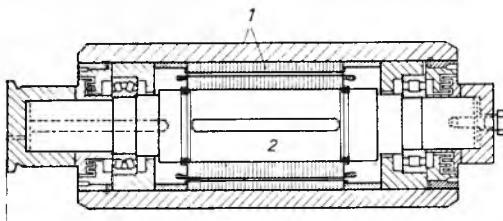


ELEKTROMOTORNI POGON (elektromotorni zagon), pokretanje radnog stroja ili grupe radnih strojeva pomoću elektromotora; također onaj dio radnog stroja ili postrojenja kojim se to pokretanje obavlja. Elektromotorni pogon sačinjavaju četiri osnovna elementa: 1. elektromotor, 2. radni mehanizam, 3. elementi koji spajaju elektromotor s radnim mehanizmom, 4. elementi kojima se elektromotorni pogon priključuje na izvor električne energije i kojima se elektromotorni pogon regulira ili se njime upravlja.

Ponekad svi ti elementi nisu jedan od drugog vidljivo odvojeni, npr. u valjaoničkoj kotrljači gdje je radni mehanizam ujedno i rotor motora, a stator je ugraden na osovini (sl. 1).



Sl. 1. Valjaonička kotrljača s ugradenim elektromotorom kao primjer specijalno gradjenog elektromotora. 1 Rotor, 2 stator

Elektromotorni pogon danas potiskuje druge motorne pogone gdjegod se elektromotor može primijeniti. Elektromotor se uvodi i u neke pogone gdje je već drugim motorom stvorena mogućnost iskorištenja mehaničkog rada, npr. u dizel-električnoj lokomotivi ili pri dizel-električnoj i turbinsko-električnoj propulziji brodova. U području cestovnog saobraćaja, gdje danas dominiraju toplinski motori s unutrašnjim sagorijevanjem, vrše se neprestana istraživanja radi primjene elektromotornog pogona.

Tri su osnovne prednosti po kojima elektromotori nadmašuju ostale davaoce rada: vrlo velika ekonomičnost (korisnost do 98%), neposredna spremnost za pogon uz puno opterećenje i izvanredna prilagodljivost radnom mehanizmu, tehnološkom procesu i općim uvjetima okoline. Elektromotori se općenito mogu proizvoditi za široku skalu brzina vrtnje, za konstantni i jednolični moment, za kratkotrajna i trajnija velika preopterećenja, zatim za različite specijalne režime rada, za uvjete zagadene atmosfere pune vlage, agresivnih i eksplozivnih plinova i prašine. Brzina vrtnje može se pojedinim vrstama elektromotora podešavati u širokim granicama posredstvom jednostavnih vanjskih elemenata; ona se može i automatski regulirati u ovisnosti o različitim parametrima tehnološkog procesa ili po zadanim programima, ako se motorima dodaju prikladni regulacioni ili upravljački elementi. Određeni radni proces može se ostvariti bilo jednim motorom bilo većim brojem njih; može se i više radnih procesa obavljati jednim motorom, a pojedini radni procesi mogu se također grupirati i njima grupno upravljati. Tome znatno doprinosi relativno mala mehanička i električna tromost elektromotora i, općenito, mogućnost da se električna energija po volji fino raspodijeli i jednostavno dovodi potrošaču. Mjerjenje je potrošnje energije jednostavno, a pogon je čist, ugodan i jednostavno se poslužuje. U zračnom i cestovnom saobraćaju danas dominiraju motori s unutrašnjim sagorijevanjem, ali su i tamo nezamjenljivi neki elektromotorni pogoni, uglavnom za pokretanje i upravljanje.

Prvi elektromotorni pogoni bili su vrlo jednostavni, kao i sami elektromotori. Motori su u trajnom, stacionarnom stanju tjerali radni mehanizam konstantnom brzinom vrtnje. Zaletu motora posvećivalo se samo toliko pažnje koliko je to trebalo za dovodenje pogona u radnu brzinu, a ostala dinamička stanja nisu se iskorišćavala. S razvojem tehnike, općenito, rasla je također primjena elektromotornog pogona i pred elektromotorne pogone stavljeni su novi zadaci. Traži se da se mehanički rad daje u određenom kvalitetu, vremenski i količinski programiran novim radnim mehanizmima. Sve više elektromotornih pogona obavlja cikluse radnih operacija u kojima osim statičkih ima i različnih dinamičkih stanja (zalet, kocenje, ubrzanje), ili čak samo dinamička stanja, tako da je elektromotor stalno u stanju prelazne pojave. S vremenom nastaje i obrat: razvoj tehnike gradnje elek-

tromotora stvara nove mogućnosti za skraćenje i poboljšanje tehnoloških procesa koje elektromotorni pogoni obavljaju. Na kraju su se u razvoju ustalile dvije tendencije: razvija se gradnja različnih vrsta normalnih motora, s jedne strane, i gradnja specijalnih motora za odredene procese, s druge strane. Razvoj upravljačkih elemenata elektromotornog pogona doveo je do sistema (automatske) regulacije i do automatizacije pojedinih operacija i radnih procesa, pa i automatizacije čitavih tvornica. Tako se je iz problematike elektromotornih pogona razvilo i nekoliko novih tehničkih disciplina.

VRSTE I SVOJSTVA ELEKTROMOTORNIH POGONA

Sistematisacija elektromotornih pogona u posljednje se vrijeme znatno promjenila. Do četrdesetih godina ovog stoljeća ona se poklapala uglavnom sa sistematisacijom industrijskih grana, te su se razlikovali elektromotorni pogoni u metalurgiji, brodarstvu, rudarstvu, različitim industrijama, itd. Međutim, neki radni mehanizmi, iako se upotrebljavaju u različitim granama proizvodnje, prometa itd., imaju isti karakter tehničkih parametara (statička i dinamička stanja, ciklusi operacije, itd.), pa je pogodnije elektromotorne pogone sistematizirati u grupe s istom tehničkom problematikom, bez obzira na to u kojoj se grani privrede primjenjuju. Takva je sistematisacija primijenjena i u ovom članku. Tehnička problematika u vezi je s karakterističnim svojstvima radnih mehanizama, s jedne strane, i elektromotora, s druge strane, te karakterističnim svojstvima elektromotornog pogona koja se ispoljavaju u uzajamnom djelovanju elektromotora i radnog mehanizma.

B. Jurković

Karakteristična svojstva radnih mehanizama. Pod *momentom tereta (M_t)* radnog mehanizma razumijeva se moment na osovinu tog mehanizma koji je uzrokovan korisnim otporima (vršenjem radnog procesa) i štetnim otporima (gubicima). Moment tereta najčešće se suprotstavlja gibanju, ali ga ponekad i potpomaže. Zato se razlikuju potencijalni i reaktivni moment tereta. *Potencijalni moment tereta*, čije je djelovanje ovisno o potencijalnoj energiji sistema, zadržava smjer djelovanja neovisno o smjeru vrtnje; pri jednom smjeru vrtnje on se suprotstavlja momentu pogonskog motora, a pri suprotnom smjeru vrtnje on ga potpomaže. Potencijalni moment tereta imaju mehanizmi za dizanje i spuštanje tereta, za stiskanje ili rastezanje opružnih sistema. *Reaktivni moment tereta* uvijek mijenja smjer djelovanja kad se mijenja smjer gibanja. Takav moment tereta imaju npr. mehanizmi za električnu vuču i alatni strojevi.

Moment tereta radnih mehanizama ovisi o brzini vrtnje, o putu, o vremenu, o specifičnostima tehnološkog procesa i o drugim faktorima. Prema tome kako se mijenja moment tereta, radni se mehanizmi mogu svrstati u četiri grupe kako slijedi: a) mehanizmi kojima je moment tereta funkcija brzine vrtnje: $M_t = f(\omega)$, $M_t = f(n)$, npr. teretne dizalice, liftovi, transportne trake i uređaji, centrifugalne pumpe i kompresori, propulzioni uredaji, predionički stanovi, ljuštilice; b) mehanizmi kojima je moment tereta funkcija brzine vrtnje i vremena: $M_t = f(n, t)$, pri čemu ovisnost o vremenu može biti dana programom ili biti slučajna, kako je to pri električnoj vuči, izvoznim dizalicama, valjačkim stanovima, alatnim strojevima; c) mehanizmi kojima moment tereta ovisi, osim o brzini vrtnje, i o kutu zakretanja rotirajućeg dijela mehanizma ili rotora elektromotora: $M_t = f(n, \alpha)$, npr. klipni kompresori i pumpe, rudničke dizalice bez uravnoteženja, kovački strojevi, škare za rezanje metala, preš, mlinovi čekićari; d) mehanizmi kojima moment tereta ovisi, osim o brzini vrtnje i vremenu, još i o drugim veličinama (putu, položaju, materijalu i procesima u njemu, itd.): $M_t = f(n, t, \dots)$. Takvi mehanizmi nisu mnogobrojni, a svaki od njih ima svoje specifičnosti (centrifuge, strojevi za obradu kože, gnjetilice u industriji gume, i sl.). Više od 90% svih radnih mehanizama idu u grupe a) i b).

Ovisnost momenta tereta o brzini vrtnje radnog mehanizma naziva se *mehaničkom karakteristikom* radnog mehanizma. Ta se ovisnost može prikazati izrazom

$$M_t = M_0 + \psi(M_{tn} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^r,$$

gdje je M_0 moment trenja, M_{tn} nazivni moment tereta radnog

mehanizma, ψ faktor opterećenja, a ω i ω_n trenutna i nazivna kutna brzina vrtnje.

Prema eksponentu γ u gornjoj relaciji mogu se razlikovati različiti oblici mehaničke karakteristike radnih mehanizama, kako je navedeno u nastavku.

a) Vrlo su česti mehanizmi čiji moment tereta nastaje uslijed trenja; njima moment tereta ne ovisi o brzini vrtnje, pa je $\gamma = 0$

(karakteristika 1 na sl. 2). Među ovakve mehanizme idu dizalični mehanizmi, transportni uređaji s konstantnim teretom, valjački stanovi. b) Mali je broj mehanizama čiji je moment tereta M_t linearno ovisan o brzini vrtnje, $\gamma = 1$ (sl. 2, karakteristika 2); takav je mehanizam npr. mortalica za papir ili metal. c) Česti su mehanizmi kojima je moment tereta M_t nelinearno ovisan o brzini vrtnje (najčešće im je $\gamma = 2$; sl. 2, karakteristika 3, zvana ventilatorska). U tu grupu idu centrifugalne pumpe, kompresori i ventilatori, zatim propulsioni uređaji i sl. d) Susreću se i mehanizmi (konstantne snage) čiji je moment tereta obratno proporcionalan brzini vrtnje, $\gamma = -1$ (sl. 2, karakteristika 4). Taj se slučaj pojavljuje pri ljuštيلicama, kalanderima, strojevima za obradu metala, itd.

Karakteristična svojstva elektromotora. Prikladnost elektromotora za elektromotorne pogone može se utvrditi na osnovu njihovih mehaničkih karakteristika, sposobnosti za kočenje i drugim svojstvima koja ovise o vrsti motorâ, načinu njihova spašanja, izvedbi i drugim utjecajima.

Elektromotor, kao aktivni dio elektromotornog pogona, treba da osigura najprikladniji rad sistema u stacionarnim i prelaznim režimima (zaletu, kočenju, promjeni opterećenja ili drugih utjecajnih veličina). Njih određuje u prvom redu mehanička karakteristika motora (vanjska karakteristika motora), koja prikazuje ovisnost brzine vrtnje o momentu na osovini motora, $\omega = f(M_m)$ ili $n = f(M_m)$. Ona služi kao osnovni kriterij pri izboru vrste motora za radni mehanizam. Motor radi na tzv. *prirodnoj karakteristici* pri nazivnim veličinama. Mijenjaju li se vanjskim zahvatom uvjeti napajanja, ili se dodavanjem otpora u strujne kruge elektromotora, ili uopće promjenom spoja, mijenja ovisnost brzine vrtnje o momentu na osovini motora, mijenja se mehanička karakteristika motora i prelazi iz prirodne u *izvedenu* (vjestačku, podešenu). Većina elektromotora ima padajuću karakteristiku.

