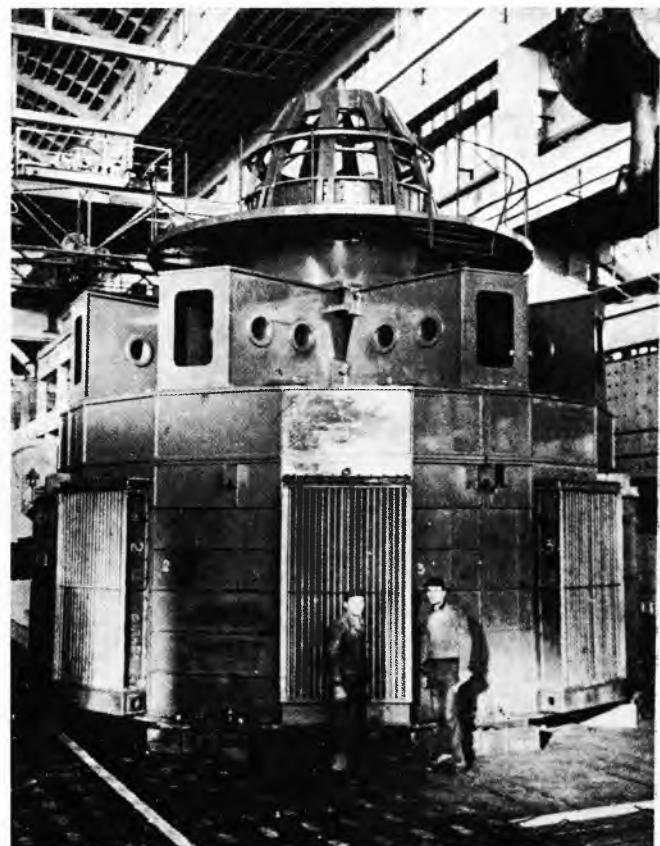


Sl. 233. Brodski sinroni dizelski generator (»Rade Končar«)

U novije vrijeme i hidrogeneratori pokazuju znatan porast snage u jednoj jedinici (500 MW i više), pa se i u njima prelazi na hlađenje vodom, i to statorskog ili statorskog i rotorskog na- mota.

Oblici sinhronih električnih strojeva

Primjena je sinhronih električnih strojeva veoma raširena, a njihova snaga i brzina vrtnje kreću se unutar širokih granica. Pogonski strojevi generatora mogu biti dizelski motori, vodne turbine, parne turbine i plinske turbine, a svaka od tih vrsta pogona drukčije utječe na konstrukciju generatora. (Vidi članak Elektrane,

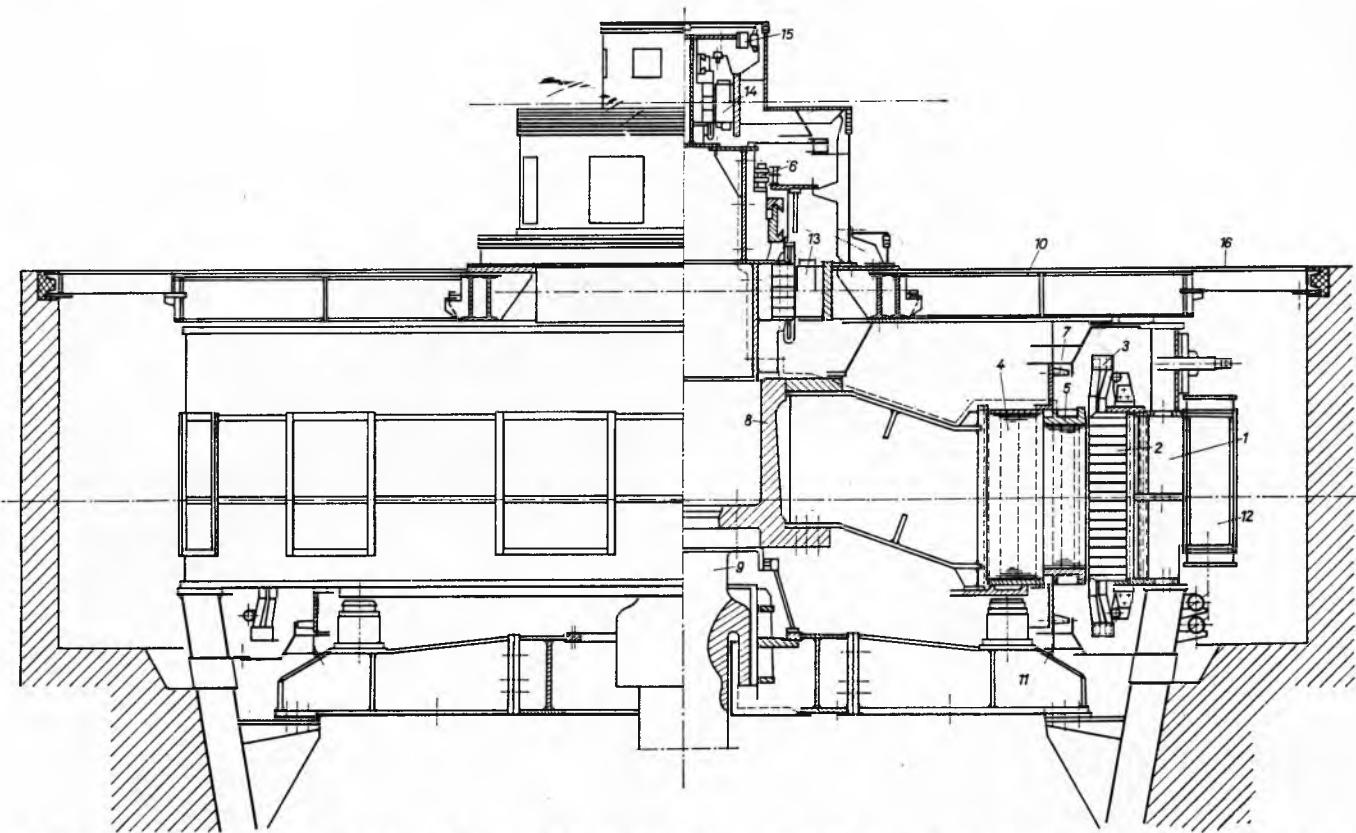


Sl. 234. Vertikalni hidrogenerator za vrijeme montaže u tvornici »Rade Končar«

TE 3, str. 547.) Dizelski motori imaju na osovini nejednolik moment, ovisan o broju cilindara i vrsti procesa (dvotaktni i četverotaktni). Prirodne zamašne mase generatora u takvom



Sl. 235. Hidrogenerator s vertikalnom osovinom

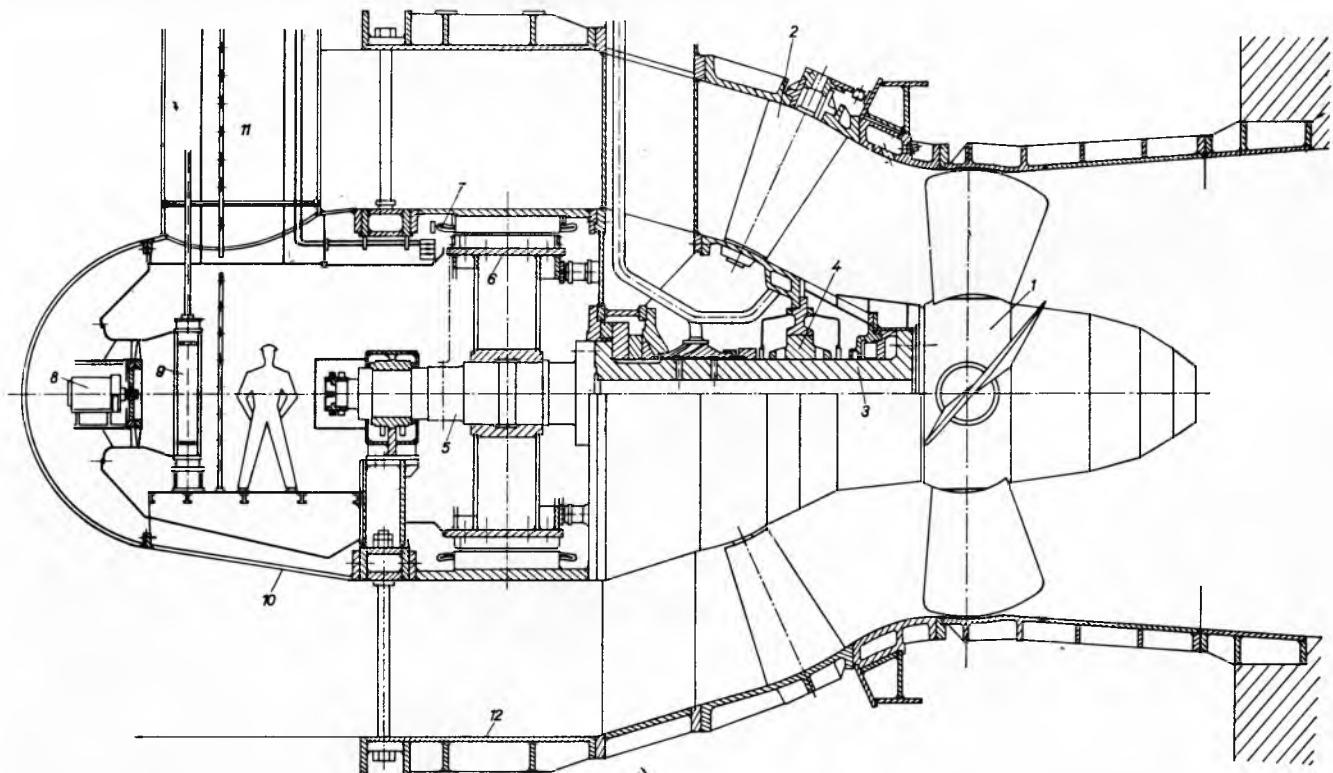


Sl. 236. Presjek sporohodnog vertikalnog sinhronog generatora. 1 Kućište statora, 2 statorski paket, 3 statorski namot, 4 lančni rotor, 5 pol s namotom, 6 klizni koluti, 7 ventilator, 8 glavina rotora, 9 osovina turbine, 10 gornji nosač, 11 donji nosač, 12 hladnjak, 13 glavni uzbudnik, 14 pomoći uzbudnik, 15 regulatorski generator, 16 gornji pokrov

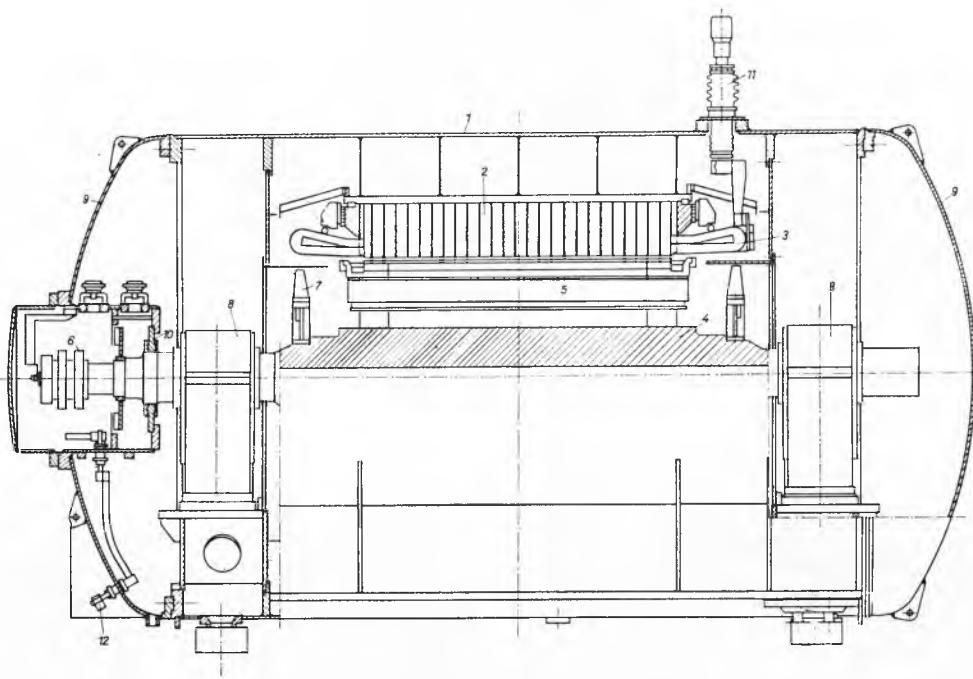
pogonu obično ne zadovoljavaju zahtjeve mirnog rada stroja, pa treba ugraditi zamašnjak ili graditi generator s velikim promjerom. Dizelski generatori rijetko se grade za normalnu opskrbu električnom energijom jer su neekonomični. Primjenjuju se uglavnom samo za podmirivanje vrhova opterećenja, kao agregati

za nuždu, a na brodovima za brodsku elektranu i dizelsku električnu propulziju (sl. 233).