Kako je gradijent promjene brzine vrtnje s obzirom na promjenu momenta u raznovrsnim motorima različit, oni se mogu svrstati u više grupe (sl. 3). Apsolutno tvrdu mehaničku karakteristiku imaju motori kojima brzina vrtnje ostaje konstantna kad se mijenja vanjski moment tereta (sl. 3, krivulja 1). Takvu karakteristiku ima sincroni elektromotor. Tvrdu mehaničku karakteristiku (sl. 3, krivulje 3 i 2) imaju elektromotori kojima se brzina vrtnje neznatno mijenja s promjenom

Sl. 3. Različiti oblici mehaničkih karakteristika elektromotora. 1 Apsolutno tvrdi karakteristika, 2 i 3 tvrdi, 4 i 5 meki karakteristika

opterećenja. Među ove idu: istosmjerni poredni, asinhroni (u području malih klizanja) i kolektorski izmjenični poredni motori. Mijenja li se znatno brzina vrtnje s promjenom opterećenja (brzina vrtnje pada kad teret raste), motor ima mekanu mehaničku karakteristiku. Takvu prirodnu karakteristiku imaju svi serijski uzbudeni (sl. 3, krivulja 5) i kompaundirani (sl. 3, krivulja 4) motori, a i motori kojima je karakteristika prirodno tvrdi, pa je dodatnim otporima izmijenjena u mekanu.

Karakteristična svojstva elektromotornih pogona. Pri razmatranju tih svojstava, koja se ispoljavaju u uzajamnom djelovanju elektromotora i radnog mehanizma, treba u prvom redu razlikovati rad elektromotornog pogona u stacionarnom stanju od njegovog rada u dinamičkom stanju.

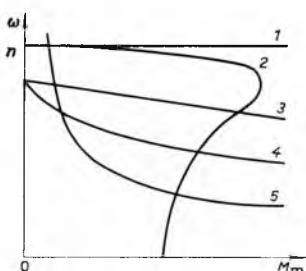
Kad se pri radu pogona veličine karakteristične za stanje (mehaničke veličine kao brzina vrtnje, moment tereta, moment motora; električne veličine kao struja, napon, otpor, induktivitet, gubici) u bilo kojoj tački sistema vremenski ne mijenjaju, elektromotorni pogon nalazi se u *stacionarnom (statickom) pogonskom stanju*. U tom stanju suma momenata na osovini jednaka je nuli; moment motora M_m i moment tereta radnog mehanizma M_t prema tome su jednakci: $M_m = M_t = 0$, $M_m = M_t$. Radnu tačku u dijagramu M, ω određuje u tom slučaju sjecište mehaničkih karakteristika motora i radnog mehanizma (sl. 4, tačka ω_1 na M_{t1} za ventilatorski pogon; ω_2 na M_{t2} za dizalični pogon).

Promijeni li se moment tereta, automatski se mijenjaju moment i brzina vrtnje motora, a nakon prelazne pojave elektromotorni pogon produžava rad u drugoj stacionarnoj tački. Tako na sl. 4 dizalični pogon iz tačke M_{t2} , ω_2 pri novom opterećenju M_{t3} prelazi nakon nekog vremena u novu radnu tačku M_{t3} , ω_3 . To svojstvo prilagodavanja teretu daje elektromotoru prednost pred drugim vrstama pogonskih strojeva (parnim strojem, motorom s unutrašnjim sagorijevanjem).

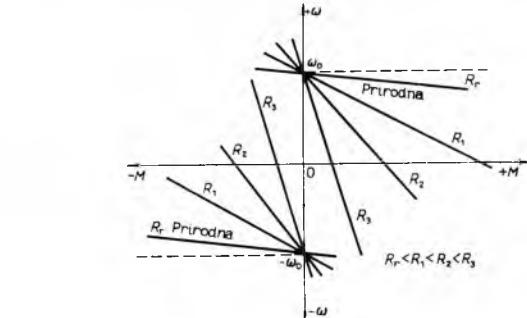
U modernim elektromotornim pogonima stalno se ponavljaju pokretanje, kočenje i reverziranje (promjena smjera vrtnje). Brzina i tačnost tih operacija često određuju produktivnost radnog mehanizma, a nerijetko i kvalitet produkta. Pri tome se sve fizikalne veličine karakteristične za stanje elektromotornog pogona vremenski mijenjaju; pogon se nalazi u *dinamičkom pogonskom stanju*. (Kraće se govori o dinamičkom pogonu.)

U nastavku navode se karakteristična svojstva elektromotornih pogona s različitim vrstama motora kao aktivnim elementima.

Elektromotorni pogon s istosmjernim nezavisno uzbudjenim motorom. Istosmjerni nezavisno uzbudeni elektromotor (poredni motor) ima mehaničku karakteristiku koja je pravac (uz pretpostavku da stroj ima pomoćne polove, da je kompenziran ili da se zanemaruje reakcija armature). Analitički izraz te karakteristike glasi: $\omega = \frac{U}{c} - \frac{R}{c^2} M = \omega_0 - \Delta\omega$ (gdje je $c = k\Phi$ konstruktivna konstanta stroja, U narinuti napon, R ukupni otpor armaturnog kruga, ω_0 idealna kutna brzina vrtnje praznog hoda, a $\Delta\omega$ promjena brzine. Varirajući veličine U , R i Φ može se postići bezbroj mehaničkih karakteristika. Mijenja li se



Sl. 3. Različiti oblici mehaničkih karakteristika elektromotora. 1 Apsolutno tvrdi karakteristika, 2 i 3 tvrdi, 4 i 5 meki karakteristika



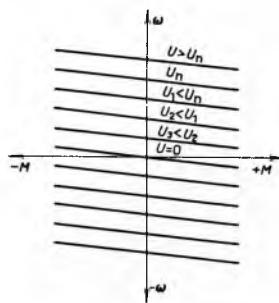
Sl. 4. Stacionarna brzina vrtnje uspostavljena se u raznim tačkama ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$) koje leže se u sjecištu mehaničkih karakteristika motora (M_m) i karakteristika pripadnih radnih mehanizama (M_{t1}, M_{t2}, M_{t3})

otporni R uz konstantan napon i konstantnu uzbudu, dobiju se mehaničke karakteristike kao na sl. 5. Nagib pravca je to veći što je veći ukupni otpor R_1, R_2, R_3 u rotorskog kruga.

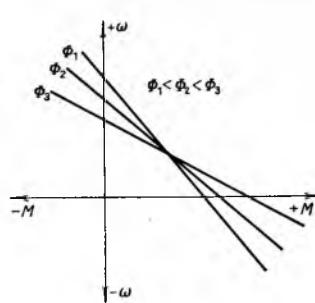
Nagib karakteristike je to veći što je veći ukupni otpor R_1, R_2, R_3 u rotorskog kruga bez dodatnog otpora

otporni R uz konstantan napon i konstantnu uzbudu, dobiju se mehaničke karakteristike kao na sl. 5. Nagib pravca je to veći što je veći ukupni otpor R_1, R_2, R_3 u rotorskog kruga.

rodna karakteristika s oznakom R_t (bez dodatnog otpora) ima najmanji nagib. Ako se mijenja narinuti napon, a otpor rotorskog kruga i magnetski tok su konstantni, dobije se porodica pravaca paralelnih u svim kvadrantima (sl. 6). Na sl. 5 i 6 prikazane su karakteristike za oba smjera vrtnje. Drže li se narinuti



Sl. 6. Mechanicke karakteristike istosmjernog nezavisno uzbudjenog motora uz $\Phi = \text{konst.}$, $R = \text{konst.}$, a za razlicite narinute napone

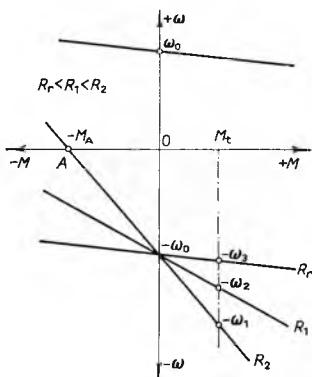


Sl. 7. Mechanicke karakteristike istosmjernog nezavisno uzbudjenog motora sa $U = \text{konst.}$, $R = \text{konst.}$, $\Phi = \text{konst.}$

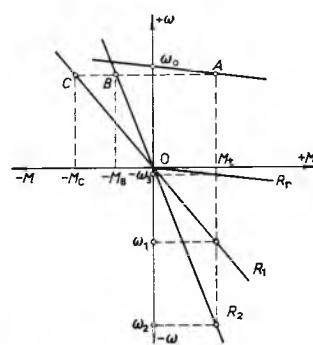
napon i otpor rotorskog kruga nepromijenjenima, a mijenja se magnetski tok Φ (sl. 7), karakteristike ostaju pravci, ali se mijenja i brzina vrtnje idealnog praznog hoda (obrnuto proporcionalno magnetskom toku) i nagib pravca (obrnuto proporcionalno kvadratu toku). Smanjenje magnetskog toka (povećanje brzine vrtnje) ograničava komutaciju. Normalno građeni strojevi mogu povećati brzinu vrtnje 30...100% iznad nazivne (ovisno o konstrukciji), a posebno građeni i do 200%.

Istosmjerni nezavisno uzbudeni motor može kočiti u različnim režimima: u režimu generatorskog, elektrodinamičkog i protustrujnog kočenja.

Generatorsko kočenje s vraćanjem energije u mrežu (rekuperativno) nastaje kad se motor vrti kutnom brzinom većom od ω_0 , a njegova elektromotorna sila (EMS) postane veća od napona mreže (izvora). Pri tome struja teče u mrežu, a motor predaje energiju mreži kao generator. To se događa u slučaju prikazanom na sl. 8, kad se dizalicom spušta teret, a moment motora razvija isti smisao vrtnje kojim se kreće i radni mehanizam (s poteznim momentom M_A) motor ubrzava radni mehanizam do brzine ω_0 , a onda počne kočiti i postigne kutnu brzinu vrtnje ω_1 , ω_2 ili ω_3 . Generatorsko kočenje je ekonomično (vraća energiju kočenja u mrežu), sigurno i jednostavno (motorski režim prelazi u kočni bez prespajanja), ali se može upotrijebiti samo u područjima velikih brzina (iznad ω_0).



Sl. 8. Generatorsko kočenje pri spustanju tereta dizalicom

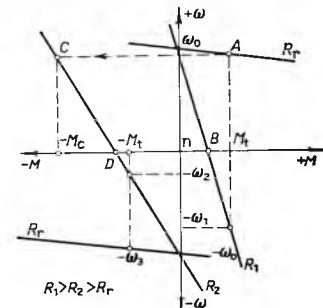


Sl. 9. Elektrodinamičko kočenje istosmjernim nezavisno uzbudjenim strojem

Elektrodinamičko kočenje nastupa ako se motor u vrtnji odvoji od mreže i spoji na otpornike, ali s istom uzbudom kao u rotorskom režimu. Mehaničke karakteristike prolaze ishodištem koordinatnog sistema (sl. 9), a nagib pravca ovisan je o veličini otpora u rotorskog kruga. Neka motor radi u tački A. Prede li se na elektrodinamičko kočenje, motor će početi kočenje s kočnim momentima M_B ili M_C i zaustaviti se (tačka O) u slučaju reaktiv-

nog momenta; ako radni mehanizam ima potencijalni moment, stroj će, pošto se zaustavi, početi da se vrti u suprotnom smjeru i postići kutnu brzinu vrtnje $-\omega_1$ ili $-\omega_2$, odnosno $-\omega_3$ ako se isključe dodatni otpori. Energija kočenja pretvara se u toplinu u otpornicima i u motoru. Elektrodinamičkim kočenjem postiže se postepeno i ekonomično kočenje bez udaraca (iz mreže uzima samo uzbudnu energiju).