Hidrogeneratori, tjerani vodnim turbinama, pretežno su vertikalni radi ekonomičnije izvedbe hidrauličkog dijela elektrane (sl. 234). Horizontalni hidrogeneratori susreću se uglavnom samo



Sl. 237. Hidrogenerator cijevne izvedbe. 1 Pokretljive lopatice Kaplanove turbine, 2 privodne lopatice, 3 osovina turbine, 4 sklop ležaja, 5 osovina generatora, 6 rotor s uzbudnim namotom, 7 statorski (armatureni) namot, 8 ventilator, 9 hladnjak, 10 oklop, 11 prilazni tunnel, 12 vanjsko kućište



Sl. 238. Sihroni kompenzator hlađen vodikom. 1 Kućište statora, 2 statorski paket, 3 statorski namot, 4 osovina, 5 pol s namotom, 6 klizni kolut, 7 ventilator, 8 ležaji, 9 kapa, 10 brtva prostora kliznih koluta, 11 izvodi, 12 izvodi kliznih koluta

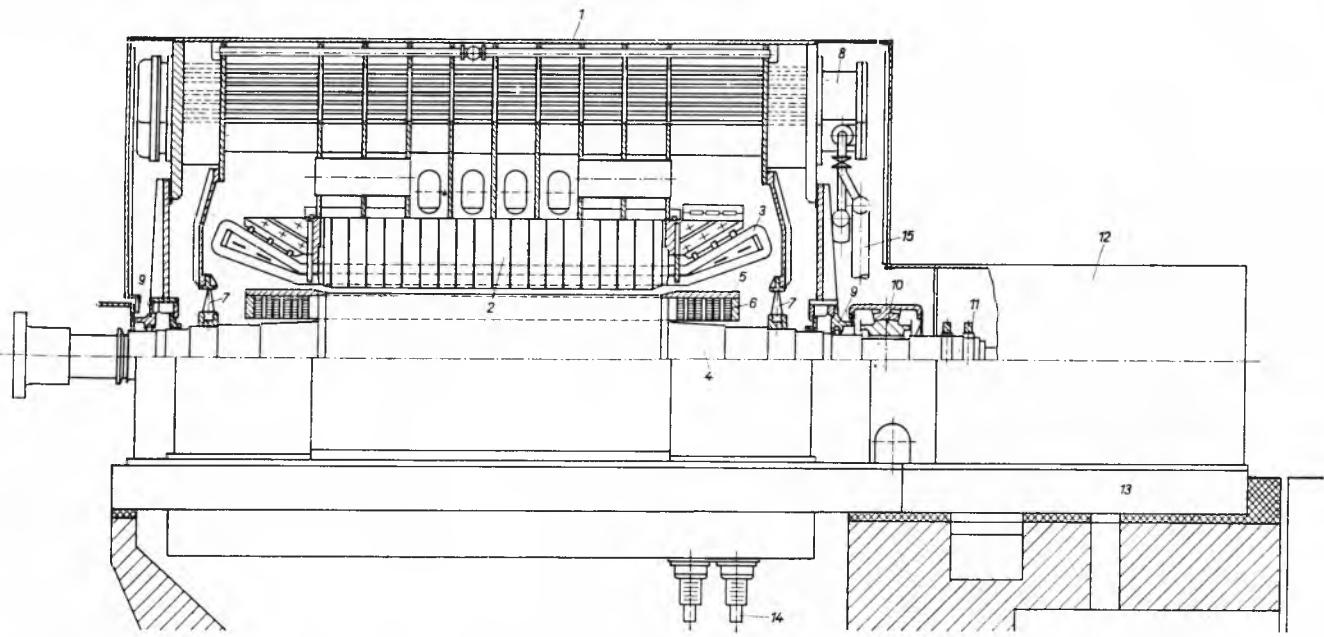
u izvedbi s dvije Peltonove turbine na jednom generatoru i kao generatori manjih snaga. Vertikalni sinhroni strojevi često se grade u izvedbi s pumpom i turbinom, pri čemu sinhroni stroj jedno vrijeme radi kao motor, a drugo vrijeme kao generator. Pumpa i turbina izvode se ili kao dva odvojena stroja na istoj osovini ili postoji samo turbina koja može pri promjeni smjera vrtnje raditi i kao pumpa. Strojevi različitih brzina vrtnje razlikuju se i u osnovnoj koncepciji agregata (sloga generator-turbina). Brzohodni vertikalni generatori pretežno se grade s kombiniranim nosivim i vodivim ležajem iznad generatora i jednim vodivim ležajem ispod generatora, a turbina ima još jedan vodivi ležaj. Sporohodni strojevi grade se tako da na turbinskom dijelu osovine postoje dva vodiva ležaja, a nosivi je ležaj na poklopcu turbine ili u kombinaciji s vodivim ležajem neposredno ispod rotora generatora. Rotor generatora pričvršćuje se direktno na turbinski dio osovine, a iznad njega nema ležaja (gljivasta

izvedba, sl. 236). Između obiju izvedbi moguć je niz kombinacija, sa dva ili tri vodiva ležaja.

Za iskoristenje vrlo malih padova (2–20 m) razvila se u noviye vrijeme tzv. cijevna izvedba hidrogeneratora. U njoj generator i turbina čine cjelinu, a generator je ugrađen unutar čelične kruške ispred turbine, izravno u dovodnoj cijevi vode. Ova izvedba ima znatne prednosti jer su uslijed manje širine agregata manje dimenzije strojarnice, pa je i ukupna cijena elektrane manja (sl. 237).

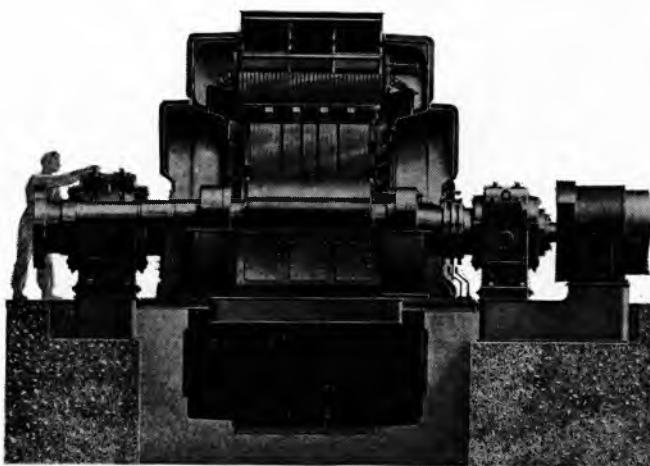
Sinhroni se stroj često upotrebljava i kao izvor jalove snage, tzv. kompenzatori. Kompenzatori manjih snaga hlađe se zrakom, a strojevi većih snaga (iznad 30 MVAr) vodikom. Često se izvode za montažu na slobodnom prostoru (sl. 238).

Turbogeneratori (generatori gonjeni parnim ili plinskim turbinama) redovno su dvopolne izvedbe (3000 o/min ili 3600 o/min za mreže 50 ili 60 Hz). Samo se za manje snage primjenjuju



Sl. 239. Presjek turbogeneratora hlađenog vodikom. 1 Kućište statora, 2 statorski paket, 3 statorski namot, 4 tijelo rotora, 5 rotorska kapa, 6 rotorski namot, 7 ventilator, 8 hladnjak, 9 uljna brtva, 10 ležaj, 11 klizni koluti, 12 uzbudnik, 13 temeljna ploča, 14 izvodi, 15 cjevovod rashladne vode

četvoropolne izvedbe (ispod 4 MW), pri čemu turbina ima znatno veću brzinu i spaja se s generatorom preko reduktora. Turbogeneratori su uvek horizontalne izvedbe, a hlađeni su zrakom do snaga od ~ 40 MVA (sl. 239). Veći strojevi hlađeni su vodom ili vodikom i vodom. Turbogeneratori hlađeni zrakom imaju



Sl. 240. Hidrogenerator s horizontalnom osovinom

obično dva vodiva ležaja montirana na temeljnu ploču, a osovina im je kruto spojena s turbinom. Aksijalno vođenje osovine predviđeno je na turbinskem ležaju. Ležaji turbogeneratorsa hlađenih vodikom obično su ugrađeni u ležajni štit generatora, u kojem se nalazi i vodikova brtva.

B. Frančić Z. Sirotić

MALI ELEKTRIČNI STROJEVI

Granice između velikih, srednjih, malih i sitnih električnih strojeva nisu jedinstveno definirane. Sa stanovišta tehnologije izrade malim se motorima smatraju strojevi počevši od nekoliko desetaka vata snage pa do tridesetak kilovata. Oni se izrađuju obično za priključak na trofaznu, jednofaznu ili istosmjernu mrežu. Uobičajeno je nazivati malim ili vrlo malim strojevima one kojima snaga ne prelazi 1000 W, a sitnima one kojima je snaga reda veličine 1 W ili manje. Proizvodnja malih i sitnih električnih strojeva u naglu je porastu, pa se ocjenjuje da već danas po vrijednosti premašuje 40% ukupne proizvodnje električnih strojeva u svijetu. Ovakvu naglu ekspanziju malih strojeva uzrokovali su prodror elektrotehnike i elektromotornih pogona u domaćinstva, decentralizacija pogona u industriji i povjerenje sve složenijih i finijih zadataka stroju, koji je isprva oslobodao čovjeka samo grubog fizičkog rada. Električni se stroj pojavljuje ne samo kao vršilac rada već i kao element koji prenosi mjerjenja, koordinira, poslužuje komande itd. Veličina izvršenog rada pri tome je neznatna, ali se u tehničkoj praksi pojavljuje niz različitih zahtjeva koji uvjetuju i niz različitih vrsta malih i sitnih električnih strojeva. Već skromnije opremljena kućanstva često raspolazu sa 10–15 elektromotorima, a luksuznije elektrificirana kuća mora imati i preko 100 motora. Treba se samo sjetiti hladnjaka, usisnika prašine, stroja za pranje rublja, kuhinjskih strojeva, mlinca za kavu, miksera, sušila za kosu, električnog sata, gramofona, ventilatora, grijanja, klimatizacije itd.

Mali i sitni strojevi razvili su se od već poznatih većih strojeva: sinhronih, asinhronih i kolektorskih. Jedna od osnovnih razlika između većih i malih strojeva nalazi se u načinu izrade. Za izradu vrlo malih strojeva potrebno je vrlo malo materijala, a redovito se radi i o velikim serijama, tj. o velikom broju jednakih komada. Odatle je jasno da je razvoj tražio modifikacije „klasičnih“ strojeva koje će ih učiniti prikladnima za velikoserijsku proizvodnju, sa što manje ručnog rada. S druge strane, dok je za ocjenu velikih strojeva korisnost, tj. omjer između predane i primljene snage, bitna veličina jer se radi o pretvorbi velikih količina energije, energije što ih daju vrlo mali strojevi, pogotovo ako rade samo povremeno, neznatne su pa veličina gubitaka sa stanovišta ekonomije energijom nije važna. Unatoč tome, konstruktor obično

nastoji da gubici budu što manji jer gubici zagrijavaju stroj, pa se uz manje gubitke može izaći s manjim rashladnim površinama, a to znači i manjim dimenzijama stroja.

O tome koja je vrsta motora prikladna za određene namjene odlučuje vrsta struje i visina napona napajanja, ovisnost brzine vrtnje o momentu opterećenja, veličina poteznog momenta, maksimalna vrijednost momenta, jakost struje pri uklapanju, mogućnost reverziranja i mogućnost regulacije brzine. Nadalje su od značaja također vibracije i šumovi koje stroj stvara u pogonu, zamašna masa (o njoj ovisi brzina kojom se mijenja pogonsko stanje), dimenzije stroja i njegova težina, potrebe dodatnih uređaja i, konačno, cijena stroja zajedno s eventualnim dodatnim uređajima.

U pogledu vrste napajanja, manji dio opisanih malih motora, i to samo onih veće snage, predviđen je za napajanje iz normalne trofazne mreže. Najveći dio malih i sitnih motora napaja se jednofaznom izmjeničnom strujom ili istosmjernom strujom.

Asinhroni mali električni motori

Princip rada ovih motora već je izložen kad je bilo govora o asinhronim strojevima općenito (v. str. 186). Mali motori uvek se izvode s kaveznim (kratkospojnim) rotorom, i to obično s kavezom od tlačno lijevanog aluminijuma. Postoji velika raznolikost načina kojima se dobiva i pri jednofaznom priključku potrebno okretno polje, pa prema tome postoje i mnoge različite vrste vrlo malih i sitnih asinhronih motora. Što je savršenije okretno polje, tj. što je oblik prostorne raspodjele rotirajućeg vala indukcije bliži sinusoidi i što se manje mijenja po obliku i veličini, to mirniji je rad motora, to su manji šumovi i vibracije, gubici i nepovoljni utjecaji inverznih okretnih polja na veličinu momenta. To vrijedi za sve oblike i izvedbe i asinhronih i sinhronih motora.

Jednofazni motor bez pomoćne faze proizvodi okretno polje tek kad se rotor vrti, i to u jednom ili drugom smjeru. Potezni moment je nula, motor ne kreće sam već ga treba „subaciti“ rukom u željenom smjeru. To mu ograničava upotrebu (v. str. 194).

Jednofazni motor sa zaletnom pomoćnom fazom kreće sam ako je os namota pomoćne faze prostorno pomaknuta prema osi namota glavne faze i ujedno struja pomoćne faze fazno pomaknuta prema struji glavne faze. Obično se pomoćna faza namotava s osi pomaknutom za 90 električnih stupanja i priključuje na napon paralelno s glavnim fazom. Fazni pomak među objema strujama može se postići ili povećanjem djelatnog otpora, ili dodavanjem kapacitivnog otpora u pomoćnu fazu, ili povećanjem induktivnog otpora faze, pa se govori o jednofaznom motoru sa zaletnim otpornikom, sa zaletnim kondenzatorom, ili sa zaletnom prigušnicom (ovaj posljednji praktički ne je upotrebljava). Nakon izvršenog zaleta pomoćna faza se isklapa s pomoću centrifugalne sklopke, termoreleja ili strujnog releja.