Protustrujno kočenje (kontriranje, kočenje u protuspoju) nastaje kad se motor okreće uslijed kinetičke ili potencijalne energije suprotno momentu koji razvija. Dvije su mogućnosti prikazane na slici 10: na dizalicom uredaju (potencijalni moment tereta) motor radi u tački A. Doda li se dovoljno otpora (karakteristika R_1) motor se uspori i zaustavlja u tački B, a zatim reverzira te nakon izvjesnog vremena koči kutnom brzinom vrtnje $-\omega_1$. U slučaju reaktivnog momenta (blanjalica) prespajanjem stezaljki i dodavanjem otpora (karakteristika R_2) motor počinje kočenje momentom M_c do zaustavljanja (tačka D). Ako se tad ne isključi, motor će ubrzavati radni mehanizam u suprotnom smjeru do kutne brzine vrtnje $-\omega_2$, odnosno do $-\omega_3$ (nakon isklapanja svih otpora u rotorskog krugu). Protustrujno kočenje omogućava vrlo intenzivno i sigurno kočenje u svim područjima brzina vrtnje, ali je neekonomično i snažno zagrijava motor ako je dodatni otpor u rotorskog krugu mali. U praksi se često primjenjuje.



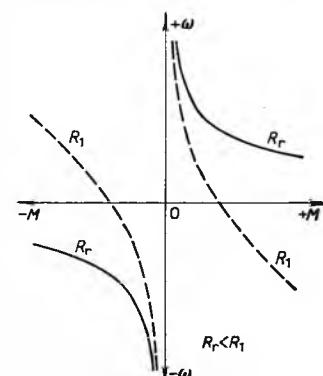
Sl. 10. Protustrujno kočenje istosmjernim nezavisno uzbudjenim strojem pri potencijalnom i reaktivnom momentu tereta

Elektromotorni pogon sa serijski uzbudjenim istosmjernim motorom. Serijski uzbudeni istosmjerni motor ima promjenljiv magnetski tok koji ovisi o momentu tereta na njegovoj osovini. Budući da je moment motora proporcionalan magnetskom toku i struji ($M = k\Phi I$), a magnetski tok proporcionalan struji ($\Phi = k' I$, ako je stroj nezasićen), analitički izraz mehaničke karakteristike serijskog motora glasi:

$$\omega = \frac{A}{\sqrt{M}} - B.$$

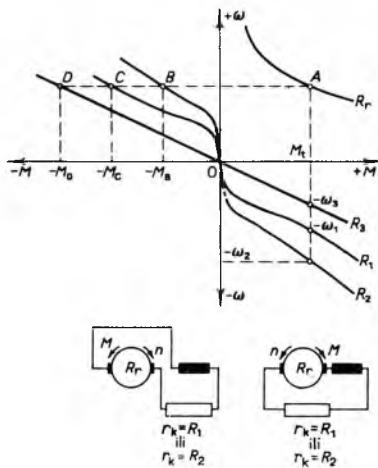
$M = k'' \Phi^2$, a A i B su konstante.

Suvremeni motori zasićeni su već u nominalnom stanju, pa je mehanička karakteristika serijskog stroja pri malim opterećenjima hiperboloidna. Brzina vrtnje naglo opada s porastom tereta na svim karakteristikama, i zato serijski motori nisu prikladni za pogone koji zahtijevaju male promjene brzine vrtnje pri većim promjenama opterećenja. No zato su vrlo prikladni za pogon gdje se zahtijeva mala brzina vrtnje pri velikom opterećenju (npr. pri vuči), i obratno. Mehaničke karakteristike ne mogu se konstruirati analitički nego samo grafički ili grafoanalitički na osnovi tehničkih podataka o strojevima [ovisnosti $n = f(I)$ i $M = f(I)$]. Pri malim opterećenjima stroj ima nedozvoljeno veliku brzinu vrtnje (5...6 puta veću od nominalne) pa se primjenjuje u elektromotornim pogonima čije je minimalno opterećenje 15...20% nazivnog. Promjena smjera vrtnje najčešće se izvodi zamjenom stezaljki rotorskog kruga, a rijetko zamjenom stezaljki uzbudnog namota.



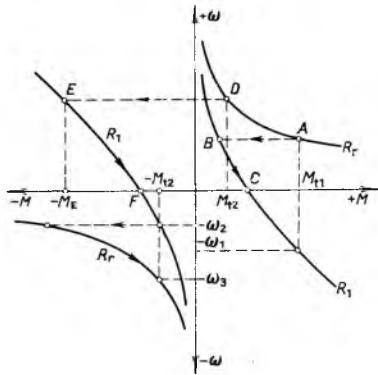
Sl. 11. Mechanicke karakteristike serijski uzbudjenog istosmjernog motora za oba smjera vrtnje

Serijski električni stroj ima vrlo loša generatorska svojstva pa se ne primjenjuje generatorsko kočenje. Rijetko se u serijskom spoju primjenjuje i elektrodinamičko kočenje (krivulje R_1 i R_2 na sl. 12), već se stroj, pri prelasku na kočenje, modificira bilo u poredni samouzbuđeni ili u nezavisni (pravac R_3). Ako



Sl. 12. Elektrodinamičko kočenje serijski uzbudjenim istosmjernim strojem

je moment tereta reaktiv, motor iz radne tačke A počinje kočiti momentom M_B , M_C ili M_D (ovisno o veličini dodatnog otpora i spoju) i zaustavlja se u tački O. U području malih brzina kočni moment naglo opada u serijskom spoju, a ravnomjerno u nezavisnom. U slučaju potencijalnog momenta tereta stroj reverzira nakon zaustavljanja i koči pri brzinama $-\omega_1$, $-\omega_2$ ili $-\omega_3$. Nagli porast kočnog momenta u serijskom spoju negativno se odražava na motor i radni mehanizam. Bolje mehaničke karakteristike daje modificirani nezavisni spoj, samo zahtijeva veliki dodatni otpor u uzbudnom krugu, pa sama uzbuda opterećuje mrežu kao cijeli motor. Mehaničke karakteristike pri protustrujnom

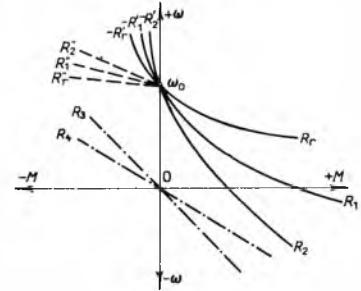


Sl. 13. Protustrujno kočenje serijski uzbudjenim istosmjernim strojem pri potencijalnom i reaktivnom momentu tereta

kočenju vide se na sl. 13. Savladava li motor u tački A potencijalni moment tereta (dizalica), on se nakon uključivanja velikog otpora počinje zaustavljati po karakteristici R_1 , reverzira u tački C i nakon ubrzanja koči pri brzini vrtanje $-\omega_1$. Što je veći otpor rotorskog kruga to je veća brzina vrtanje u kočnom spoju. Za slučaj reaktivnog momenta tereta treba zamijeniti stezaljke rotora, pa motor iz radne tačke D prelazi u kočni režim (tačka E) i zaustavlja se po krivulji R_1 (II kvadrant) ako je prilikom prespanja uključen pogodan otpor. Ne isključi li se stroj u tački F , on će ubrzavati radni mehanizam u suprotnom smjeru vrtanje do brzine vrtanje $-\omega_2$, odnosno $-\omega_3$ (prirodna karakteristika R_r). Santiranjem rotorskog kruga ili uzbudnog namota i kombinacijom s dodatnim otporom u glavnom strujnom krugu može se postići još niz mehaničkih karakteristika.

Elektromotorni pogon sa složeno uzbudjenim motorom.

Složeno (mješovito) uzbudeni (kompaundirani) motor ima bar dva uzbudna namota (nezavisni ili poredni i serijski) pa se njegove mehaničke karakteristike nalaze između odgovarajućih karakteristika nezavisnog i serijskog motora. Odnos protjecanja nezavisnog i serijskog namota približuje ih prvoj ili drugoj vrsti stroja. Gotovo uvijek serijski namot uzbude potpomaže nezavisni (saglasno, zajedničko djelovanje). U području malih opterećenja (sl. 14) brzina vrtanje se znatno mijenja; pri većim momentima tereta, pak, promjena je brzine vrtanje linearna (efekt zasićenja). Ovim se motorima mogu ostvariti sve vrste kočenja. U generatorskom kočenju smanjuje se kočni moment zbog utjecaja serijskog namota (II kvadrant, krivulje R_r' , R_1'' i R_2''). Zato se obično šantira serijski namot i karakteristike postaju pravci (R_r' , R_1'' i R_2''). Linearne karakteristike dobiju se pri elektrodinamičkom kočenju sa šantiranjem serijskog namota (pravci kroz ishodište koordinatnog sistema). Mehaničke karakteristike protustrujnog kočenja nelinearne su uslijed djelovanja serijskog uzbudnog namota.



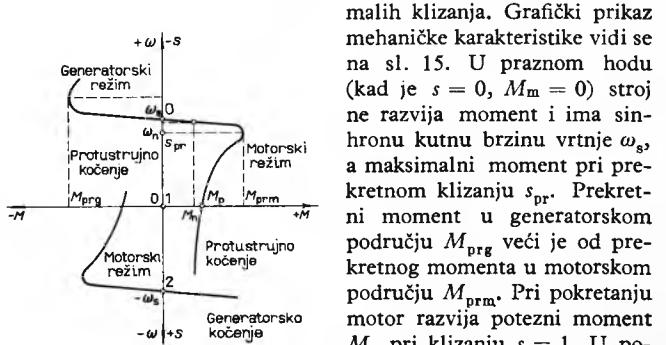
Sl. 14. Mehaničke karakteristike složeno uzbudjenog istosmjernog motora (R_r , R_1 , R_2), pri generatorskom kočenju (R_r' , R_1'' , R_2''), pri generatorskom kočenju sa šantiranjem serijskim namotom (R_r'' , R_1''' , R_2''') i pri elektrodinamičkom kočenju sa šantiranim serijskim namotom (R_3 , R_4)

Elektromotorni pogon s asinhronim motorom. Asinhroni stroj primjenjuje se u elektromotornim pogonima najčešće, jer je jednostavan i siguran u eksploataciji, jeftin (zbog toga što se masovno proizvodi u standardiziranim izvedbama) i prikladan za široku upotrebu (zbog toga što svadje postoje izmjenične električne mreže). Regulacija brzine vrtanje asinhronog motora najloš je komplikirana, neekonomična i jako ograničena. U novije vrijeme može se primjenom poluvodičkih elemenata eliminirati taj nedostatak. Sklopovima s diodama i upravljivim poluvodičkim elementima može se podešavati brzina vrtanje u širokim granicama, što će vjerojatno omogućiti da se primjeni asinhroni motor i u oblastima gdje se do sada pretežno primjenjuju istosmjerni stroj.

Mehanička karakteristika trofaznih asinhronih motora vrlo je dobro aproksimirana pojednostavljenom Klossovom jednadžbom:

$$M_m = \frac{2 M_{pr}}{\frac{s}{s_{pr}} + \frac{s_{pr}}{s}},$$

gdje s znači klizanje, M_{pr} prekretni moment i s_{pr} prekretno klizanje. Klossova relacija vrijedi za kolutne motore, a i za one kavezne motore koji nemaju izražen efekt potiskivanja struje u rotoru. Za kavezne motore s izraženim efektom potiskivanja struje u rotoru vrijedi Klossova jednadžba samo u području



Sl. 15. Mehaničke karakteristike asinhronog stroja. M_{prg} i M_{prm} su prekretni momenti u generatorskom i motorskom području

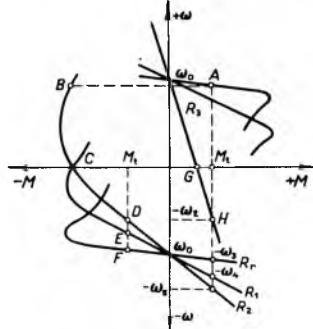
menti proporcionalni kvadratu napona, pa njegova kolebanja mogu izazvati poteškoće u eksploraciji. Mehanička karakteristika ima dva područja: nelinearno za klizanje $|s| > |s_{pr}|$ i približno linearno za klizanje $|s| < |s_{pr}|$, na kojem stroj najčešće radi. Uključivanjem otpora (radnog, induktivnog ili njihove kombinacije) u statorski ili rotorski namot dobiju se porodice vještačkih karakteristika. Rijetko se primjenjuju otpori u statorskom namotu. U kolutnim motorima redovito se upotrebljavaju otpori u rotorskom krugu, i to gotovo isključivo radni; tada su vještačke mehaničke karakteristike u linearnom dijelu slične karakteristikama istosmjernih nezavisno uzbudjenih strojeva (sl. 16; v. i sl. 49). Veličina maksimalnog prekretnog momenta ostaje konstantna, a mijenja se prekretno klizanje. Karakteristike postaju mukše što je veći otpor rotorskog kruga. S asinhronim kaveznim motorima ne mogu se ostvariti analogne porodice karakteristika, ali se konstrukcijom rotora (namota) mogu postići efekti potiskivanja struje s različitim oblikom karakteristika (strojevi s visokim štapovima, dvokavezni, trokavezni itd., v. sl. 66).

Generatorsko kočenje asinhronog stroja s vraćanjem energije u mrežu postiže se samo pri brzinama većim od sinhronih (nadsinhrono kočenje). Spušta li se teret dizalicom (sl. 16), motor koči (IV kvadrant) pri kutnoj brzini vrtnje ω_3 , ω_4 ili ω_5 : brzina ovisi o veličini otpora rotorskog kruga. U slučaju reaktivnog momenta postiže se nadsinhrono kočenje samo s dvobrzinskim motorima i to tako da se prede s veće na manju brzinu (sl. 17).

Iz radne tačke A, pri kutnoj brzini vrtnje ω_1 , motor počinje kočiti momentom M_B i koči do brzine vrtnje ω_2 . Pri generatorskom kočenju stroj prima uzbudnu energiju iz mreže. Kad se vrti s klizanjem $s > 1$, motor je u protustrujnom kočnom režimu. Za slučaj reaktivnog momenta (tokarski stroj) iz motorskog režima (tačka A na sl. 16) asinhroni motor prelazi u kočni režim (tačka B) zamjenom dviju faza mreže na stezaljkama i zaustavi se u tački C (u časnu prelaska na kočenje uključi se i dodatni otpor R_d). Ako se motor tad ne isključi, on reverzira i ubrza radni mehanizam do jedne od brzina tačke D, E ili F, već prema tome na kojoj karakteristici radi. U

slučaju potencijalnog momenta (dizalica, sl. 16) dovoljno je da se samo uključi veliki otpor R_s u rotorski krug i motor prelazi u protustrujno kočenje spuštači teret kutnom brzinom vrtnje ω_2 . U pogonima s asinhronim strojevima često se primjenjuje i elektrodinamičko kočenje (transportni sistemi, kotrljače, dizalice, alatni strojevi). Ima više mogućnosti izvedbe. Odsponi li se statorski namot od mreže i priključi preko dodatnog otpora na istosmjerni izvor (istosmjernu ili izmjeničnu ispravljenu mrežu) ili kondenzator, stvara se potrebni uvjet za kočenje. Na sl. 18 prikazane su mehaničke karakteristike kočenja (II kvadrant). Maksimalni moment ovisi o veličini istosmjerne uzbude (krivulje 1 i 2 odgovaraju većoj uzbudi nego krivulja 3), a prekretno klizanje o veličini radnog otpora u rotorskog kruga (krivulja 2 ima manji otpor nego krivulja 3, a krivulja 1 nema dodatnog otpora). Nesimetrično rotaciono polje izazvano nesimetričnim naponom ili spojem daje također kočni efekt. »Jednofazno kočenje« se najčešće primjenjuje na di-

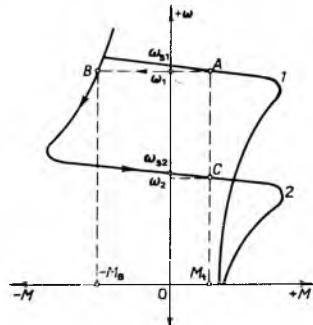
zaličnim uređajima. Statorski se namot priključi na jedan linijski napon, a u rotorski krug se uključi dovoljno velik otpor, pa se dobije mehanička kočna karakteristika 1 na sl. 19. Kad se u rotorskog krug struje uključi mali otpor, ne može se ostvariti kočenje (krivulja 2 na sl. 19).



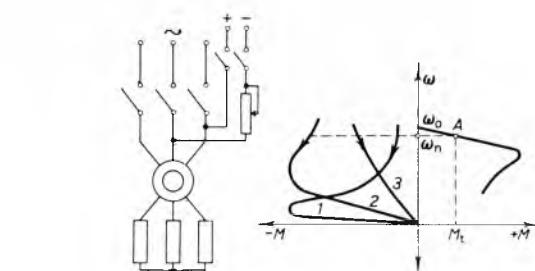
Sl. 16. Generatorsko i protustrujno kočenje asinhronog stroja

rakteristika (strojevi s visokim štapovima, dvokavezni, trokavezni itd., v. sl. 66).

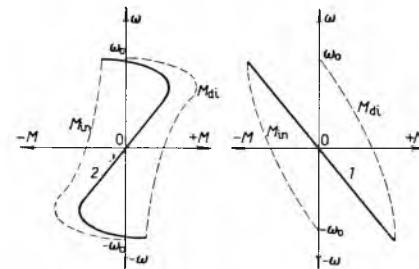
Generatorsko kočenje asinhronog stroja s vraćanjem energije u mrežu postiže se samo pri brzinama većim od sinhronih (nadsinhrono kočenje). Spušta li se teret dizalicom (sl. 16), motor koči (IV kvadrant) pri kutnoj brzini vrtnje ω_3 , ω_4 ili ω_5 : brzina ovisi o veličini otpora rotorskog kruga. U slučaju reaktivnog momenta postiže se nadsinhrono kočenje samo s dvobrzinskim motorima i to tako da se prede s veće na manju brzinu (sl. 17).



Sl. 17. Generatorsko kočenje asinhronim dvobrzinskim strojem pri reaktivnom momentu tereta. 1 - Karakteristika pri većoj brzini vrtnje, 2 - karakteristika pri manjoj brzini vrtnje, ω_{s1} i ω_{s2} su viša i niža sinhrona kutna brzina vrtnje



Sl. 18. Mechanicka karakteristika asinhronog stroja pri prespajaju iz motorskog rada na dinamicko kočenje

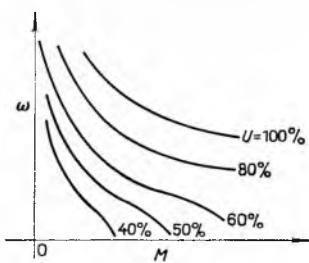


Sl. 19. Mechanicka karakteristika asinhronog motora pri jednofaznom statorskom priključku s velikim rotorskim otporom (1) i bez rotorskog otpora (2). M_{d1} direktni moment, M_{d0} inverzni moment

Značaj jednofaznog asinhronog motora u elektromotornom pogonu novijeg je datuma i vezan je uz razvitak primjene malih motora u kućanstvu, zdravstvu, zanatstvu i posebno u automatiziranim postrojenjima. Kavezni motor je i u toj oblasti najekonomičniji i najradije se primjenjuje, ako zadovoljava uvjete radnog mehanizma. Za male snage motora ($\sim 1 \dots 500 \text{ W}$) jednofazna izvedba ima neke prednosti pa je razvijeno više vrste jednofaznih kaveznih strojeva: jednonamotni sa stranim zagonom (rijetka primjena), dvonamotni s omškim otporom ili kondenzatorom u pomoćnoj fazi; motor s rascijepljenim istaknutim polovima kojemu je pomoćna faza utisnuta u rascijep pola i induktivno vezana s glavnim namotom; reluktantni motor koji ima rotor s istaknutim polovima i vrti se sinhronom brzinom vrtnje nakon samostalnog zaleta; mikromotori s rotormi iz punog konjada i amplitudno ili fazno upravljivom pomoćnom fazom (područje automatičke). Mechanicka karakteristika tih vrsta motora i ostala njihova svojstva prilagođuju se radnom mehanizmu. Tako se kod motora s rascijepljenim polovima malo mijenjaju uzeta snaga, struja i gubici ako se mijenja opterećenje na osovini. Korisnost je ove vrste motora mala ($10 \dots 40\%$), ali je motor vrlo robustan, jednostavan i jeftin. Motor s rotormi iz punog konjada ima velike struje praznog hoda (do 90% nominalne), ali vrlo malu mehaničku trosost, što je važno za automatizirane servosisteme. Gubici u ležajevima mikromotora mogu iznositi i do 30% ukupne snage. Jednofazni motori imaju općenito loš faktor snage. (V. članak *Električni strojevi*.)

Elektromotorni pogon sa sinhronim motorom. Sinhroni motor ima konstantnu brzinu vrtnje neovisnu o teretu (sve do ispadnog momenta), pa je njegova mehanička karakteristika pravac. Brzina vrtnje ovisi o broju pari polova i frekvenciji mreže. Moment sinhronog motora proporcionalan je naponu, magnetiskom toku i sinusu kuta opterećenja. Što je kut opterećenja manji to je veća preopterećljivost stroja. On razvija sinhroni moment samo pri sinhronoj brzini vrtnje. Prednost mu je pred ostalim motorima što može raditi i s kapacitivnim faktorom snage $\cos \phi$ i popravljati faktor snage cijelog postrojenja, ali ima teškoća pri zaletu i dovođenju elektromotornog pogona na sinhronu brzinu vrtnje. Zalet sinhronog motora do nominalne brzine vrtnje izvodi se posebnim pomoćnim motorima, ili samozaletom kao asinhroni motor (vrtložnim strujama rotora ili čak posebnim namotom), a u blizini sinhronne brzine vrtnje uključi se uzbuda i sinhronizirajući moment ga ubrza na nominalnu brzinu vrtnje. Pokretanje se obično izvodi sniženim naponom radi ograničenja struja i dinamičkog naprezanja namota (napon se snizuje autotransformatorom ili prigušnicom). Sinhroni se motor primjenjuje u pogonima strojeva kojima se ne regulira brzina vrtnje, kao što su: kompresori, pumpe, motorgeneratorske grupe, ventilatori, neki valjonički stanovi i sl.