Uz omjer između efektivnih brojeva zavoja pomoćne i glavne faze

$$a = \frac{N_p f_{np}}{N_g f_{ng}}$$

(f_{np} i f_{ng} su faktori namota, a N_p i N_g stvarni brojevi zavoja pomoćne i glavne faze), uz kružnu sinhronu frekvenciju $\omega_s = 2\pi f_s$, rotorski otpor (reduciran na glavnu fazu statora) R , struju kratkog spoja glavne faze I_{gk} i pomoćne faze I_{pk} , uz razliku u fazi između obje struje ψ i uz os namota pomoćne faze okomitu na os namota glavne faze (kao što se redovito izvodi), potezni moment (uz klizanje $s = 1$) motora s pomoćnom fazom može se izračunati iz jednadžbe

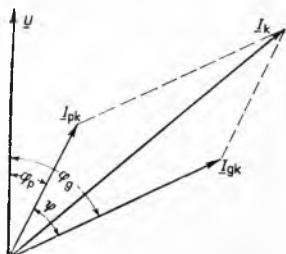
$$M_p = \frac{2}{\omega_s} a R I_{gk} I_{pk} \sin \psi.$$

Potezna struja motora I_k geometrijska je suma struja glavne i pomoćne faze (sl. 241):

$$I_k = I_{gk} + I_{pk}.$$

Prema istoj slici potezni moment proporcionalan je površini paralelograma koji čine vektori objiju struja. Uz jakost struje glavne faze I_{gk} i njezin fazični kut φ_g , koji su određeni otporima i reaktancijama motora u glavnoj fazi, može se na veličinu poteznog momenta utjecati na više načina: a) izborom broja zavoja pomoćne faze, tj. izborom faktora a : kako impedancija u pomoćnoj fazi,

ako se zadrži isti fazni kut φ_p (tj. uz iste geometrijske oblike namota) raste sa N_p^2 , struja I_{pk}



Sl. 241. Potezna struja jednofaznog motora I_k geometrijska je suma struje glavne faze I_gk i pomoćne faze I_pk

U motorima sa zaletnim otpornikom postiže se fazni pomak dodavanjem otpornika ili povećanjem otpora samog namota u pomoćnoj fazi. Kako je u pomoćnoj fazi

$$\underline{U} = \underline{I}_p R_p + \underline{I}_p j X_p,$$

dijeljenjem ove jednadžbe sa $j X_p$ dobiva se:

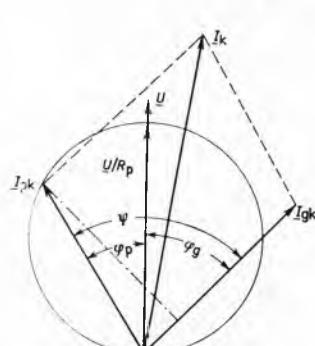
$$\frac{\underline{U}}{j X_p} = \underline{I}_p + \underline{I}_p \frac{R_p}{j X_p}.$$

Uz konstantnu reaktanciju pomoćne faze X_p bit će vrh vektora struje I_p pri različitim otporima R_p u pomoćnoj fazi uvijek na kružnici, kako pokazuje sl. 242. Vidi se da ovakva pomoćna faza daje (zbog malog faznog kuta ψ između obiju struja koji se može postići) relativno velike potezne struje (5...8-struka nazivna struja), uz relativno male potezne momente ($1\frac{1}{2}\cdots 2$ puta nazivni moment).

Povećanje otpora u pomoćnoj fazi može se postići izborom manjeg presjeka žice, no u tom slučaju, uslijed smanjene mase, žica se mnogo brže zagrijava. Zato se radije uzima mjedena žica, koja uz isti otpor ima $\sim 4\frac{1}{2}$ puta veći toplinski kapacitet. Ako ni to nije dovoljno, treba, kad je teži zalet, dodati poseban predotpornik van motora.

Motori sa zaletnim kondenzatorom imaju znatno bolji potezni moment ($3\cdots 4\frac{1}{2}$ puta nazivni moment) uz ne odviše veliku poteznu struju ($3\frac{1}{2}\cdots 5$ puta nazivna struja) jer se uvrštenjem kondenzatora u pomoćnu fazu mogu postići povoljnije vrijednosti faznog kuta između obje struje nego zaletnim otpornikom. Uz konstantan omski otpor a promjenljivu reaktanciju X_p u pomoćnoj fazi dobiva se, ako se navedena jednadžba za \underline{U} podijeli sa R_p , za pomoćnu fazu jednadžba

$$\frac{\underline{U}}{R_p} = \underline{I}_p + \underline{I}_p \frac{j X_p}{R_p},$$



Sl. 243. Potezna struja I_k motora sa zaletnim kondenzatorom u pomoćnoj fazi

pa vektorska slika izgleda kao na sl. 243. Različitim kapacitetima kondenzatora odgovaraju različiti položaji vektora struje I_{pk} . Vrh tih vektora kreće se pri promjeni kapaciteta kondenzatora po nacrtanoj kružnici. Maksimalni potezni moment odgovara tački u kojoj je tangenta paralelna smjeru vektora struje I_{gk} .

Za zaletnu pomoćnu fazu upotrebljavaju se relativno jeftini elektrolitski kondenzatori, no ovi ne smiju ostati uklapljeni dulje od nekoliko sekundi. Veličina i cijena im ovisi ne samo o

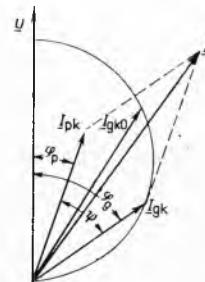
kapacitetu nego i o naponu koji moraju izdržati. Taj je napon pri uklapanju motora, dok motor još stoji, jednak

$$U_e = I_p \frac{1}{\omega C}.$$

Veličinu kondenzatora određuje snaga

$$P_c = U_e I_p = I_p^2 \frac{1}{\omega C}.$$

Za vrijeme zaleta motora može se dogoditi da struja u pomoćnoj fazi čak poraste, pa se i napon na kondenzatoru poveća. Iz tih razloga mora se pomoćna faza na vrijeme isključiti (obično kad motor dosegne 70% pune brzine).



Sl. 244. Potezna struja I_k motora sa zaletnom prigušnicom u glavnoj fazi

Za motore sa zaletnom prigušnicom, koji se rijetko susreću, vrijede analogne prilike kao na sl. 243. Dodavanjem induktivitet u pomoćnu fazu vektor struje I_{pk} zaostaje iza napona U i u vektorskoj slici zakrenut je udesno od vektora U . Kako je u pomoćnoj fazi zbog štednje bakra ionako omski otpor relativno veći, to je $\varphi_p < \varphi_g$; pa je stoga efikasnije dodati induktivitet u glavnu, a ne u pomoćnu fazu (sl. 244). Ovakvu prigušnicu treba nakon izvršenog zaleta ili isključiti ili kratko spojiti, a i pomoćnu fazu treba isključiti. Potezni moment koji se postiže nije velik ($0,75\cdots 1,5$ puta nazivni moment), ali je potezna struja dosta velika ($5\cdots 8$ puta nazivna struja).

Jednofazni motor s trajno uključenom pomoćnom fazom upotrebljava se kao *kondenzatorski motor*. Prema sl. 245 polje kondenzatorskog motora sastavlja se od okretnog protjecanja direktnog i inverznog sistema obiju faza. Ukupno protjecanje u osi glavne faze iznosi $\Theta_g = \Theta_d + \Theta_i$, a proizvodi ga samo struja glavne faze, jer je pomoćna faza pomaknuta prostorno za 90° električnih stupnjeva. Iz istog razloga u osi pomoćne faze djeluje samo protjecanje struje pomoćne faze Θ_p , koje proizvodi rezultirajuće protjecanje simetričnih komponenata u osi pomaknutoj za 90° električnih stupnjeva: $\Theta_p = j \Theta_d - j \Theta_i$. Komponente Θ_d i Θ_i jednoznačno su određene protjecanjima, odnosno strujama, u glavnoj i pomoćnoj fazi:

$$\Theta_g = I_g N_g f_{ng}, \quad \Theta_p = I_p N_p f_{np},$$

gdje N_g i N_p znače broj zavoja, a f_{ng} i f_{np} faktore glavnog i pomoćnog namota. Ako se protjecanja prikažu strujama, a tokovi inducirani naponima, sve reducirano na broj zavoja i namotni faktor glavne faze, vrijede relacije:

$$I_g = I_d + I_i,$$

$$I_p = \frac{j}{a} I_d - \frac{j}{a} I_i,$$

$$U_g = U_d + U_i,$$

$$U_p = j a U_d - j a U_i,$$

Sl. 245. Računanje sa simetričnim komponentama. g Glavni pol, p pomoćni pol, Θ_d protjecanje direktnog sistema, Θ_i protjecanje inverznog sistema

gdje je a omjer između efektivnih brojeva zavoja pomoćne i glavne faze. Faktorom a preračunane su direktna i inverzna komponenta napona glavne faze U_d i U_i na broj zavoja pomoćne faze, a faktorom $1/a$ preračunane su na isti način komponente struja I_d i I_i . Stoga su U_p i I_p stvarni napon i struja pomoćne faze.

Potpuno simetrični sistem nema inverznog okretnog polja koje svojim protumomentom koči rotor i povećava gubitke, te uzrokuje torzionalne vibracije i šumove. Uvjet da sistem bude simetričan jest isčezavanje inverzne komponente:

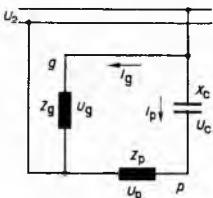
$$I_i = 0, \quad U_i = 0,$$

pa je u tom slučaju

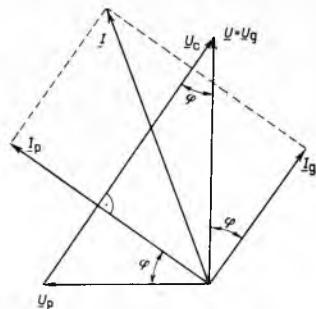
$$\begin{aligned} I_g &= I_d, \\ I_p &= \frac{j}{a} I_d = \frac{j}{a} I_g, \\ U_g &= U_d, \\ U_p &= j a U_d = j a U_g. \end{aligned}$$

Ako je pomoćna faza priključena preko kondenzatora na isti napon kao i glavna faza (sl. 246), vrijedi:

$$U = I_g Z_g = I_p (Z_p - j X_c) = U_p + U_c.$$



Sl. 246. Naponi i struje kondenzatorskog motora. g Glavni namot, p pomoćni namot; U_g , I_g i Z_g napon, struja i impedancija glavne faze; U_c i X_c napon i reaktanca kondenzatora; U_p , I_p i Z_p napon, struja i impedancija pomoćne faze



Sl. 247. Simetrisiranje dvo faznog kondenzatorskog motora

U vektorskem dijagramu napon pomoćne faze okomit je na napon glavne faze, a struja pomoćne faze na struju glavne faze (sl. 247). Okretno je polje simetrično kad je $U_p/U_g = \tan \varphi$, kako se to odmah vidi na sl. 247. Kad je polje simetrično, omjer je napona jednak a , pa za simetrisiranje vrijedi uvjet

$$a = \frac{N_p f_{np}}{N_g f_{ng}} = \tan \varphi.$$

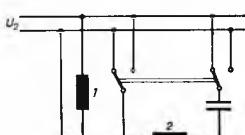
Potrebiti kapacitet kondenzatora slijedi iz uvjeta:

$$I_p X_c = U_c = U / \cos \varphi,$$

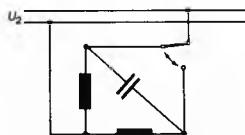
te iznosi

$$C = \frac{1}{\omega} \frac{I_p}{U_c} = \frac{1}{\omega} \frac{I_g}{U} \frac{\cos \varphi}{a}.$$

Pri različitim opterećenjima bit će i faktor snage $\cos \varphi$ različit, pa bi svakom opterećenju odgovarao ne samo drugčiji kapacitet C kondenzatora nego i drugčiji namot pomoćne faze, karakteriziran faktorom a . Simetrično okretno polje može se postići samo pri jednom opterećenju, a čim se ovo promijeni, nema više simetrije. Pri rasterećenju motora faktor snage se smanjuje, a struja u pomoćnoj fazi i napon na kondenzatoru rastu, što može uništiti kondenzator. Zato se kondenzatorski motor upotrebljava u pogonima u kojima ne dolazi do rasterećenja.



Sl. 248. Reverziranje kondenzatorskog motora zamjenom priključka pomoćne faze 2. 1 Glavna faza



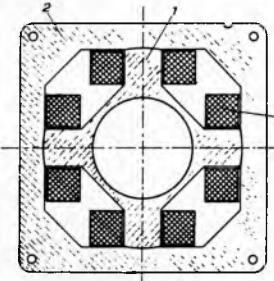
Sl. 249. Reverziranje kondenzatorskog motora s jednakim namotima prebacivanjem kondenzatora iz jedne u drugu fazu

Uz pomoćnu fazu i kondenzator dimenzionirane za postizanje simetrije pri određenom opterećenju, potezni je moment znatno manji od uobičajenog za motore sa zaletnim kondenzatorom. Postižu se vrijednosti poteznog momenta $\sim 0,3$ puta nazivni moment. Da bi potezni moment bio 3 i više puta veći od nazivnog, dodaje se još jedan kondenzator, koji se nakon izvršenog zaleta isključuje. To je *dvo kapacitetni motor* ili kondenzatorski motor s dodatnim zaletnim kondenzatorom. Često se upotrebljava

kondenzatorski motor sa dva namota za dva različita broja polova. Obično su onda potrebna i dva kondenzatora.

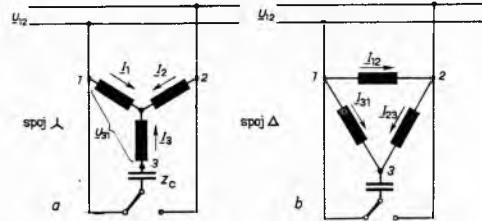
Reverziranje motora s pomoćnom fazom izvodi se tako da se među sobom zamijene oba priključka pomoćne faze (sl. 248). Jednostavnije se može reverzirati, prema sl. 249, prebacivanjem kondenzatora u jednu ili drugu fazu. Obje faze moraju onda biti namotane jednakom, tj. omjer između efektivnih brojeva zavoja pomoćne i glavne faze mora biti $a = 1$. Simetrija okretnog polja postiže se u tom slučaju pri faznom pomaku $\varphi = 45^\circ$, tj. ako je tan $\varphi = a = 1$, a cos $\varphi = 0,707$, što često odgovara stvarnim prilikama, pa se taj način namotavanja i reverziranja mnogo upotrebljava.

Izvedbe jednofaznih motora snage od nekoliko vata naviše ne razlikuju se od izvedbe trofaznih motora. Statorski namot smješten je u utorima. U manjim motorima od nekoliko mililivata do nekoliko vata stator se izvodi s istaknutim polovima I_1 , na koje se nataknute gotovi namot I_3 (sl. 250).