Elektromotorni pogon s izmjeničnim kolektorskim motorima. Postoji mnogo vrsta izmjeničnih kolektorskih motora: serijski jednofazni (univerzalni) motor, repulzioni jednofazni motor, trofazni poredni motori napajani s rotorske ili statorske strane, trofazni serijski motor, itd. Međutim, oni sve više gube važnost. Široj primjeni ima serijski jednofazni motor u elektrovočuću zbog svojih dobrih svojstava pokretanja i regulacije brzine



Sl. 20. Mechanicke karakteristike jednofaznog serijskog motora u ovisnosti o naponu

vrtnje ($18\ 000 \dots 9000 \dots 1600 \text{ min}^{-1}$) s primjenom u aparatima za kućanstvo, zdravstvo, zanatstvo i u regulacionim uređajima. Općenito su mechanicke karakteristike izmjeničnih kolektorskih motora vrlo slične karakteristikama odgovarajućih istosmjernih motora.

SKLOPOVI ELEKTROMOTORNIH POGONA

U mnogim se pogonima upotrebljava umjesto jednog stroja skup strojeva, tj. kombinacije agregata, sa svrhom da elektromotorni pogon dobije nove kvalitete. Kombinacijama se postižu nove mechanicke karakteristike (povećava se mogućnost upravljanja i regulacije — npr. višemotorni pogon s krutim spojem osovinā), transfiguriraju se mreže (priključak ekonomičnih strojeva na ekonomičnu mrežu — npr. istosmjerni strojevi napajani preko usmjerivača), dobiju se nova pogonska svojstva (sinhroni rad višemotornog pogona — primjer električne osovine) ili se kombinacijama strojeva postiže ekonomičniji rad (polagano upravljanje brzinom vrtnje asinhronog stroja velike snage, npr. kaskade).

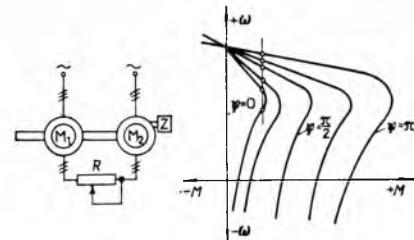
Dvomotorni pogon s krutim spojem osovinā primjenjuje se kad se želi smanjiti moment tromosti sistema, kad to zahtijeva prostorna dispozicija cijelog elektromotornog pogona ili kad se žele postići nove mechanicke karakteristike. Spoje li se kruto dva kolutna asinhrona stroja (sl. 21) od kojih jedan radi u motorском režimu (karakteristika 1), a drugi u protustrujnom režimu (karakteristika 2), dobije se nova zajednička mechanicke karakteristika (karakteristika 3) za motorski i kočni režim, a nagib karakteristikā ovisi o veličini otpora u rotorskim krugovima. Ako oba stroja imaju jednakine sinhronne brzine vrtnje i jednakne otpore u rotorskim krugovima, karakteristika (pravac 4) čak prolazi kroz ishodište. Različitim vrstama strojeva mogu se dobiti i druge porodice karakteristika. Drugi slučaj prikazuje sl. 22. Dva jednaka kolutna asinhrona stroja kruto su spojena, a rotorski krugovi rade na zajednički otpornik. Jedan od statora može se zakretati za kut ψ . Rezultirajući je moment zbroj momenata obaju strojeva i jednak je

$$M = M_I + M_{II} = \frac{2 M_{pr}}{\frac{s_{pr}}{s} + \frac{s}{s_{pr}}} (1 - \cos \psi),$$

a mechanicke karakteristike tog sklopa u ovisnosti o parametru ψ prikazuje sl. 22. Zakretanjem statora za kut ψ postiže se lagani

vrtanje (sl. 20; v. i Elektročina vuča, TE 3, str. 689). U pogonima gdje se traži polagano upravljanje brzinom vrtnje, npr. u tekstilnoj industriji, za kalandere u industrijskim gume i papira itd., primjenjuje se trofazni kolektorski poredni motor rotorski napajan (Schrage-motor). Široku primjenu imaju danas, a imat će je i u budućnosti, univerzalni kolektorski motori za izmjeničnu i istosmjernu struju malih snaga (od 5 do 350 W) sa širokim dijapazonom brzine

zalet agregata i fino podešavanje brzine vrtnje. Otporom u rotorskim krugovima može se mijenjati nagib karakteristika. Međutim, gubici u rotoru proporcionalni su klizanju kao i u svim ostalim stanjima asinhronog motora. Zato se ova kombinacija upotrebljava samo za mali opseg regulacije (15...20%) velikih strojeva u specijalnim pogonima (ventilatori u zračnim tunelima i slično).



Sl. 22. Načelna shema i mechanicke karakteristike dvomotornog pogona sa zakretanjem statora (ψ je kut zakretanja), Z naprava za zakretanje

Leonardova grupa (sl. 23 a) sastavljena je od asinhronog motora AM, uzbudnika B, istosmjernog nezavisno uzbudenog generatora G i istosmjernog nezavisno uzbudenog motora M.

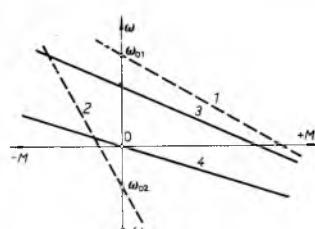
Asinhroni motor AM služi za pogon uzbudnika B i generatora G, a motor M električki je spojen na generator G. Zalet i kočenje pogonskog motora izvodi se varijacijom napona generatora G uz punu uzbudu motora. Regulacija brzine vrtnje motora M ima dva područja: od 0 do nazivne brzine n_n regulira se naponom generatora G (sl. 23 b, oznaka U varijabilno), a od nazivne brzine vrtnje n_n do $(2 \dots 3) n_n$ upravljanjem (slabljenjem) polja pogonskog motora M (oznaka Φ_m varijabilno). U prvom području motor radi s konstantnim momentom, u drugom s konstantnom snagom. Mijenja li se preklopnikom P_k smjer uzbude generatora G uz istu uzbudu pogonskog motora M, motor reverzira. (Ova se metoda naj-

čeće primjenjuje za promjenu smjera vrtnje motora.) Ako se istosmjerni strojevi uzbuduju preko usmjerivača, ponekad se reverziranje izvodi pomoću prekidača u glavnom strujnom krugu koji povezuje generator i motor. S različitim vrstama istosmjernih strojeva i različitim regulacionim elementima mogu se dobiti različite porodice mechanicke karakteristika (npr. karakteristika eksavatora).

Leonardova grupa je skupa, ima relativno nisku korisnost, a i troškovi održavanja su visoki. Ali ona ima i mnogo pogonskih prednosti: finu regulaciju brzine vrtnje, ekonomičan zalet i kočenje, malu snagu regulacije i reverziranja, široki opseg regulacije (1 : 30, a u specijalnim izvedbama s elektrodinamičkim jačalima i do 1 : 200). Primjenjuje se u svim vrstama elektromotornih pogona od snage nekoliko kilovata do graničnih sna- ga oko 10 megavata.

Varijanta Leonardove grupe dobiva se kad se umjesto asinhronog motora primjeni sinhroni motor. Prednost je ove kombinacije da se sinhronim motorom može popravljati faktor snage i da istosmjerni generator ima konstantnu brzinu vrtnje. Međutim, sinhroni je motor skup, kruto prenosi udarce na napojnu izmjeničnu mrežu i teško se pokreće. Najčeće se upotrebljava jedan sinhroni motor za grupni pogon više Leonardovih grupa za manje, lakše i srednje teške pogone.

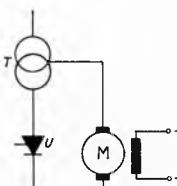
Za najveće snage i slabije izmjenične mreže uzima se Ilgner-Leonardova grupa s asinhronim kolutnim motorom, regulaci-



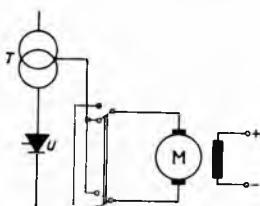
Sl. 21. Mechanicke karakteristike dvaju kruto spojenih asinhronih motora. Jedan od njih radi u motorskom režimu (karakteristika 1), a drugi u protustrujnom režimu (karakteristika 2); 3 i 4 zajedničke mechanicke karakteristike

onim otporom u njegovom rotorskom krugu i zamašnjakom na njegovoj osovinici (v. sl. 53). Grupa ublažuje udarce (ne prenosi ih kruto) na izmjeničnu mrežu, a primjenjuje se za najteže reverzibilne pogone (reverzionalni valjaonički stanovi, velike blanjalice, itd.)

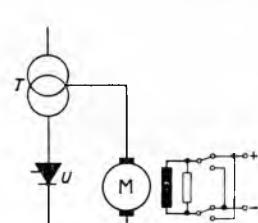
Istosmjerni nezavisno uzbudeni motor s usmjerivačem sve se više primjenjuje u novije vrijeme. Usmjerivači mogu biti živini s rešetkom ili tiristori (upravljeni poluvodički ventili), rjeđe ignitroni i tiratroni. Ventil služi za ispravljanje izmjenične u istosmjernu struju i za regulaciju brzine vrtnje motora. Ovisno o prednapunu rešetke i kutu »paljenja« mijenja se veličina ispravljenog napona (ali ne polaritet) od nule do nominalne vrijednosti. Motor može vratiti energiju u mrežu samo kad se ventil prevede u invertorsk (izmjenjivački) režim. Osnovne karakteristike ventilskog elektromotornog pogona (opseg regulacije brzine vrtnje, mogućnost reverziranja, oblik mehaničke karakteristike, vrsta kočenja) ovise o shemi spoja između usmjerivača i istosmjernog motora. Na sl. 24 prikazan je najjednostavniji spoj, koji je prikladan za nereverzibilne pogone i koji nema mogućnosti kočenja. Promjena smjera vrtnje istosmjernog motora izvodi se ili prekretanjem (promjenom polaritet) rotorskog napona ili promjenom smjera uzbudne struje. Primjenjuju se obje varijante. Prekretanje napona rotora (sl. 25) izvodi se preklopnim prekidačima (za veće snage motora) u momentu kada rotorska struja padne na nulu (za srednje ili male motore primjenjuje se kontaktorska tehnika). Prevede li se u tom momentu ventil u invertor, motor električki koči (predaje energiju u mrežu), a potom reverzira pošto se ventili prevedu u usmjerivački režim. Za manje snage motora primjenjuju se elektrodinamička kočenja (jednostavnije rješenje). Na sl. 26 prikazan je reverzibilni spoj s prekretanjem uzbudne struje motora. Ventil mora blokirati dok se ne izgradi puna uzbuda, a onda se ventil prevede u invertor radi električnog kočenja, odnosno u usmjerivač za ubrzavanje u drugom smjeru



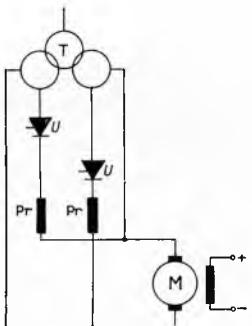
Sl. 24. Načela shema elektromotornog pogona s usmjerivačima



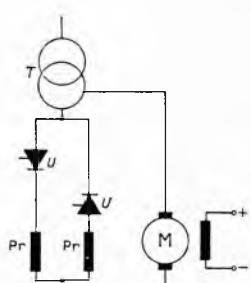
Sl. 25. Shema istosmjernog nezavisno uzbudjenog motora s usmjerivačem. Reverziranje se izvodi prekretanjem rotorskog napona



Sl. 26. Shema pogona s usmjerivačem. Reverziranje smjera vrtnje izvodi se promjenom smjera uzbude



Sl. 27. Shema elektromotornog pogona s unakrsnim spojem usmjerivača. Pr prigušnica



Sl. 28. Shema pogona s antiparalelnim spojem usmjerivača. Pr prigušnica

vrtnje. Za često reverziranje nije prikladan prekidač u uzbudnom krugu motora, zato se tu primjenjuje unakrsni ili antiparalelni spoj usmjerivača, čime se dobije beskontaktni spoj, a postižu se i manje vremenske konstante. Manja vremena reverziranja brzine vrtnje dobiju se dvostrukim grupama ventila u rotorskom

krugu motora. U *unakrsnom spoju* (sl. 27) jedan ventil radi za jedan smjer vrtnje motora, pri čemu je drugi u zapornom režimu. Rekuperativno (generatorski) koči se prevodenjem zapornog ventila u invertorsk režim. Upravljanje rešetkom (upravljačkom elektrodrom) omogućava vrlo elastičan rad bez strujnih udaraca, kratka vremena reverziranja i mekano kočenje. *Antiparalelni spoj* (sl. 28) analogan je prethodnom, ali mu je prednost da transformator ima samo jedan sekundarni namot. Međutim, u tom spoju ne mogu se primjeniti višeanodni usmjerivači, a upravljanje rešetkom je komplikiranije.