Sl. 250. Stator s istaknutim polovima dvo polog malog motora s pomoćnom fazom

Trofazni motor s kondenzatorom upotrebljava se u tzv. Steinmetzovu spoju (sl. 251) kao jednofazni motor. Ako motor treba da radi sa simetričnim okretnim poljem, fazni naponi i fazne struje moraju odgovarati simetričnom trofaznom sistemu (npr. za spoj u zvijezdi prema sl. 251 a ili sl. 252). Time je određen



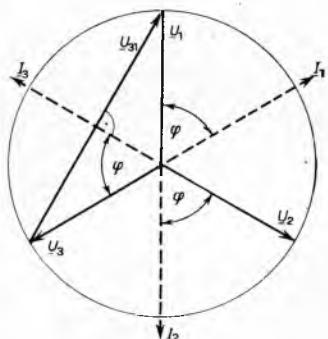
Sl. 251. Trofazni motor s kondenzatorom u Steinmetzovu spoju; a u spoju zvijezde, b u spoju trokuta

polozaj vektora napona U_{31} između stezeljki 3 i 1 prema vektoru narinutog napona mreže U_{12} . Prema sl. 251 a mora biti $U_{31} = I_s Z_c$, gdje je $Z_c = -j X_c$ impedancija kondenzatora u fazi 3, a I_s struja u toj fazi. Na sl. 252 vidi se da pad napona struje I_s na kondenzatoru može biti jednak linijiskom naponu U_{31} samo ako je fazni kut između faznih napona i struja $\varphi = 60^\circ$, tj. ako je $\cos \varphi = 0,5$. Međutim, faktor snage trofaznih motora redovito je znatno veći od 0,5, pa motor u Steinmetzovu spoju očito nikada neće raditi s najpovoljnijim simetričnim okretnim poljem, nego će raditi s nesimetričnim naponima i strujama, što daje osim direktnog sistema polja još i inverzni sistem polja koji nepovoljno djeluje na rad motora. Dvo fazni motor može se simetrisati pri $\cos \varphi = 0,707$ uz jednakom namotane faze, a bilo za koji $\cos \varphi$ uz odgovarajuće namatanje. U trofaznom se motoru to može postići samo pri faktoru snage $\cos \varphi = 0,5$.

Reverziranje se izvodi jednostavno prebacivanjem priključka kondenzatora prema sl. 251, što mijenja redoslijed faza.

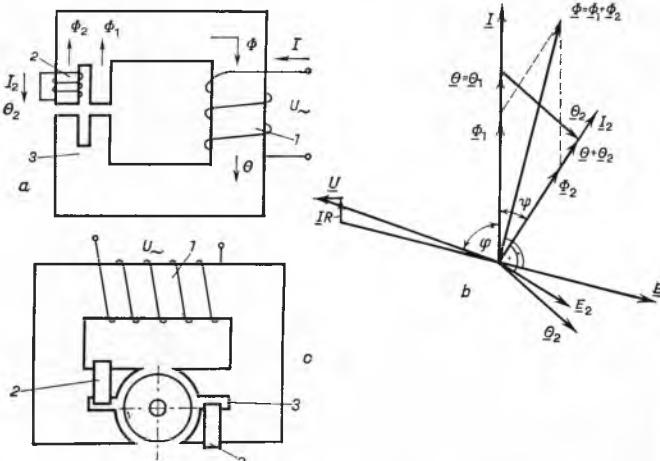
Za spoj u trokut prema sl. 251 b vrijede sasvim slična razmatranja jer se trokut uvek može nadomjestiti spojem pripadnih namota u zvijezdu.

Sl. 252. Simetrisiranje trofaznog kondenzatorskog motora



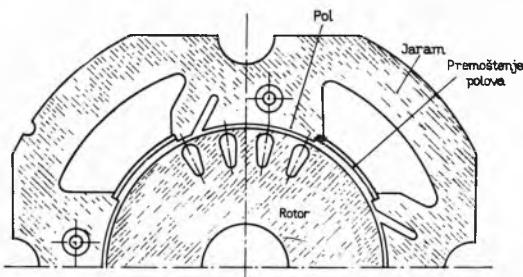
s rascijepljenim polovima, stvara okretno polje na sličan način kao svaki dvofazni motor, samo je os pomoćne faze pomaknuta prema osi glavne faze za kut $\alpha < 90^\circ$, a pomoćna faza nije priključena na mrežu nego je kratko spojena. Polje glavne faze inducira u pomoćnoj fazi napone, te poteku struje koje daju fazno i prostorno pomaknuto protjecanje i tako stvaraju — makar i ne savršeno — okretno polje.

Praktički je stator uvijek izveden s istaknutim polovima koji nose namot glavne faze, a namot pomoćne faze predstavljen je obično jednim kratkospojenim zavojem koji obuhvaća jedan dio pola (sl. 253). Uslijed struje I_z u kratkospojenom zavoju dolazi do faznog pomača između toka Φ_1 u slobodnom i toka Φ_2 u obuhvaćenom dijelu pola (sl. 254). Na sl. 254 a prikazan je pojednostavljeni slučaj jezgre s rascijepljenim polom. Tok Φ_1 u fazi je sa protjecanjem θ struje I , a tok Φ_2 u fazi je s rezultirajućim protjecanjem $\theta + \theta_2$ struje iz mreže I i struje u kratkospojnom svitku I_2 . Odatle pomak u fazi ψ između oba toka, koji daje u statoru prema sl. 254 c okretno polje.



Sl. 253. Četveropolni jednofazni motor s kratkospojnom pomoćnom fazom. 1 Slobodni dio pola, 2 kratko spojeni dio pola, 3 namot glavne faze, 4 kratkospojna pomoćna faza, 5 rotor, 6 osovina

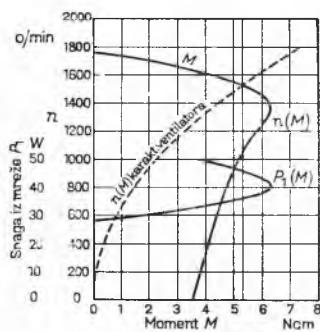
Pobliža analiza daje znatno zamršeniju sliku jer se, osim inverznog polja, pojavljuju i viši harmonički članovi uslijed nesinusne raspodjele uzbudnog protjecanja (statorskih i rotorskog) namota i zasićenja u željezu, osobito treći harmonički član. Udio ovih viših harmoničkih članova u ukupnom toku tolik je da računanje s osnovnim harmoničkim članovima, dakle uz pretpo-



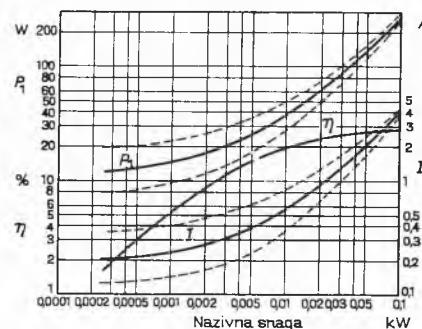
Sl. 255. Jednofazni asinhroni motor s kratkospojnom pomoćnom fazom i premoštenim polovima (paket limova statora i rotora)

stavku sinusnih raspodjela, ne daje upotrebljive rezultate. Povoljnije magnetske prilike i bolje karakteristike motora dobivaju se ako se razmaci između polova premoste npr. magnetskim limom koji uslijed zasićenja ima tolik magnetski otpor da ne odvodi prevelik dio toka mimo rotora (sl. 255). Susreću se također izvedbe sa 2 ili 3 kratkospojena prstena koji obuhvaćaju različiti dio pola.

Tipičnu karakteristiku $n = f(M)$, tj. ovisnost brzine o zakretnom momentu, prikazuje sl. 256 za primjer motora s kratkospojnom pomoćnom fazom koji je upotrijebljen za pogon ventilatora. Na sl. 257 vide se približne vrijednosti struje I , snage P_1 i korisnosti η stroja s kratkospojnom pomoćnom fazom u ovisnosti o veličini motora

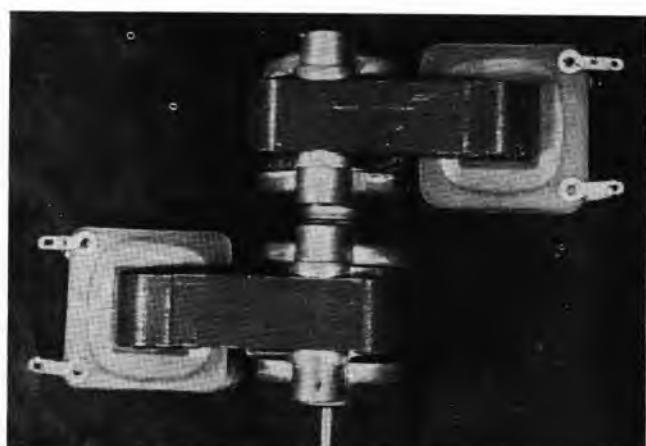


Sl. 256. Karakteristike motora s kratkospojnom pomoćnom fazom za pogon ventilatora



Sl. 257. Snaga iz mreže P_1 , struja I i korisnost η u ovisnosti o veličini motora s kratkospojnom pomoćnom fazom. Debelo izvučene linije znače srednju vrijednost, crtkane donju i gornju granicu

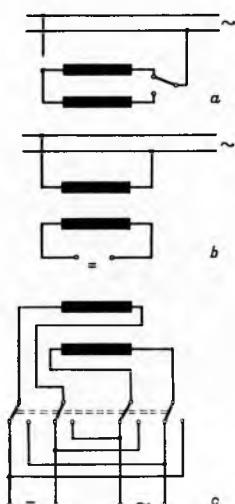
U većim motorima s kratkospojnom fazom mogu se predviđeti i dvije pomoćne faze od nekoliko zavoja, na svakom kraju pola po jedna. Svaki od ta dva namota može se otvoriti ili kratko spojiti i tako omogućiti pogon i u jednom i u drugom smjeru vrtnje. U sitnim motorima radije se prigraduju dva statora jedan uz drugi oko jednog zajedničkog rotora (sl. 258). Priključkom



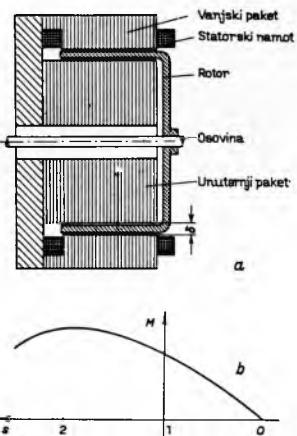
Sl. 258. Reverzionalni odnosno regulacioni motor s kratkospojnom pomoćnom fazom

jednog ili drugog statora na napon dobiva se jedan ili drugi smjer vrtnje. To je tzv. *reverzionalni motor*. Ako se jedan od oba statora priključi na izmjenični napon a drugi uzbuduje istosmjernom strujom, struje inducirane od istosmjerne uzbude u rotoru koče rotor, pa se može po želji regulirati brzina vrtnje. Takav *regulacioni motor* može se izvesti istovremeno i za reverziranje, prema prikazu na sl. 259.

Ferrarisov motor ima rotor u obliku tankog cilindra od vodljivog materijala koji se vrti u uskom rasporu između vanjskog paketa statora i unutarnje jezgre od limova (sl. 260 a). Stator je obično namotan dvo fazno, a obje su faze napajane naponima zakrenutim jedan prema drugom za 90° . Promjenom veličine jed-



Sl. 259. Primjene dvostrukog motora s kratkospojnom pomoćnom fazom. a) Reverzioni motor, b) regulacioni motor, c) regulacijsko-reverzionalni motor



Sl. 260. Motor Ferraris. a) Sastav, b) karakteristika

noga od napona i njegovog smjera dobiva se promjena omjera između inverznog i direktnog okretnog polja, kao i promjena smjera vrtnje, što omogućuje da se brzina vrtnje ovih motora u oba smjera gotovo jednako fino regulira kao brzina vrtnje kolektorskih istosmjernih motora. Prednost je Ferrarisovih motora vanredno mala masa rotora, što omogućuje vrlo brzo pokretanje, zauzvajanje i reverziranje. Grade se od najmanjih snaga do snage ~ 70 W. Karakteristika $M = f(s)$, tj. ovisnost momenta M o klizanju s , prikazana je na sl. 260 b.

Sinhroni mali električni motori

Kao stator asinhronog motora, tako i stator sinhronog malog motora mora proizvoditi bilo pulsaciono bilo manje ili više savršeno okretno polje. Sve uobičajene izvedbe asinhronih motora mogu se primijeniti i na sinhroni motor. Bitna je razlika u izvedbi rotora. Umjesto rotora s kratkospojnim kavezom ovdje se upotrebljava rotor od materijala u kome se pojavljuju veliki gubici uslijed histereze, rotor s permanentnim magnetima, ili rotor s istaknutim polovima, pa se govori o histerezinih motorima, sinhronim motorima s permanentnim magnetom i reluktantnim sinhronim motorima.

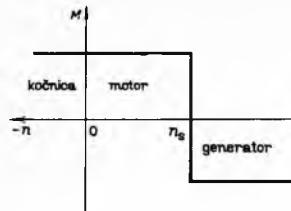
Histerezni motori. Rotor histerezognog motora napravljen je u obliku masivnog valjka od legure s velikim gubicima uslijed histereze. Karakteristično je za histerezu da proizvedeni magnetski tok nije u fazi sa strujnim protjecanjem koje ga je proizvelo. Uslijed toga proizvedeni tok i protjecanje stvaraju zakretni moment. Ovaj je moment jednak pri svim brzinama, što je najlakše pokazati energetskim razmatranjem.

Gubici uslijed histereze u rotoru pri određenoj magnetskoj indukciji ovise o broju premagnetiziranja u sekundi, tj. o frekvenciji u rotoru, koja je proporcionalna klizanju s : $f_2 = s f_1$. Ti se gubici pokrivaju, kao u svakom asinhronom stroju, snagom P_{12} koja se prenosi od statora na rotor. Dio te snage $(1 - s)P_{12}$ pretvara se u mehaničku snagu na osovinu, a dio $s P_{12}$ u električnu snagu u rotoru. Ako se sa P_{H2} označe gubici uslijed histereze pri frekvenciji mreže f_1 , stvarni bi gubici pri klizanju s bili $s P_{H2}$, pa vrijedi jednadžba $s P_{12} = s P_{H2}$, odnosno za zakretni moment:

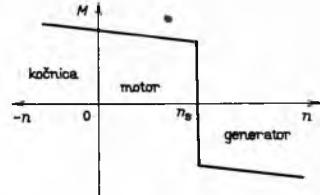
$$M = \frac{P_{12}}{\omega_s} = \frac{1}{2\pi n_s} P_{H2}.$$

Tu je ω_s sinhrona kutna brzina okretnog polja; ona ovisi samo o broju polova motora i frekvenciji mreže, a ne ovisi o klizanju.