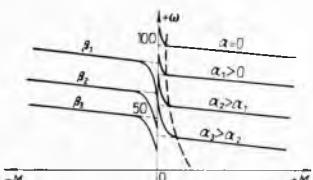
Mehaničke karakteristike sistema usmjerivač-istosmjerni nezavisno uzbudeni motor slične su karakteristikama Leonardove grupe s odstupanjem u području malih momenata (sl. 29). Analitički izraz glasi:

$$\omega = \frac{U_0 \cos \alpha - \Delta U}{c} - \frac{R}{c^2} M,$$

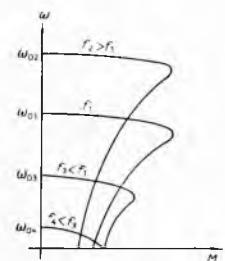
gdje U_0 znači srednju vrijednost ispravljenog napona u praznom hodu uz $\alpha = 0$, α je kut paljenja usmjerivača, ΔU pad napona u usmjerivaču (koji je zanemarljiv kod tiristora), R ekvivalentni kompleksni otpor rotorskog kruga, $c = k \Phi_m$ konstruktivna konstanta stroja. Karakteristike su dosta mekane zbog padova napona na otporu R . Pri malom opterećenju one prelaze u hiperbolni oblik. U području malih brzina vrtnje motora (duboka regulacija, α velik) uređaj užima znatnu reaktivnu energiju iz mreže ($\cos \varphi \approx \cos \delta \approx \omega_{ao}/\omega_o$, ako je ω_{ao} idealna kutna brzina vrtnje pri kutu α , ω_o pri kutu $\alpha = 0$). Zato je zgodno upravljanje mrežicom kombinirati s regulacionim transformatorom i regulacijom uzbude motora. Osim toga motor dobiva valovit napon, što pogoršava komutaciju stroja, pa se moraju ugradivati prigušnice ili graditi posebni istosmjerni strojevi. Sva vršna opterećenja (»strujni udarci«) direktno se prenose na mrežu. Elektromotorni pogon s usmjerivačima ima dobru korisnost za različita opterećenja motorâ male vremenske konstante, jeftiniji je od Leonardove grupe. Osnovna mu je prednost da se istosmjerni stroj priključuje na ekonomičnu izmjeničnu mrežu. Primjenjuje se u svim industrijama i za sve vrste uređaja, od malih do najvećih snaga, npr. u metalurgiji, u rудarstvu, u industriji papira, gume, metala, za različne alatne strojeve.

Asinhroni motor s pretvaračem frekvencije. Ekonomično upravljanje brzinom vrtnje normalnih asinhronih kavezničkih motora izvodi se varijacijom frekvencije napojne mreže uz uvjet da se zadrži približno konstantan omjer između napona U i frekvencije f ($U/f = \text{konst.}$). Kao pretvarači frekvencije služe sinhroni pretvarači frekvencije, kolektorski izmjenični generator uzbudivan sa statorske strane i, u novije doba, tiristorski pretvarači frekvencije. Na sl. 30 prikazane su mehaničke karakteristike asinhronog motora napajanog strujom različitih frekvencija. Pretvarači frekvencije obično se primjenjuju u pogonima gdje se istovremeno upravlja brzinom vrtnje većeg broja asinhronih motora (u metalurgiji za pogon kotrljača, u tekstilnoj industriji za pogon predilica) i kad se želi bilo mala bilo vrlo velika brzina vrtnje (npr. u drvenoj industriji 18 000–25 000 min⁻¹ i u nekim centrifugama). Pretvarači frekvencije s asinhronim kavezničkim motorima upotrebljavaju se i u nekim pogonima gdje su uvjeti rada vrlo teški, pa je primjena istosmjernih strojeva ograničena (kemijska industrija, pogoni ugroženi od eksplozije).

Sinhroni pogon većeg broja mehanizama (električna osovina). U nekim radnim mehanizmima potreban je sinhroni hod dviju ili više osovina. Ako je udaljenost među osovinama velika,



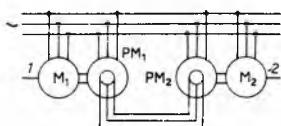
Sl. 29. Mechanickie karakteristike elektromotornog pogona sa živim usmjerivačima. α Kut paljenja usmjerivača za motorski rad, β za generatorsko kočenje



Sl. 30. Mechanickie karakteristike asinhronog motora pri razlicitim frekvencijama napojne mreže uz uslov $U/f = \text{konst.}$

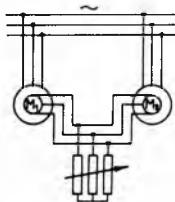
ELEKTROMOTORNI POGON

mehanički spoj postaje složen, a negdje se on i ne može izvesti. Tzv. električna osovina zamjenjuje u tom slučaju mehaničku i omogućava sinhroni hod većeg broja mehanizama. Ona ima široku primjenu npr. u hidrotehničkim uređajima: na branama i ustavama, zatim na pokretnim mostovima, velikim dizalicama, transporterima, tekstilnim strojevima, itd. Postoji više izvedbi električne osovine s pomoćnim kolutnim asinhronim strojevima

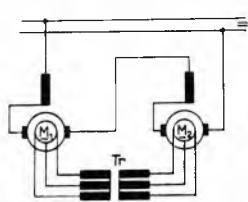


Sl. 31. Shema električne osovine s pomoćnim kolutnim asinhronim strojevima

strojeva sinhrono vrte, a njihove su elektromotorne sile jednakе, pa nema struja izjednačenja. Optereti li se motor M_1 više od motora M_2 , njegov rotor zajedno s rotorom pomoćnog stroja PM_1 zaostane za rotorom stroja PM_2 , među rotorima pomoćnih strojeva nastane razlika elektromotornih sila koja potjera struju izjednačenja. Stroj PM_2 postaje dijelom generatora (koči osovinu 2) i predaje energiju osovinici 1, ubrzavajući je dok se ne postigne ravnoteža. Pomoćni strojevi spajaju se ili odabiru tako da rade s velikim klizanjem (100–200%), najčešće u protuspoju prema glavnim strojevima jer se tako povećava moment izjednačenja (sinhronizirajući moment) sistema. On je proporcionalan klizanju i razlici kuta raskoraka osovin 1 i 2. Obično su pomoćni i radni strojevi jednakih karakteristika. Jednostavnija je izvedba sa zajedničkim rotorskim otpornikom bez pomoćnih strojeva (sl. 32). Rotor s većim klizanjem (sporiji) daje veće struje, a struje izjednačenja usporavaju drugi motor (s manjim klizanjem) do ravnoteže.



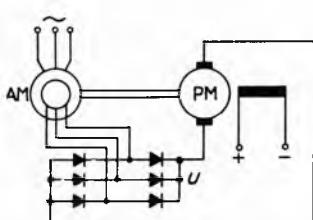
Sl. 32. Shema električne osovine sa zajedničkim otpornikom



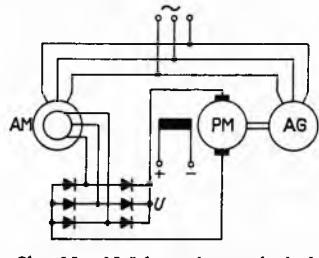
Sl. 33. Shema električne osovine s istosmernim serijskim strojevima

Nedostatak je tog sistema da jedan dio otpora mora ostati stalno uključen (trajni gubici u otporu!). Primjenjuje se u pogonima gdje nema većih razlika opterećenja među pogonskim strojevima. Električna osovina može se izvesti i u elektromotornim pogonima s istosmernim motorima. Na sl. 33 prikazana je izvedba sa serijskim strojevima, čiji rotori imaju osim kolektora i klizne prste na kojima su jedan s drugim električki spojeni preko transformatora Tr .

Kaskade asinhronih kolutnih motora upotrebljavaju se za sporu upravljanje brzinom vrtnje strojeva većih snaga (valjanočkih stanova, zračnih duvaljki, velikih ventilatora i sl.). Energija klizanja ili se vraća u mrežu ili se predaje osovinici radnog mehanizma. *Kaskada konstantne snage* (sl. 34) ispravlja napon rotora asinhronog stroja AM (preko jednoarmaturnog pretvarača — Krämerova kaskada — ili preko usmjerivača, živinih ili poluvodičkih) i istosmernu energiju predaje istosmernom mo-



Sl. 34. Načelna shema kaskade asinhronog stroja konstantne snage s usmjerivačima



Sl. 35. Načelna shema kaskade asinhronog stroja konstantnog momenta s usmjerivačima

toru PM koji je kruto spojen s asinhronim strojem AM. Uz budom motora PM mijenja se brzina vrtnje kaskade (naniže sve do 20% sinhronice) pri čemu snaga na osovinici kaskade ostaje konstantna. *Kaskada konstantnog momenta* (sl. 35) predaje ispravljeni snagu s kliznih prstena asinhronog stroja AM pomoćnom istosmernom stroju PM, koji pogoni asinhroni stroj AG i tako vraća energiju u mrežu. Brzina vrtnje asinhronog stroja AM podešava se uz budom stroja PM, pri čemu moment pogonskog asinhronog motora AM ostaje konstantan. Područje regulacije brzine vrtnje obično se kreće od 1/1 do 1/2.

Postoji još niz drugih kombinacija agregata kojima se postiže ekonomičan rad elektromotornih pogona. Neka bude spomenut tzv. *buster*- (engl. booster, saglasno-suprotni) spoj strojeva (sl. 36), koji služi za to da se pri velikim promjenama napona, ili momenta, ili brzine vrtnje poboljšaju fizička svojstva pogona, a ujedno vraćanjem energije u mrežu smanje gubici. Buster-stroj BO nalazi se u glavnom strujnom krugu Leonardova agregata, a njegovim uzbuđivanjem može se postizati napon motoru M (buster uzima energiju iz mreže) ili sruštati napon na motoru M (buster vraća energiju u mrežu) i to kontinuirano (primjer: strojevi u papirnoj industriji). Umjesto generatora GG može se upotrijebiti istosmerna mreža konstantnog napona, pa se buster-strojem vrši i zalet i regulacija brzine vrtnje.