Iz toga slijedi da je zakretni moment motora koji nema struje u rotoru, već radi samo na osnovu histereze, konstantan od časa pokretanja pa sve do sinhronne brzine. To je vrlo povoljno jer motor kreće asinhrono s punim momentom, a radi sinhrono. Kad se motor pokuša izbaciti iz sinhronizma nadsinhronim pogonom izvana, moment pri sinhronoj brzini vrtnje mijenja predznak (sl. 261).



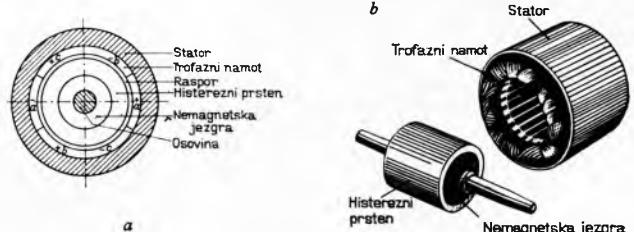
Sl. 261. Karakteristika idealnog histerezognog stroja



Sl. 262. Karakteristika histerezognog motora s vrtložnim strujama

Praktički se ne mogu izbjegći vrtložne struje koje okretno polje inducira u masivnom rotoru. Te vrtložne struje stvaraju dodatni moment pa karakteristika momenta dobiva oblik koji pokazuje sl. 262.

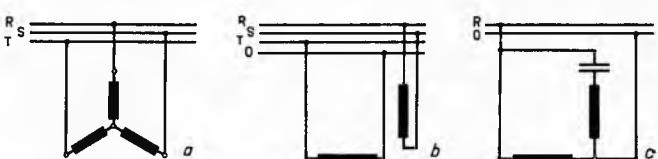
Rotor histerezognog motora obično je izведен tako da se magnetski tok pretežno zatvara kroz sam materijal velike histereze koji služi kao povratni jaram (sl. 263). U tom je slučaju histerezni prsten navučen na jezgru od nemagnetskog materijala. No postoje



Sl. 263. Histerezni motor. a) Shematski presjek, b) izgled statora i rotora

i izvedbe s jezgrom od mekog željeza, pri čemu tok prolazi kroz histerezni prsten uglavnom radijalno. Takve izvedbe u kojima je rotor čvrsto, homogeno, dobro izbalansirano tijelo, osobito su prikladne za giroskopske motore vrlo velikih brzina.

Stator histereznih motora snage veće od nekoliko desetaka vata obično se ne razlikuje od statora većeg asinhronog motora. Na sl. 264 prikazana je specijalna izvedba statora sa zatvorenim utorima: namot je uložen s vanjske strane, a nakon toga je navučen vanjski jaram u obliku lameliranog prstena. Takođe izvedbom smanjuju se viši harmonički članovi uzrokovani utorima i poboljšava se rad motora. Takvi se motori priključuju na trofaznu mrežu ili kao trofazni motori (sl. 265 a), ili kao dvo fazni motori (sl. 265 b), ili se priključuju na jednofaznu mrežu s kondenzatorom u jednoj fazi (sl. 265 c). Kako je struja

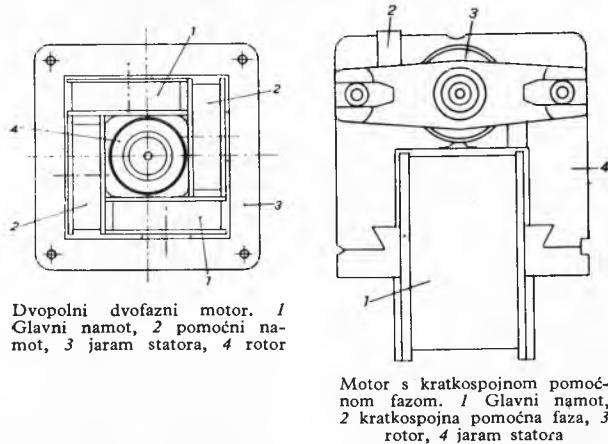


Sl. 265. Način priključka većih histereznih motora. a) Priklučak trofaznog motora, b) priključak dvo faznog motora, c) priključak motora s kondenzatorom u pomoćnoj fazi

gotovo ista za sva klizanja, isti kondenzator se upotrebljava i za zalet i za pogon.

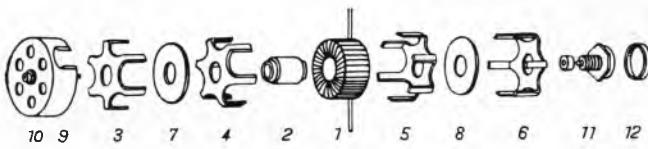
Sitni histerezni motori grade se kao dvo fazni motori sa četiri istaknuta pola (sl. 266 a), ili kao motori s kratkospojnom po-

moćnom fazom (sl. 266 b). Obično se razlikuju brzohodni motori sa 3000 o/min. i sporohodni sa 375 ili 500 o/min. U brzohodnim motorima (snage od 0,1 do 0,6 W) upotrebljava se dvofazni stator s kondenzatorom ako je potrebno reverziranje. Ako je potrebno



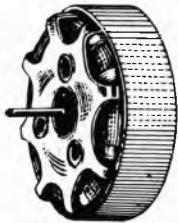
Sl. 266. Sitni histerezni motori

treban samo jedan smjer vrtnje i ako zadovoljava manji potezni moment, uzima se jednofazno uzbudena jezgra s dvjema kratkospojnim prstenima na krajevima polova. Sporohodni motori snage od 5 do 15 mW obično se grade s vanjskim rotorom zvonastog oblika (10 na sl. 267). Takav 12-polni motor prikazan je



Sl. 267. Sporohodni sitni histerezni motor, rastavljen. 1 Uzbudni namot, 2 glavina, 3, 4, 5 i 6 ploče s polovima, 7 i 8 kratkospojni prsten, 9 rotorski prsten, 10 i 11 ležaji, 12 matica držača ležaja

na sl. 267 rastavljen i razvučen u smjeru osovine. Uzbudni namot 1 napajan izmjeničnom strujom smješten je na glavini 2; on stvara u akcijalnom smjeru tok koji se preko polova ploče 3 i 4, s jedne strane, zatvara kroz rotorski prsten 9 na polove ploče 5 i 6, s druge strane. Pri tome je ploča 3 odijeljena bakrenim prstenom 7 od ploče 4, a isto tako ploča 6 od ploče 5 prstenom 8. Dio toka koji se zatvara preko ploče 3 odn. ploče 6 na taj je način pomaknut u fazu, a kako je i prostorno pomaknut, stvara se okretno polje, te motor kreće sam. Bakreni prsteni 7 i 8 služe dakle kao kratkospojna pomoćna faza. Rotor je zvonastog oblika, s umetnutim prstenom od magnetski polutvrdog materijala koji ima dobar permeabilitet radi poboljšanja asinhronog zaleta, a visoku histerezu radi dobrog sinhronog rada. Sličan motor rastavljen prikazan je na sl. 268.



Sl. 268. Sitni histerezni motor sa 375 o/min.

Velika je prednost histereznih motora njihov miran i nečujan rad. Sporohodni sincroni motori upotrebljavaju se za sve vrste satnih mehanizama, vremenskih releja, programatora i sl., pa se u tu svrhu grade s prigradenim reduktorima, koji daju na izlazu brzinu vrtnje osovine od 1 okretaja u $\sim 0,1$ s do 1 okretaja u ~ 30 dana. Releji s vremenskim zatezanjem često se izvode s aksijalno pomicnim rotorom koji prevladavajući silu pera uskače u stator kad se ovaj priključi na napon te time uzrokuje zahvat zupčanika. Kad nestane napona, rotor iskoči i izvrsti zupčanike, a pera ih vraća u osnovni položaj. Time je vremenski relej ponovo spremjan za funkciju.

Sinhroni mali motor s permanentnim magnetima. Princip rada malih sincronih motora s permanentnim magnetima isti je kao velikih sincronih motora. U izvedbi oni se razlikuju

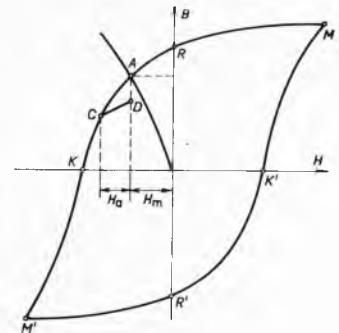
samo po tome što se za dobivanje okretnog polja statora ne upotrebljava višefazno napajani namot, nego jednofazni namot s pomoćnom fazom. Primjenjuje se priključak s kondenzatorom u pomoćnoj fazi ili s kratkospojnom pomoćnom fazom, a uzbudu rotora ne daje namot kroz koji protječe istosmjerna struja, nego permanentni magnet.

Permanentni magneti i njihovo starenje. Na sl. 269 prikazana je petlja histereze $M' - R' - K' - M - R - K - M'$ permanentnog magneta u zatvorenom magnetskom krugu zanemarljivog vanjskog magnetskog otpora. Protjecanje potrebno za svladavanje vanjskog magnetskog otpora, preračunato na jedinicu duljine magnetsa, odgovara magnetskom polju H_m koje djeluje nasuprot vlastitom polju permanentnog magneta i pomiče radnu tačku od tačke remanentnog magnjeta R u tačku A , koja je sjecište petlje histereze i krivulje magnetiziranja vanjskog kruga (preračunate na presjek i duljinu magnetsa). Osim toga struje statora mogu proizvesti dalje demagnetizirajuće polje H_a , tako da se radna tačka magneta pomiče u C . Kad se motor rasutereti, magnet se ne vraća u stanje prikazano tačkom A , nego u stanje manje indukcije prikazano tačkom D . Taj se postupak zove »starenje« magneta; izvodi se na umjetan način prije ugradnje, i to onolikom demagnetizacijom kolika se može u najgorem slučaju u pogonu očekivati.

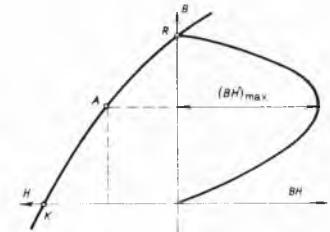
Uz presjek magnetsa S i duljinu L pri indukciji B i polju H tok je magnetsa $\Phi = BS$, a protjecanje raspoloživo za vanjski dio magnetskog kruga $\Theta = HL$. Magnetska energija razmjerna je produktu $\Phi\Theta = BHV$, gdje je V volumen permanentnog magnetsa. Magnet je uz istu energiju to manji što je veći produkt BH ; $V = \Phi\Theta/BH$, pa treba radnu tačku projektirati što bliže vrijednosti $(BH)_{\max}$ (sl. 270). Što je položiti dio krivulje histereze $R - A - K$, to promjene u vanjskom krugu manje utječu na permanentni magnet. Osobito su u tom pogledu prikladni oksidokeramički permanentni magneti, vrlo položite petlje histereze.

Motor s permanentnim magnetima po Merrillu prikazan je na sl. 271. Četveropolni magnet 1 zatvoren je jarmom od limova 2 koji sprečava demagnetizaciju pri eventualnom otvaranju magnetskog kruga. Duboki utori 3 u jarmu na sredini između polova sprečavaju preveliko rasipanje od pola na pol. U utorima na rotorskem jarmu smješten je kratkospojeni kavez 4 koji služi za asinhroni zalet, nakon čega motor sam uskače u sinhronizam. Motori ovakve izvedbe grade se čak do snage od ~ 2 kW.

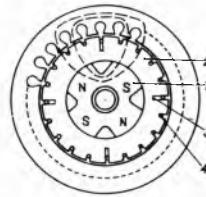
Induktorski motori s permanentnim magnetom imaju uglavnom malu brzinu vrtnje a grade se za mnogo manje snage (ispod 1 W). Postoje različite konstrukcije takvih motora. Najjednostavnija je konstrukcija motora sa zubovima izmjeničnog polariteta na rotoru. Rotor takvog motora ima $2p = R$ polova. On je izведен slično kao stator na sl. 267, s pločastim permanentnim magnetom umjesto uzbudnog svitka. Stator ima isto tolik broj polova i uzbudjen je izmjeničnom strujom. Da bi sile između statorskih i rotorskih polova dale zakretni moment uvijek u istom smjeru, promjeni polariteta statora unutar jedne poluperiode (vremena



Sl. 269. Petlja histereze i starenje magneta



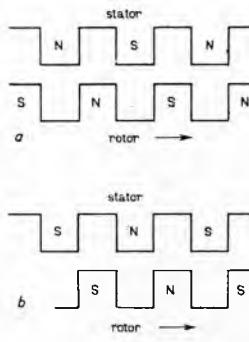
Sl. 270. Optimalna radna tačka permanentnog magneta



Sl. 271. Motor s permanentnim magnetima po Merrillu. 1 Permanentni magnet, 2 limovi rotora, 3 suženja rotorskog jarma, 4 rotorski kavez

$\frac{T}{2} = \frac{1}{2f}$) mora odgovarati pomak rotora za jedan zub, tj. R -ti dio jednog okretaja (sl. 272 a, b). Broj okretaja u jedinici vremena, brzina vrtnje, onda je $n = 2f/R$, kao što to odgovara sinhronom stroju sa $2p$ polova. Ovakav motor treba ubaciti u sinhronizam, no po pravilu rotor zatvara uslijed sitnih nesimetrija u magnetskom polju i sam uskače u sinhronizam. Mehaničkom zaporkom sprečava se da motor krene u neželjenom smjeru.