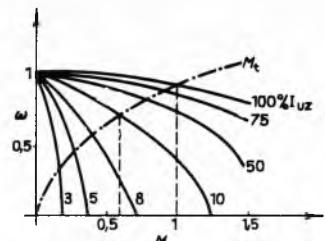
Električna spojka također se ponekad primjenjuje za regulaciju brzine vrtnje radnih mehanizama. Ona se sastoji od dva rotirajuća dijela: jedan služi kao uzbudni dio, drugi kao armatura (a građen je kao rotor asinhronog stroja s kaveznim namotom ili naprosto kao pun komad). Spojka se uzbuđuje istosmernom strujom. Jedna polovica je spojena s pogonskim motorom (obično asinhronim) koji se vrti stalnom brzinom, a druga s radnim mehanizmom. Prema tome elektromagnetska je spojka generator izmjenične struje koji radi u kratkom spoju, a njegove mehaničke karakteristike (sl. 37) slične su karakteristikama asinhronog motora. Veličinom uzbuđene struje može se mekno regulirati brzina vrtnje u širokom opsegu od 1/1 do ~1/10 (brojke uz krivulje na sl. 37 označavaju procenat od nominalne vrijednosti uzbuđene struje za jednu izvedenu spojku).

Korisnost pogona s elektromagnetskom spojkom ne razlikuje se mnogo od korisnosti pogona reguliranog otporom. Izvodi se i za pogone snaga do nekoliko hiljada kilovata (mekanizmi s ventilatorskim karakteristikama, brodska propulzija).

M. Ibrahimović

DINAMIČKA STANJA ELEKTROMOTORNOG POGONA

Prelazne pojave. Često se dinamičko stanje naziva i prelaznom pojmom (iz jednog stacionarnog stanja u drugo). Promjene svih fizikalnih veličina vezane su jedna na drugu i međusobno se uzrokuju. Npr., povećanje momenta tereta radnog mehanizma na osovinici asinhronog motora uzrokuje opadanje brzine vrtnje, zbog čega raste inducirani napon rotora, što dovodi do povećanja struja u namotima i do povećanja momenta motora; povećane struje uzrokuju veće gubitke pa se povisuje temperatura namota itd. Uprkos tome pokušava se, gdje god je to moguće, razmatrati prelazne pojave i odijeljeno po vrstama (električne prelazne pojave, mehaničke prelazne pojave, itd.), jer kompleksno promatravanje naišlazi na velike teškoće. To je olakšano kad se različite veličine ne mijenjaju istom brzinom. Često se toplinske prelazne pojave odvijaju



Sl. 37. Mehaničke karakteristike elektromotornog pogona s elektromagnetskom spojkom. Brojke uz krivulje označavaju procenat od nominalne vrijednosti uzbudne struje I_{uz}

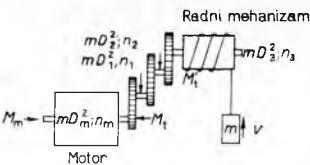
jaju znatno sporije od ostalih, pa se temperatura još dugo mijenja pošto su mehaničke i električne veličine postale konstantne. Kako je za ocjenu elektromotornog pogona mehanički efekt ipak osnovna veličina, smatra se i takav pogon stacionarnim ili statičkim. Očito je da postoje brže i sporije prelazne pojave; kad su relativno vrlo spore, ne govori se o dinamičkom stanju.

Kad bi se sve fizikalne veličine u jednom elektromotornom pogonu mogle skokovito mijenjati, trajao bi prijelaz iz jednog stacionarnog stanja u drugo neizmjerno kratko. Međutim, promjeni brzine vrtanje opire se moment tromosti J , promjeni struje u strujnom krugu opire se magnetsko polje Φ (induktivitet svitka L), a promjeni temperature toplinski kapacitet tijela koje se zagrijava. Prelazne pojave su posljedice mehaničke, elektromagnetske (električne) i toplinske tromosti elektromotornog pogona. Te su tromosti karakterizirane njihovim *vremenskim konstantama*: mehaničkom $T_m = m D^2 \omega_n / 4 M_n$, elektromagnetskom ili električnom $T_{e1} = L/R$ i toplinskom $T_t = m c/S h$. U ovim jednadžbama $m D^2$ znači ukupnu zamašnu masu elektromotornog pogona, ω_n nominalnu kutnu brzinu vrtanja, M_n nominalni moment motora, L ukupni induktivitet strujnog kruga, R ukupni radni otpor strujnog kruga, m masu, c specifičnu toplinu, S površinu i k koeficijent prelaza topline sa zagrijavanog homogenog tijela.

Promjena brzine vrtanje elektromotornog pogona, bilo željena bilo neželjena, osnovni je uzrok dinamičkim stanjima elektromotornog pogona. Čak i tipični statički elektromotorni pogoni (npr. centrifugalni ventilatori i pumpe) moraju se zaletjeti na početku rada i zaustaviti nakon završetka rada, tj. treba ih dovesti u stacionarno stanje i izvesti ih iz njega prelaznom pojmom. Svako kočenje, svako reverziranje, svaka promjena brzine vrtanje koju namećemo elektromotornom pogonu radi kvalitetnijeg funkciranja radnog mehanizma, uzrokuje dinamičko stanje. To isto uzrokuju i promjene opterećenja radnog mehanizma, npr. promjena nagiba pruge električne lokomotive, smjenjivanje perioda valjanja i praznog hoda valjaoničkih stanova, praznine obradivanih komada na blanjalici. Dinamička stanja mogu nastati i uslijed smetnji (npr. u napojnoj mreži ili elementima upravljanja), a i uslijed promjene momenta inercije nekih radnih mehanizama (centrifuge s istjecanjem, stapne pumpe).

Redukcija mehaničkih veličina na osovinu motora.

Momenti inercije ili zamašne mase $m D^2$ (koje veže relacija $J = m D^2$) nekog elektromotornog pogona sastoje se od zamašne mase motora, zamašne mase radnog mehanizma i zamašne mase spojenih dijelova. U elektromotornom pogonu s radnim mehanizmom kojemu dijelovi rotiraju brzinama različitim od brzine motora uslijed prijenosa zupčanicom, remenicom itd., treba svesti (reducirati) sve mehaničke veličine na osovinu motora. To vrijedi i kad se mase radnog mehanizma translatorno kreću (dizanje i pogon mosta kod dizalice, tramvaj, električni vlak, brod, itd.). Prema sl. 38 zamašne mase koje djeluju na osovinu motora iznose:



Sl. 38. Primjer elektromotornog pogona s različitim brzinama vrtanje dijelova radnog mehanizma i translatornim gibanjem dijela mase

Sl. 38. Primjer elektromotornog pogona s različitim brzinama vrtanje dijelova radnog mehanizma i translatornim gibanjem dijela mase

se radnog mehanizma translatorno kreću (dizanje i pogon mosta kod dizalice, tramvaj, električni vlak, brod, itd.). Prema sl. 38 zamašne mase koje djeluju na osovinu motora iznose:

$$\begin{aligned} m D^2 = & m D_m^2 + m D_1^2 \left(\frac{n_1}{n_m} \right)^2 + m D_2^2 \left(\frac{n_2}{n_m} \right)^2 + \\ & + m D_3^2 \left(\frac{n_3}{n_m} \right)^2 + \frac{m}{\pi^2} \left(\frac{v}{n_m} \right)^2. \end{aligned}$$

Istovremeno se i moment tereta M_t' reducira na osovinu, pa vrijedi:

$$M_t = M_t' \frac{n_1}{n_m} \cdot \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{n_3}{n_2} = M_t' \frac{n_3}{n_m},$$

ako se mogu zanemariti gubici u prenosnom mehanizmu, ili

$$M_t = M_t' \frac{n_3}{n_m} + \frac{1}{\eta_1 \eta_2 \eta_3},$$

ako se gubici ne mogu zanemariti. Pri tom su η_1 , η_2 i η_3 korisnosti pojedinih stupnjeva reduktora. Dakle, redukcija momenata vrši se na osnovi činjenice da su oni obratno proporcionalni brzinama

vrtnje, a redukcije zamašnih masa i momenata inercije na osnovi činjenice da su oni obratno proporcionalni kvadratu brzina vrtanja.

Dinamičko mehaničko stanje elektromotornog pogona može se definirati i kao stanje u kome se brzina vrtanje n mijenja: $\frac{dn}{dt} \neq 0$, a i kao stanje u kome moment tereta nije jednak momentu motora, $M_t \neq M_m$, tj. kad se dio momenta motora troši i na ubrzavanje ili usporavanje zamašnih masa, preciznije: na promjenu kinetičke energije elektromotornog pogona. I u tom je stanju zadovoljena bilansa $\sum M = 0$, samo se u njoj pojavljuje i (dinamički) moment ubrzanja (usporenja) M_u , pa vrijedi jednadžba $M_m = M_t + M_u$.

Moment ubrzanja za opći slučaj elektromotornog pogona daje Lagrangeova jednadžba:

$$M_u = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial A}{\partial \omega} \right) - \frac{\partial A}{\partial \alpha},$$

gdje je α opći kut vrtanje elektromotornog pogona, ω kutna brzina, a A kinetička energija: $A = J \omega^2 / 2$.

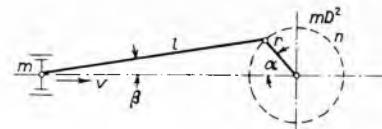
U velikoj većini elektromotornih pogona zamašne su mase neovisne o drugim parametrima ($m D^2 = \text{const}$; $J = \text{const}$), pa izraz za moment ubrzanja prelazi u oblik:

$$M_u = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{m D^2}{4} 2 \pi \frac{dn}{dt} = \frac{m D^2 \pi}{2} \cdot \frac{dn}{dt}.$$

Za elektromotorne pogone kojima zamašne mase ovise i o kutu (polozaju, putu), tj. $m D^2 = f(\alpha)$, $J = f(\alpha)$, dobiva se nešto složeniji izraz:

$$M_u = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha}.$$

Jasniji uvid u ovaj izraz dobiva se tek u primjeni na različite elektromotorne pogone. Za klipni kompresor, npr., koji pojednostavljeno prikazuje sl. 39, iznosi moment inercije dijela radnog



Sl. 39. Skica rasporeda mase kod klipnog kompresora

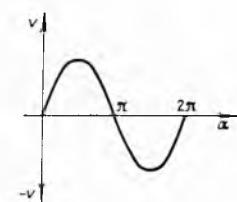
mehanizma koji se translatoryno giba (ako se radi jednostavnosti zanemari masa poluge l)

$$J = m \frac{\sin^2(\alpha + \beta)}{\cos^2 \beta}.$$

Moment ubrzanja glasi:

$$\begin{aligned} M_u = & \left[\frac{m D^2 \pi}{2} + \frac{2 r^2 \pi m \sin^2(\alpha + \beta)}{\cos^2 \beta} \right] \frac{dn}{dt} + \\ & + \frac{4 \pi^2 m n^2 r^2 \sin^2(\alpha + \beta)}{\cos^2 \beta} \left(\frac{\cot \alpha}{\cos^2 \beta} - \tan \beta \right). \end{aligned}$$

Taj je moment jednak nuli samo u takšima u kojima klip miruje ili ima najveću brzinu v (sl. 40), pa se uviđek dio razvijenog momenta motora troši na ubrzavanje i usporavanje mase klipa. Za takve se pogone (stapne pumpe, svi pogoni ojnicama, itd.), u punoj brzini vrtanje govori o kvazistacionarnom stanju. Kod elektromotornih pogona sa složenjom ovisnosti momenta inercije o ostalim fizikalnim veličinama (npr. centrifuga s istjecanjem) obično se problemi rješavaju grafičkim putem.