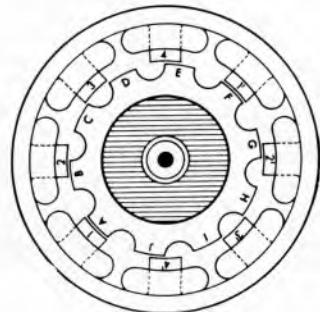
Motori sa zubovima istoga polariteta na rotoru izvode se češće. U tim motorima daje i uzbuda statora svim zubovima statora u istom trenutku isti polaritet. Tok se zatvara kroz osovinu i ležajne štitove (sl. 273). Prema sl. 274, u trenutku kad statorski i rotorski zubi, pri položaju jednih prema drugima prikazanom na slici 274 a, imaju raznoimene polaritete, i oko pola periodično kasnije, uz istoimene polaritete prema slici 274 b, smjer je magnetskih sila na obodu isti. Brzina vrtnje rotora mora biti takva da cijeloj periodi od-



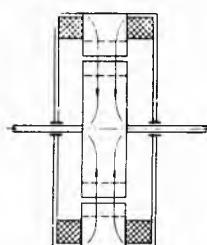
Sl. 272. Sinhroni motor s permanentnim magnetima različitim polaritetom u rotoru; a i b dva uzaštona položaja polova pri vrtnji

raznoimenog pola statora 1 poklapa sa simetralom rotorskog zuba A, past će sredina istoimenog pola 3 statora u sredinu između dva rotorska zuba C i D. To je upravo položaj koji će rotor zauzeti zbog djelovanja magnetskih sila, jer je magnetski otpor pod polom 1 (raznoimeni polovi) minimalan, a pod polom 3 (istoimeni polovi) maksimalan. Nakon polovine periode mijenja se polaritet statora, pa će rotor doći u položaj minimalnog magnetskog otpora prema polu 3, tj. zakrenut će se za $1/2$ rotorskog zuba, ili za $1/2 R$ okretaja. Odatile izlazi da je brzina vrtnje $n = f/R$, tj. ona odgovara rotorskom, a ne statorskom broju zubova, pri čemu svaki zub treba brojati kao par polova. Pomoćna faza pri tome jednoznačno određuje smjer vrtnje i omogućuje samostalno pokretanje. Ti motori sinhroniziraju se unutar $1/2$ periode, a isto tako naglo se i zaustavljaju kad se isključi napon. Ako treba da pokreću iole veću masu, ili da kreću pod opterećenjem, treba osigurati pokretanje elastičnim prijenosom. Obično je već normalna zračnost u prijenosu dovoljna da se motor sinhronizira. Ti se motori odlikuju time što razvijaju velik moment, što znači i veliku snagu za određene dimenzije, ali rad im nije tako miran kao npr. rad histerezinskih motora.

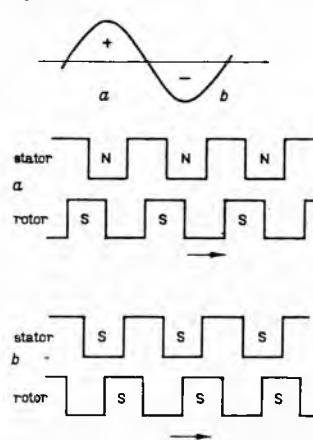
Reluktantni motor je sinhroni motor bez rotorske uzbude i bez permanentnih magneta na rotoru. Zakretni moment nastaje uslijed toka stvorenog statorskom uzbudom; taj tok uvijek prolazi putem najmanjeg magnetskog otpora (reluktancije). Ako magnetska vodljivost po obodu rotora nije jednak, magnetske rubne sile djelovat će na rotor uvijek tako da ga nastoje dovesti u položaj u kojem će se uzbudi statora suprotstaviti najmanji magnetski otpor. Kako rotor nema vlastite uzbude, sile na rotor u određenom položaju ostaju iste bilo pri kojem polaritetu zuba statora (sl. 277 a, b). Uvijek isti polaritet zuba statora dao bi momenti koji se periodički mijenja s položajem zuba rotora u odnosu prema statoru: korak zuba odgovara jednom ciklusu (sl. 277 c), a srednja je vrijednost momenta nula. Pri izmjeničnoj uzbudi (sl. 277 d), ako je brzina rotora takva da rotor dolazi u položaj pozitivnog momenta upravo kad je uzbuda velika (bez obzira na predznak) a u položaj negativnog momenta kad je uzbuda mala, rezultira prosječni moment u pozitivnom smjeru, koji sinhroni tjeru jednofazno uzbudeni motor. Sinhrona je brzina vrtnje $n = 2f/R$, gdje je R broj zuba rotora.



Sl. 276. Princip rada induktorskog motora s različitim brojevima zuba statora i rotora



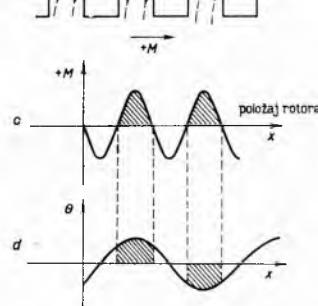
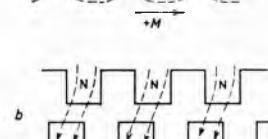
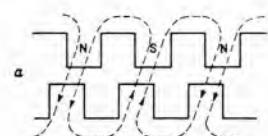
Sl. 273. Unipolarni sinhroni motor



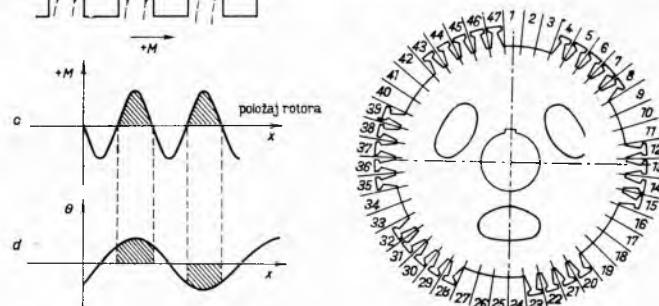
Sl. 274. Magnetske sile u motoru s istopolnim zubovima; a i b dva uzaštona položaja polova pri vrtnji

govara zackret rotora za jedan zub, pa uz R zuba ona iznosi $n = f/R$. Ovdje broj zuba nije jednak broju polova, već broju pari polova p .

Motor s dva rotora i s jednim zajedničkim statorom posebna je varijanta naprijed opisanih motora. Svi zubi jednog rotora istog su polariteta, a oba rotora različiti su polaritet. Na sličan način stator je uzbuden izmjeničnom strujom (sl. 275). Položaj zuba jednog rotora odgovara sredini između zuba drugoga. Lako je vidjeti da ukupni broj zuba obaju rotora $2R$ odgovara broju polova $2p$, i da brzina vrtnje rotora u tom slučaju iznosi $n = f/R$.



Sl. 277. Sile na zube reluktantnog motora



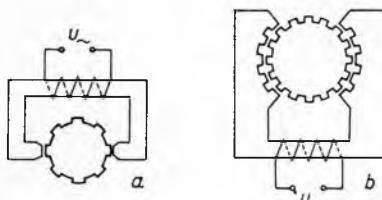
Sl. 278. Rotorski lim većeg četveropolnog reluktantnog motora

Sl. 275. Induktorski motor s permanentnim magnetima i dvostrukim rotatom. 1 Prvi rotor, 2 drugi rotor, 3 stator, 4 osovina

Induktorski motor s različitim brojem zuba statora i rotora prikazan je shematski na sl. 276. Svi su zubi rotora istog polariteta. Stator ima manji broj zuba nego rotor; zubi statora nose višepolni dvofazni namot (na sl. 276 npr. polovi 1-1' i 3-3' pripadaju 4-polnom namotu glavne faze, a polovi 2-2' i 4-4' 4-polnom namotu pomoćne faze). Pomoćna faza priključena je preko kondenzatora ili je izvedena kao kratkospojna. Ako se uzmu broj zuba statora S i broj zuba rotora R takvi da jednom polnom razmaku na statoru odgovara $k + \frac{1}{2}$ zuba rotora (k je cijeli broj), i ako se promatra trenutak kad se sredina

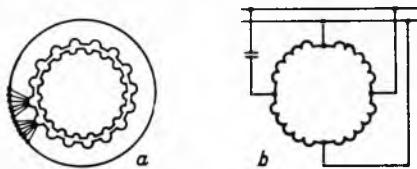
sam uskače u sinhronizam. Snaga je takvog motora do tri puta manja od snage asinhronog motora istih dimenzija.

Jednofazni reluktantni motor gradi se obično sa samo dva pola statora, ali se broj zubova statora uzima veći radi boljeg iskorištenja (sl. 279 a i b). Često se takav motor naziva reluktantnim motorom za podsinskrone brzine jer mu se brzina ravna prema broju zubova rotora, a ne prema broju polova statora.



Sl. 279. Reluktantni motor za podsinskrone brzine. a Jedan zub po polu statora, b više zubova po polu statora

Reduktorski reluktantni motor ima različite brojeve zubova statora S i rotora R . Stator je namotan prstenasto i priključen preko četiri izvoda na jednofaznu mrežu prema sl. 280. Priključak preko kondenzatora proizvodi nesavršeno okretno polje i rotor se okreće tako da je jedan zub rotora uvijek nasuprot zubu statora čija se simetrala podudara s osi okretnog polja. Svaki



Sl. 280. Reduktorski reluktantni motor. a Shematski presjek, b shema spoja

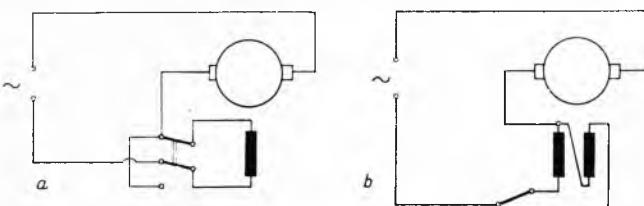
iduci zub rotora mora pri tome izvršiti pomak za dio oboda $\delta = 1/S - 1/R$. Nakon što je okretno polje obišlo svih S statorskih zubova, tj. nakon jedne punе periode, rotor se zakrenuo za $\delta S = (R - S)/R$ okretaja, što odgovara brzini vrtnje: $n = f \delta S = f(R - S)/R$.

Reluktantni motor uz određene dimenzije daje relativno malu snagu, pa ga u području vrlo malih snaga potiskuje motor s permanentnim magnetima i histerezni motor.

Kolektorski mali motori

Za način rada malih kolektorskih motora vrijedi ono što je izloženo za takve motore svih veličina u poglavljiju Električni kolektorski strojevi. Poteškoće komutacije manje su u manjim strojevima, pa se obično ne izvode pomoći polovi i kompenzacioni namot za snage ispod 3000–4000 W. Najčešće se susreću motori serijske karakteristike (univerzalni motori), a istosmerni motor vrlo često ima konstantnu uzbudu u obliku permanentnih magneta i upravljanje brzinom pomoću narinutog napona.

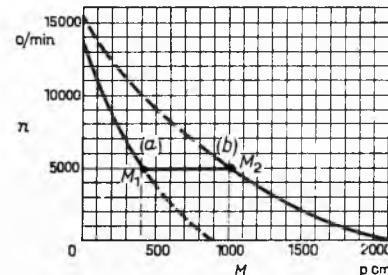
Univerzalni motor nazvan je tako jer može raditi i na istosmjernoj i na izmjeničnoj mreži. To je kolektorski motor sa serijskom uzbudom; on ne mijenja smjer vrtnje ako se promijeni polaritet, jer istovremena promjena smjera i uzbudne struje i struje armature ne mijenja smjer proizvedenog momenta. Jasno je, dakle, da takav motor može raditi i na istosmjernu i na izmjene-



Sl. 281. Reverziranje univerzalnog motora: a zamjenom priključaka uzbudnog namota, b preklapanjem dvaju suprotno spojenih namota

ničnu struju, samo mu magnetski krug mora biti izveden od limova zbog vrtložnih struja. Reverziranje se postiže zamjenom priključaka uzbude (sl. 281 a) ili s pomoću dva suprotno spojena uzbudna namota (sl. 281 b).

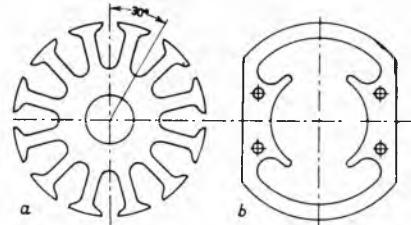
Vektorski dijagram univerzalnog motora prikazan je na str. 184. Motor ima izrazitu serijsku karakteristiku, tj. ovisnost brzine vrtnje o momentu opterećenja; ona se može mijenjati izbacivanjem jednog dijela uzbudnog namota iz strujnog kruga. U motorima za veće brzine (iznad 2000 o/min) može se održati brzina vrtnje konstantnom time što centrifugalna sklopka uklapa i isklapa dio uzbudnog namota i prebacuje rad motora s karakteristikama a na karakteristiku b i obratno (sl. 282). Ako je opterećenje



Sl. 282. Karakteristika univerzalnog motora s centrifugalnom sklopkom za održavanje konstantne brzine

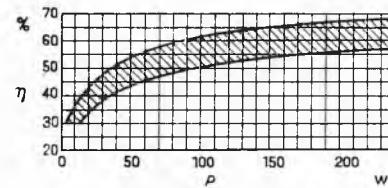
unutar granica M_1 i M_2 , brzina će ostati konstantna u granicama osjetljivosti centrifugalnog regulatora.

Rez limova univerzalnog motora vidi se na sl. 283.



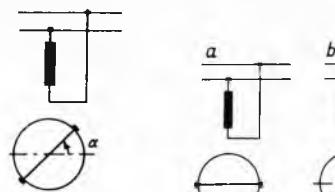
Sl. 283. Rez limova univerzalnog motora: a za rotor, b za stator (nije u istom mjerilu)

Korisnost univerzalnog motora ovisi o njegovoj veličini. Karakteristične vrijednosti vide se na sl. 284.

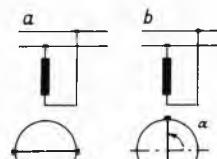


Sl. 284. Korisnost univerzalnih motora različne snage

Repulzionni motor ima jednofazni namot u utorima statora, a na kolektoru rotora ima slog četkica koje su među sobom kratko spojene (sl. 285). Transformatorskim djelovanjem inducira se u rotoru u osi statorskog namota napon. Preko kratko spojenih

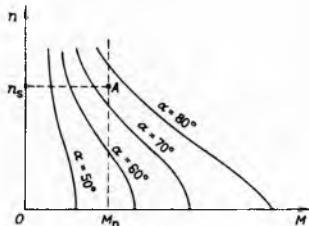


Sl. 285. Shematski prikaz repulzionog motora

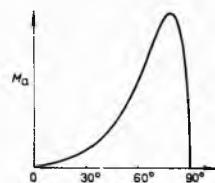


Sl. 286. Prazni hod (a) i kratki spoj (b) repulzionog motora

četkica taj napon tjeru u rotoru struju i stvara protjecanje s uzdužnom komponentom koja odgovara uzbudnom protjecanju i s poprečnom komponentom koja odgovara struji armature običnog serijskog motora. Poprečni položaj četkica ($\alpha = 0$) daje struju nula (prazni hod, sl. 286 a), a uzdužni položaj ($\alpha = 90^\circ$) maksimalnu struju (kratki spoj, sl. 286 b), u oba slučaja moment je nula. Svakom položaju α četkica između ta dva položaja odgovara po jedna karakteristika $n = f(M)$ (sl. 287). Kako se mijenja po-



Sl. 287. Karakteristike repulzionog motora za različite položaje četkica α



Sl. 288. Potezni moment repulzionog motora za različite položaje četkica α

tezni moment M_a u ovisnosti o kutu α položaja četkice vidi se na sl. 288.

Jednofazni asinhroni motor s repulzionim zaletom gradien je kao repulzioni motor, s četkicama fiksiranim u položaju optimalnog zaleta i s uređajem koji po izvršenom zaletu preko centrifugalne sklopke kratko spaja sve lamele kolektora i tako pretvara motor u obični asinhroni kavezni motor (sl. 289).

Repulzionalni asinhroni motor ima dva namota na rotoru, kolektorski i kavezni. Prvi služi za zalet repulzionog motora, a drugi preuzima pogon asinhronog stroja kad ga postigne puna brzina.

Repulzionalne motore, osim u primjenama gdje je potrebna regulacija brzine vrtnje, sve više potiskuju jednofazni asinhroni motori sa zaletnim kondenzatorima jer ovi također omogućuju velike potezne momente uz umjerene potezne struje, a znatno su jednostavniji i jeftiniji.

Mali istosmjerni motori. U području snaga od nekoliko vata do nekoliko stotina vata istosmjerni motori se obično izvode dvopolno kao poređni, serijski ili kompaundni motori (v. poglavje Kolektorski električni strojevi u ovom članku). Sitni motori sve češće se pojavljuju kao istosmjerni motori. U ovima se umjesto uzbudnog namota upotrebljavaju permanentni magneti, bilo kao polni nastavci bilo ubaćeni na drugom mjestu kao dio magnetskog kruga. Tako izveden stroj ima brzinu vrtnje proporcionalnu visini narinutog napona. Obrnuto, kao generator on daje napon koji je proporcionalan brzini vrtnje. Zbog tih svojstava on služi u mjernim i regulacionim uređajima kao tahogenerator za pretvaranje brzine vrtnje u proporcionalnu električnu veličinu i kao motor koji vremenski integrira bilo koju mjernu veličinu pretvorenu u električni napon proporcionalnog iznosa. Kako bi se smanjila zamašna masa rotora

i postiglo da brzina što vjernije slijedi i brze promjene napona, grade se sitni mjerni istosmjerni motori prema sl. 290. Namoti rotora I nisu ovđe uloženi u ute, nego slobodno formirani u obliku zvonolikog rotora i slijepjeni poliesterskom smolom u kruto tijelo preciznih dimenzija. Unutar tog rotora nalazi se nepomična jezgra od legure aluminijuma, nikla i kobalta (Alnico) magnetizirana dijametalno (2) a s vanjske strane kućište koje služi kao magnetski povratni put. Kolektor ima mali broj lamela, a struja se oduzima preko četkica od zlatne žice. Nedostaci kolektora, iskre (i s time vezane visokofrekventne smetnje) i trošenje, izbjegnuti su u beskolektorskem istosmjernom motoru koji prikazuje sl. 291.

Uloge statora i rotora ovde su zamjenjene. Rotor R je cilindrični permanentni magnet dijametalno magnetiziran. U rasporu između rotora i statora nalaze se nepomični svici 1, 2, 3, 4 i dviye Hallove sonde HG. Svici su priključeni na istosmjerni napon preko poluvodičkih upravljaljivih ventila, tranzistora (sl. 292), kojima upravljaju Hallove sonde. Te sonde daju u poprečnom smjeru napon proporcionalan jakosti magnetskog polja u kojem se nalaze. Na taj način magnetsko polje rotora u određenom trenutku daje signal jednog ili drugog smjera i preko tranzistora otvara struju upravo u onom svitku koji se nalazi u pogodnom položaju, kao što se to obično postiže kolektorm. Na taj način nastaje okretno protjecanje uvijek okomito na magnetski tok, što daje jednolik zakretni moment.

U tabl. 9 dat je pregled malih motora, njihovih karakteristika i njihove primjene.

SELSINI

U daljinskom upravljanju i regulacijskim sistemima često se upotrebljava kao element za praćenje položaja i slične zadatke mali motor zvan selsin (engl. selsyn ili synchro). Po konstrukciji je obično identičan sa sinhronim strojem s okruglim rotorom. I stator i rotor su lamelirani. Rotor nosi raspodijeljeni namot koji daje približno sinusnu raspodjelu indukcije u rasporu, namot statora najčešće je trofazan, no on može biti i dvofazan, pa i jednofazan. Za razliku od sinhronog stroja, gdje se rotor uzbuduje istosmjernom strujom a napon u statoru inducira gibanjem rotora, selsin ima rotor uzbuden izmjeničnom strujom frekvencije 50, 60, 400 ili 500 Hz, a pulzirajući tok inducira napon u namotima statora i kada rotor miruje. Taj napon transformacije izmjenični je napon, a veličina mu ovisi o kutu zakreta α osi rotorskog namota prema osi statorskog namota po zakonu $E = E_{\max} \cos \alpha$.

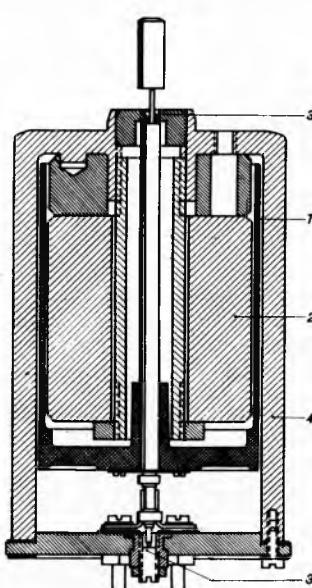
Naponi u namotima dvofaznog statora iznosit će

$$E_1 = E_{\max} \cos \alpha, \quad E_2 = E_{\max} \cos \left(\alpha - \frac{\pi}{2} \right),$$

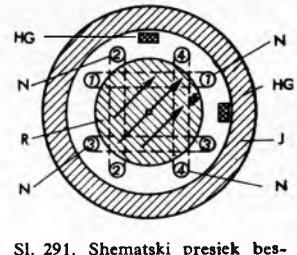
a u namotima trofaznog statora

$$E_1 = E_{\max} \cos \alpha, \quad E_2 = E_{\max} \cos \left(\alpha - \frac{2\pi}{3} \right), \quad E_3 = E_{\max} \cos \left(\alpha - \frac{4\pi}{3} \right).$$

Naponi statora ovise dakle o položaju rotora. Ako se ovakvi naponi selsina »davača« dovedu na statorske namote jednakog selsina »prijemnika«, oni će na analogan način i u njemu proizvesti izmjenično pulzirajuće polje. Položaj polja prijemnika prema osi statorskog namota davača određen je također kutom α . Taj se efekt može iskoristiti na dva načina. U prvom se slučaju rotor selsina prijemnika priključi na isti izvor izmjeničnog napona kao i rotor selsina davača. Moment koji djeluje na rotor selsina prijemnika ovisi o sinusu razlike kutova osi njihovih rotorskog namota:



Sl. 290. Presjek sitnog istosmjernog motora. 1 zvonasti rotor s osovinom i kolektorm, 2 magnet (nepokretan), 3 ležaji, 4 magnetski povratni put



Sl. 291. Shematski presjek beskolektorskog istosmjernog motora. N namoti, Φ magnetski tok, R rotor, HG Hallov generatori, J jaram

Tablica 9
PREGLED MALIH MOTORA

| Vrsta motora i najčešće susretana veličina | Karakteristika momenta u ovisnosti o brzini | Neke karakteristične primjene | Vrsta motora i najčešće susretana veličina | Karakteristika momenta u ovisnosti o brzini | Neke karakteristične primjene |
|---|---|---|---|---|--|
| 1. Jednofazni asinhroni motor bez pomoćne faze (do 0,5 kW) | | Kućne radionice, mali strojevi s pogonom preko remena | 10. Sinhroni motor sa permanentnim magnetima brzohodni (do 2 kW), sporohodni (0,05...1 W) | | Alatni i grafički strojevi, programatori strojeva za pranje, vremenski releji i satni mehanizmi koji zahtijevaju veći moment |
| 2. Jednofazni asinhroni motor sa zaletnim otpornikom ili prigušnicom (30...300 W) | | Ventilatori, centrifugalne pumpe | 11. Reluktantni motor (0,2...300 W) | | Teleprinteri, grafički strojevi, satni mehanizmi |
| 3. Jednofazni asinhroni motor sa zaletnim kondenzatorom (100...600 W) | | Kompresori, pumpe, hladnjaci, strojevi za pranje, klima-uredaji | 12. Univerzalni motor serijske karakteristike (1...300 W) | | Ručni alati, računski strojevi, kućanski aparati: usisaci, laštilice, centrifuge, mlinci, miješalice, aparati za brijanje |
| 4. Kondenzatorski motor a (30...600 W) b (0,1...0,5 W) | | a Strojevi za pranje, klima-uredaji, pumpe, ventilatori b Mjerni i regulacijski uredaji | 13. Univerzalni motor za konstantnu brzinu (1...300 W) | | Pisači strojevi, računski strojevi, projektori, kamere |
| 5. Dvokapacitetni motor (30...600 W) | | Strojevi za pranje, klima-uredaji, kompresori, pumpe, hladnjaci | 14. Repulzioni motor (100...600 W) | | Kompresori, pumpe, klima-uredaji, uredaji za otvaranje vrata |
| 6. Trofazni motor jednofazno priključen s kondenzatorom (100...600 W) | | Otvaramje vrata, transportni uredaji, stolarski strojevi, mali alatni strojevi | 15. Poredni ili kompaundni istosmjerni motor (30...600 W) | | Ventilatori, pumpe, hladnjaci, kompresori |
| 7. Jednofazni asinhroni motor s kratkospojnom pomoćnom fazom (0,3...30 W) | | Ventilatori za projektore, upravljanje ventila, klimatizacijski uredaji, aparati za sušenje kose, gramofoni | 16. Serijski istosmjerni motor (6...25 W) | | Ventilatori |
| 8. Motor Ferraris (do 70 W) | | Sistemi upravljanja i regulacije | 17. Istosmjerni motor s permanentnim magnetima (do 5 W) | | Mjerni i regulacijski uredaji (kao motor i kao tahogenerator), ventilatori, igračke, gramofoni, magnetofoni |
| 9. Histerezni motor brzohodni (0,1...100 W) sporohodni (0,005...0,6 W) | | Satni mehanizmi, vremenski releji, programatori za štednjake, magnetofoni, računski strojevi, giroskopi | 18. Beskolektorski istosmjerni motor (do 1 W) | | Magnetofoni, gramofoni, mijerni i regulacioni uredaji |

$$M = K \sin(\alpha_d - \alpha_p),$$

pa će rotor prijemnika mirovati tek kad dođe u položaj jednak položaju rotora davača (sl. 293 a). U drugom slučaju rotor prijemnika nije napajan strujom; napon koji u njemu inducira polje statora mijenja se s kosinusom kutne razlike:

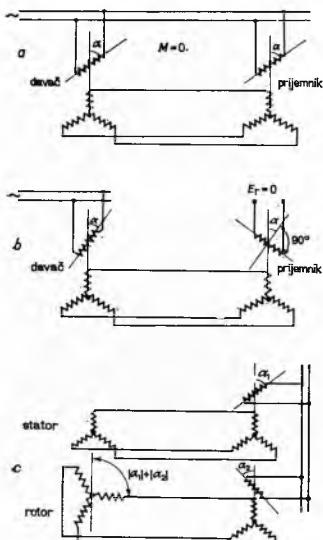
$$E_r = E_{r \max} \cos(\alpha_d - \alpha_p),$$

pa se može upotrijebiti za indikaciju položaja ili kao ulazni sig-

nal za pojačalo koje aktivira odgovarajući servomotor (sl. 293 b). Ovi načini primjene često se nazivaju *indikatorskim* i *transformatorskim*.

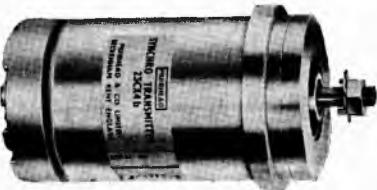
Diferencijalni selsin ima trofazni namot i na statoru i na rotoru. Ako se stator napaja iz statora jednog davača (kut α_1), a rotor iz statora drugog davača (kut α_2), rotor diferencijalnog selsina postavit će se u položaj u kojem je kut $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ (sl. 293 c).

Selsini se grade za snage od nekoliko vata do nekoliko desetaka vata. Na davač veće snage može se priključiti i veći broj



Sl. 293. Shema selsina za različne primjene: a za synchroni prenos kutnih položaja, b za indikaciju kutnih položaja ili prenos ulaznog signala za pojačalo, c selsin u diferencijalnoj sprezi

je malen prema naponu transformacije (oko 1 V/300 o/min prema 10 pa do 150 V), te se može u razmatranjima zanemariti. Izgled selsina prikazuje sl. 294.



Sl. 294. Izgled selsina

LINEARNI MOTORI

Često se traži da rezultantno gibanje elektromotornog pona bude linearno. Rotaciono se gibanje elektromotora može pretvoriti u linearno manje ili više komplikiranim mehanizmima koji sadrže upučanike, pužnike, ekscentre, koljenčaste prigone itd. Linearni motori izravno proizvode linearno gibanje, pa uštedjuju pretvorbu koja zahtijeva skupe uređaje i skopčana je s gubicima energije.

Linearno višefazno polje. Ako obod statora i rotora velikog stroja s vrlo mnogo polova i s višefaznim namotom zamislimo razvit u ravnninu, kružno gibanje rotora prema statoru pretvorit će se u linearno, a okretno polje koje se gibalio sinhronom brzinom pretvorit će se u polje koje linearno napreduje uzduž razvijenog namota i za trajanja jedne pune periode izmjeničnog narinutog napona prevali razmak jednak dvostrukom polnom koraku $2\tau_p$. Sinhrona obodna brzina je prema tome

$$v_s = 2f\tau_p.$$

»Rotor« se pri tome može svesti na ravnu masivnu ploču obloženu bakrom. Stator može biti jednostruk kao na sl. 295 a, ili dvostruk kao na sl. 295 b. Ovo posljednje je povoljnije, jer se mogu kompenzirati magnetske sile okomite na smjer gibanja. Umjesto beskonačno dugačkog razvijenog oboda dosta je uzeti samo dužinu od nekoliko polnih koraka; što ih je više to će manje utjecati rubne pojave na mjestu gdje je stator ili rotor prekinut. Prema načinu na koji se

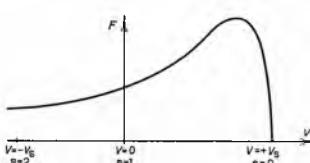
Sl. 295. Shematski prikaz električnog motora s razvijenim obodom statora (1) i rotora razvijenim u traku (2). a Stroj s jednostrukim statorom, b stroj s dvostrukim statorom

»stator« i »rotor« jedan prema drugome relativno gibaju, razlikuju se linearni motori s *progresivnim gibanjem* i linearni motori s *oskulatornim gibanjem*.

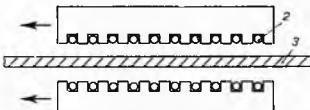
Linearni motori s progresivnim gibanjem. Ako se u linearnom višefaznom polju koje se giba sinhronom brzinom v_s nađe sekundarni dio analogan rotoru, koji se giba brzinom v , može se definirati njegovo klizanje izrazom

$$s = \frac{v_s - v}{v_s},$$

analognog kao pri asinhronom motoru. Sekundarni dio može biti masivna željezna ili bakrena ploča, željezna ploča obložena bakrom, ili bakreni pomicni dio oko željezne tračnice. U posebnim slučajevima može pomicni dio biti rastaljeni metal koji treba transportirati. Takav sekundarni dio analogan je kaveznom rotoru rotacionog asinhronog motora, pa se na analogan način može izvesti i karakteristika koja prikazuje silu u ovisnosti o relativnoj brzini pomicnog dijela prema mirnom (sl. 296).



Sl. 296. Karakteristika motora s progresivnim gibanjem pokazuje ovisnost sile F o relativnoj brzini između mirnog i pomicnog dijela. v Brzina 'rotora', v_s sinhrona brzina, s klizanje



Sl. 297. Shematski prikaz motora s progresivnim gibanjem s pomicnim primarom. 1 Lameliirani paket, 2 namot, 3 mirujuća tračnica



Sl. 298. Primjena linearnog motora s progresivnim gibanjem na skijaškoj uspinjači

U praktičnoj izvedbi moguće su različite kombinacije. Obično se uzima »kratki« uzvodni dio (primar) s namotima i »dugački« sekundarni koji nadomešta kavez, pri čemu može biti pokretan ili jedan ili drugi dio.

Pomicni primar prikladan je, npr., za vozila, gdje tračnica po kojoj se vozilo kreće ujedno služi kao sekundar (sl. 297). Višedijelna tračnica može istovremeno služiti za dovod struje namotima primara. Prednost je ovakvog pogona vozila, između ostalog, neovisnost vučne ili kočne sile o trenju kotača na tračnici. Slični uređaji upotrebljavani su za katapultiranje aviona s kratkim usletišta, za pogon vlakova itd.

Prijevodi linearne energije s progresivnim gibanjem na skijaškoj uspinjači prikazuje sl. 298.

Obrat toga predstavlja *čvrsti primar*, a pomicni sekundar, koji može izvoditi ograničeni pomak u jednom ili drugom smjeru,

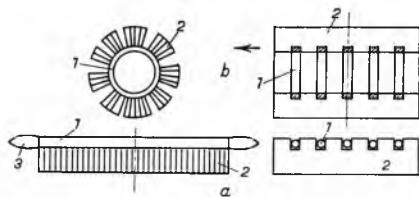


Sl. 299. Shematski prikaz motora s progresivnim gibanjem pomicnog sekundara u obliku beskonačne trake. 1 Mirujući primar, 2 beskonačna traka

Ako se umjesto sekundara predviđi zatvoren kanal koji je dobro termički izoliran, linearni motor može raditi kao pumpa za rastaljeni metal.

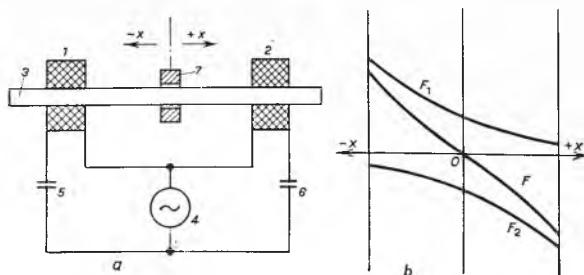
Dalja je varijanta *cijevni linearni motor*, koji nastaje preoblikovanjem normalnog linearnog statora (sl. 300 a) u cijev (sl. 300 b). Lameliirani paket 2 pri tome se rastavlja na nekoliko parcijalnih paketa, vodići 1 prelaze u pune kružne zavoje, a glave namota 3 postaju suvišne. Ovakvi motori prikladni su za linearne indukcijske pumpe, ali i za servomehanizme, gdje pomicni dio u obliku

okrugle motke obavlja jednokratne pomake u jednom ili drugom smjeru.

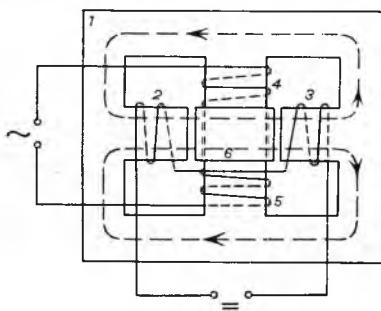


Sl. 300. Preoblikovanje linearnega statora (a) v stator cijevnega oblika (b). 1 Namot, 2 lamelirani paket, 3 glava namota

Motori s oscilatornim gibanjem. Na vodilici od feromagnetskog materijala 3 (sl. 301 a) nalaze se nepomični svici 1 i 2 napajani iz izvora izmjeničnog napona 4 preko kondenzatora 5 i 6. Pomični dio 7 izveden je kao vodljiv prsten. Struje inducirane u njemu uzrokuju uvejek sile koje ga odbijaju od primarnog svitka 2, odn. 3, a koje se smanjuju s udaljenosću. Sila prema svitku 1 i prema svitku 2, kao i ukupna sila F prikazane su na sl. 301 b. Sile vraćaju pomični dio 7 u srednji položaj, poput opruge koja sa zamašnim masama čini titrarni sistem. U slučaju



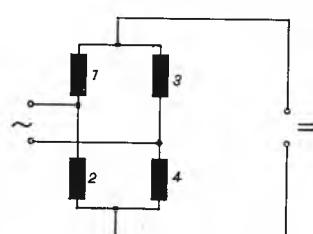
Sl. 301. Motor s oscilatornim gibanjem. a Shematski prikaz, b karakteristika motorja; 1 i 2 nepomični svici, 3 vodilica, 4 izvor izmjenične struje, 5 i 6 kondenzatori, 7 pomični dio, F_1 sila zbog djelovanja svitka 1, F_2 sila zbog djelovanja svitka 2, F rezultantna sila



Sl. 302. Načelna shema sinhronog oscilatornog motora. 1 Jezgra, 2 i 3 namoti uzbudeni istosmjernom strujom, 4 i 5 namoti napajani izmjeničnom strujom, 6 kratkospojni svitak

rezonancije nastaje oscilatorno gibanje amplitude do dvadesetak centimetara, a frekvencije npr. 15 Hz. Motori na ovom principu mogu se graditi sa mnogo svitaka i pomičnih elemenata na istoj vodilici, a prikladni su za upotrebu u tekstilnoj industriji.

Sinhroni oscilatorni motor prikazan je na sl. 302. Na jezri 1 nalaze se svici 2 i 3 uzbudeni istosmjernom strujom. U istosmjernom polju nalazi se kratkospojni svitak 6, u kojemu uzbudni namoti 4 i 5, napajani izmjeničnom strujom, induciraju izmjenični napon. Taj napon u svitku 6 uzrokuje pulzirajuću silu, pa se svitak 6 oscilatorno giba sinhrono s narinutim izmjeničnim naponom.

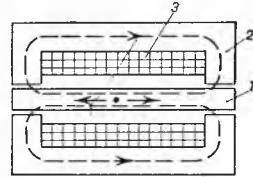


Sl. 303. Shema sinhronog oscilatornog motora po Tustinu. 1...4 Svici napajani istosmjernom izmjeničnom strujom

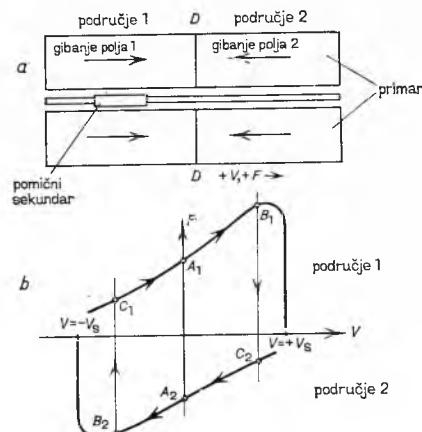
Sinhroni oscilatorni motor po Tustinu radi na istom principu. Za uzbudu istosmjernom i izmjeničnom strujom služe isti svici, prema shemi na sl. 303. Pomični dio sastoji se od slojevitog poredanih željeznih i bakrenih prstena. Istosmjerna uzbuda stvara polje u rasporu, a izmjenična uzbuda inducira u bakrenim prstenima struje koje daju pulzirajuću silu te uzrokuju oscilatorno gibanje pomičnog dijela.

Marinescuov oscilatorni motor napaja također jedan isti uzbudni namot superponiranom istosmjernom i izmjeničnom strujom, pri čemu jezgra izvodi oscilatorno gibanje (sl. 304.)

Oscilatorni linearni indukcioni motor prikazan je shematski na sl. 305 a. Stator linearnega motora sastavljen je od dva dijela koji daju suprotni smjer kretanja višefaznog polja prema dodirnoj ravnini D—D. Ako se kao pozitivni smjer brzine i sile uzme smjer slijeva nadesno, karakteristika sile u ovisnosti o brzini izgledat će kako je prikazano na sl. 305 b. Brzina pomičnog dijela kreće se počevši od mrtvog položaja na lijevoj strani — kada je brzina nula — od A_1 do B_1 , gdje prelazi na desnu stranu u tačku C_2 , pa preko A_2 (krajnji desni položaj) do B_2 i opet na lijevu stranu



Sl. 304. Shematski prikaz Marinescuova oscilatornog motora. 1 Jezgra, 2 lamelirani paket, 3 namot



Sl. 305. Oscilatorni linearni indukcioni motor.
a Shematski prikaz, b karakteristika

do C_1 . Pomični dio oscilira. Kako je električno kočenje C_1-A_1 i C_2-A_2 vezano uz znatne gubitke u pomičnom dijelu, pogodno ga je posprešiti oprugama koje s jedne, odn. druge strane dočekuju pomični dio.

Linearni disk-motor. Ako se kao rotor upotrijebi okrugla ploča, a uz nju jedan segment linearnega statora ili više njih, dobiva se motor s rotacionim gibanjem. Izborom dimenzija statorskih segmenata i rotora može se osnovna brzina takvog motora po volji odabrat. To — uz laku zamjenljivost dijelova — prednost je takvih motora.

R. Wolf

LIT.: F. Moeller, Gleichstrommaschinen, Leipzig 1943. — C. Veinott, Fractional horsepower electric motors, New York 1948. — A. E. Алексеев, Конструкция электрических машин, Москва 1949. — M. П. Костенко, Электрические машины, Москва 1949. — R. Richter, Elektrische Maschinen, Bd. 1—4, Basel 1951—1954, Bd. 5, Berlin 1950. — W. Nürnberg, Die Asynchronmaschinen, Berlin 1952. — W. Schuisky, Induktionsmaschinen, Wien 1957. — M. G. Schülikin, Elektromotorische Antriebe, Berlin 1957. — C. Carr, Electric machinery, New York 1958. — M. G. Say, The performance and design of alternating current machines, London 1958. — J. Pustola, T. Siwiński, Kleine Einphasenmotoren, Berlin 1961. — A. E. Fitzgerald, Ch. Kingsley, Električne mašine, Beograd 1962. — Th. Bödefeld, H. Sequenz, Elektrische Maschinen, Wien 1965. — E. Wiedemann, W. Kellenberger, Konstruktion elektrischer Maschinen, Berlin 1967. — L. M. Piotrovski, Električni strojevi (prijevod s ruskoga), Zagreb 1967. — C. K. Jones, The unified theory of electric machines, London 1967. — G. Müller, Elektrische Maschinen, Leipzig 1967. — R. Richter (Herausg.), Elektrische Maschinen, Bd. 1, Basel-Stuttgart 1967. — M. Kostenko, L. Piotrovsky, Electrical machines, 1 vol., Moscow 1968 (Dopravni prijevod ruske knjige: M. П. Костенко, Л. М. Пиотровский, Электрические машины, Москва 1968). — M. Staff, Electrodynamics of electric machines, London 1968. — A. I. Vasil'ev, Elektricheskie masziny, Leningrad 1969.

A. Dolenc B. Frančić B. Jurković Z. Širotić R. Wolf