Trajanje prelazne pojave elektromotornog pogona posebno je zanimljiv podatak jer o njemu često ovisi kvalitet i efekt rada radnog mehanizma. Iz jednadžbe za moment ubrzanja elektromotornog pogona s konstantnim momentom inercije sli-

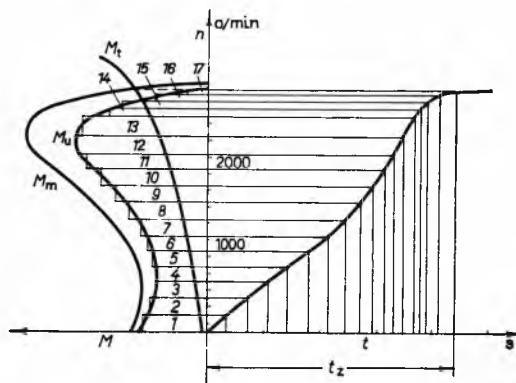
jedi za trajanje prelazne pojave od brzine n_1 do brzine n_2 izraz

$$t = \frac{m D^2 \pi}{2} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{M_u} = \frac{m D^2 \pi}{2} \int_{n_1}^{n_2} \frac{dn}{M_m - M_t}.$$

U elektromotornim pogonima s asinhronim motorom radije se računa prelazna pojava pomoću klizanja s umjesto pomoću brzine vrtanje n . Kako je $n = n_s(1 - s)$, to za trajanje prelazne pojave između brzina vrtanje n_1 i n_2 , koje odgovaraju klizanjima s_1 i s_2 , vrijedi jednadžba:

$$t = \frac{m D^2 \pi n_s}{2} \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{M_u} = \frac{m D^2 \pi n_s}{2} \int_{s_1}^{s_2} \frac{ds}{M_m - M_t}.$$

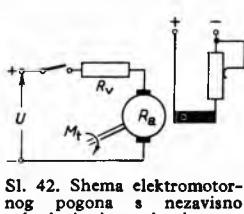
Pri određivanju vremena postoje dvije potешкоћe. Obično je funkcija pod znakom integrala nepraktična za analitičko integriranje, pa se ono provodi grafičkim ili grafoanalitičkim metodama. Kad se integriranje i može provesti analitičkim putem, mora se pri numeričkom računanju uzeti gornja granica integracije n_2 nešto niže od stvarne (obično za 1...5% razlike brzine $n_2 - n_1$), da se ne bi dobilo beskonačno dugo vrijeme prelazne pojave, jer moment ubrzanja teži k nuli kad se brzina vrtanje približava vrijednosti n_2 .



Sl. 41. Primjer grafičkog izračunavanja trajanja zaleta. M_m razvijeni moment motora, M_t moment tereta, M_u moment ubrzanja

Na sl. 41 prikazan je primjer grafoanalitičkog rješavanja prelazne pojave zaleta jednog ventilatora pogonjenog asinhronim motorom, gdje je prelazna pojava podijeljena u 17 odsječaka u kojima je računato s prosječnom vrijednosti momenta ubrzanja.

Analiza prelaznih pojava. Pri dinamičkim pojavama nastupaju u elektromotorima i velike struje. Prema velikim strujama posebno su osjetljivi elektromotorni pogoni s istosmjernim strojevima zbog problema komutacije. Treba li elektromotornom pogonu s istosmjernim nezavisno uzbudjenim strojem kome radni mehanizam suprotstavlja konstantni moment tereta M_t (sl. 42) analizirati zalet od mirovanja do pune brzine, polazi se od osnovnog izraza za napon stroja:



Sl. 42. Shema elektromotornog pogona s nezavisno uzbudjenim istosmjernim motorom

$$U = c_e n + i R$$

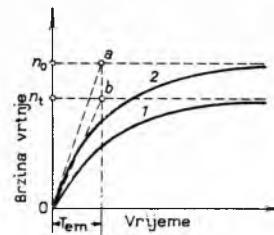
i bilanse momenta na osovini

$$M_m = c_m i = \frac{m D^2 \pi}{2} \cdot \frac{dn}{dt} + M_t.$$

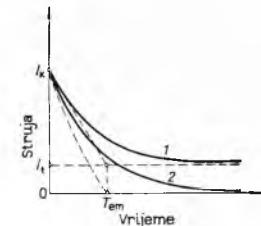
U gornjim izrazima predstavlja R ukupni otpor u armaturnom strujnom krugu, tj. zbroj otpora stroja R_s i uključenog predotpora R_V ; c_e je konstanta proporcionalnosti brzine vrtanje i inducirane elektromotorne sile konkretnog stroja (tok Φ je konstantan jer je stroj prethodno uzbuden), a c_m je konstanta proporcionalnosti razvijenog momenta i struje armature motora. Eliminacijom

struje dobiva se *dinamička jednadžba mehaničke prelazne pojave*:

$$\frac{U}{c_e} = n + \frac{m D^2 \pi R}{2 c_e c_m} \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{M_t R}{c_e c_m}.$$



Sl. 43. Zalet (brzina vrtanje) elektromotornog pogona prema shemi sl. 42 (uz zanemarenu električnu vremensku konstantu). Tem elektromehanička vremenska konstanta; krivulja 1 vrijedi za opterećeni motor, krivulja 2 za motor u praznom hodu. T_{em} je elektromehanička vremenska konstanta



Sl. 44. Tok struje pri zaletu elektromotornog pogona prema shemi sl. 42 (uz zanemarenu električnu vremensku konstantu). Krivulja 1 vrijedi za opterećeni motor, krivulja 2 za motor u praznom hodu. T_{em} je elektromehanička vremenska konstanta

Supstituirajući $T_{em} = \frac{m D^2 R \pi}{2 c_e c_m}$ dobiva se *opća jednadžba gibanja* za takav pogon

$$n = n_p + (n_p - n_v) e^{-t/T_{em}},$$

pri čemu n_p predstavlja brzinu vrtanje u trenutku početka prelazne pojave, n_v brzinu vrtanje nakon završetka prelazne pojave (odgovara M_t) a T_{em} elektromehanička vremenska konstanta. Za slučaj zaleta početna je brzina vrtanje $n_p = 0$, pa jednadžba gibanja pogona u zaletu glasi:

$$n = n_v (1 - e^{-t/T_{em}}),$$

a ako je još zalet bez tereta ($M_t = 0$), ona prelazi u oblik

$$n = n_v (1 - e^{-t/T_{em}}),$$

gdje je brzina vrtanje praznog hoda označena sa n_v . Na sl. 43 prikazani su ti zaleti krivuljama 2 (u praznom hodu) i 1 (uz teret M_t). Iz jednadžbi gibanja mogu se općeno računati trajanje prelaznih pojava rješavanjem jednadžbi za varijablu t i odgovarajućim uvrštenjem početne granice n_p i završne granice n_v . Tok struje u zaletu može se utvrditi eliminacijom struje iz dviju početne jednadžbe, što nakon odgovarajuće transformacije daje:

$$i = (I_k - I_v) e^{-t/T_{em}} + I_v$$

za slučaj zaleta s konstantnim momentom tereta M_t , a za slučaj zaleta bez tereta:

$$i = I_k e^{-t/T_{em}}.$$

Taj tok prikazuje sl. 44. I_v je struja tereta, a I_k struja kratkog spoja — početna struja kod zaleta. Vidi se da kvantitativne odnose u prelaznoj pojavi diktira veličina T_{em} , elektromehanička vremenska konstanta. Uz odgovarajuće transformacije dobije se:

$$T_{em} = \frac{m D^2 R \pi}{2 c_m c_e} = \frac{m D^2 \pi n_v}{2 M_k} = \frac{m D^2 \pi (n_v - n_p)}{2 M_n}$$

(gdje je n_v nominalna brzina vrtanje, M_k nominalni, a M_n potezni moment motora). Postaje vidljivo da je takva vremenska konstanta odraz mehaničke karakteristike nezavisno uzbudenog motora, koja je pravac. Ta konstanta je mjerodavna za sva mehanička dinamička stanja pogona s elektromotorm kojemu je statička karakteristika pravac. To vrijedi i za prelazne pojave asinhronih motora na pravčastom dijelu karakteristike između motorskog i generatorskog prekretnog momenta, te se navedena jednadžba može za taj slučaj transformirati u oblik:

$$T_{em} = \frac{m D^2 \pi n_s s_n}{2 M_n},$$

gdje n_s znači sinhronu brzinu vrtanje, a s_n nominalno klizanje asinhronog motora.

Već se na sl. 44 primjećuje nelogičnost vremenskog toka struje u početku zaleta, kad struja u vremenu 0 skokomice prima vrijednost I_k . Zanemarena je električna prelazna pojava, pa ta slika približno tačno prikazuje stanje samo kad je elek-

trična vremenska konstanta T_{el} znatno manja od elektromehaničke T_{em} . Općenito se može stvarna prelazna pojava elektromotornog pogona prikazati samo zajedničkom analizom elektromagnetskih i mehaničkih veličina. Za primjer opće prelazne pojave elektromotornog pogona s nezavisno uzbudjenim motorom, prema sl. 42, (uz konstantni moment tereta M_t) polazi se od potpunih jednadžbi mehaničke i električne ravnoteže:

$$M_m - M_t = M_u = \frac{m D^2 \pi}{2} \frac{dn}{dt}, \quad (I)$$

$$U = E + i R + L \frac{di}{dt}, \quad (II)$$

gdje je prema ranijem novi element L , ukupni induktivitet armaturnog strujnog kruga. Razdvajanjem električnih i mehaničkih veličina može se prikaz općeg stanja svesti na dvije diferencijalne jednadžbe:

$$T_{el} T_{em} \frac{dn^2}{dt^2} + T_{em} \frac{dn}{dt} + n = n_t, \quad (I)$$

$$T_{el} T_{em} \frac{di^2}{dt^2} + T_{em} \frac{di}{dt} + i = I_t. \quad (II)$$

Opća rješenja tih jednadžbi glase:

$$n = A e^{p_1 t} + B e^{p_2 t} + n_t, \quad (I)$$

$$i = C e^{p_1 t} + D e^{p_2 t} + I_t. \quad (II)$$

A, B, C i D su konstante integracije i ovise o tome kakva je prelazna pojava posrijedi (zalet, kočenje, promjena brzine vrtnje itd.), a p_1 i p_2 su korijeni karakteristične jednadžbe

$$p^2 + \frac{p}{T_{el}} + \frac{1}{T_{el} T_{em}} = 0; \quad p_{1,2} = -\frac{1}{2 T_{el}} \pm \sqrt{\frac{1}{T_{el}} \left(\frac{1}{4 T_{el}} - \frac{1}{T_{em}} \right)}$$

koji u sebi sadrže samo vremenske konstante i u osnovi određuju karakter prelazne pojave.

Zalet bez opterećenja. Dalje razmatranje posvećeno je prelaznoj pojavi zaleta elektromotornog pogona, i to uz $M_t = 0$ (bez opterećenja). Iz početnih uvjeta u trenutku $t = 0$, $i = 0$, $n = 0$, $\frac{di}{dt} = \frac{I_k}{T_{el}}$; $\frac{dn}{dt} = k i = 0$, računaju se integracione konstante pa slijedi:

$$n = n_0 \left(1 + \frac{p_2}{p_1 - p_2} e^{p_1 t} - \frac{p_1}{p_1 - p_2} e^{p_2 t} \right), \quad (I)$$

$$i = \frac{I_k}{T_{el} (p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (II)$$

Za dalju kvalitativnu analizu potrebno je poznavati neke parametre elektromotornog pogona.

U graničnom slučaju $4 T_{el} = T_{em}$ diskriminanta je karakteristične jednadžbe jednaka nuli, pa je $p_1 = p_2 = -1/2 T_{el}$. Izrazi za brzinu vrtnje i struju nakon odgovarajućeg graničnog prelaza glase:

(I)

$$n = n_0 \left[1 - \left(1 + \frac{t}{2 T_{el}} \right) e^{-t/2 T_{el}} \right] = n_0 \left[1 - \left(1 + \frac{2t}{T_{em}} \right) e^{-2t/T_{em}} \right],$$

$$i = \frac{I_k}{T_{el}} t e^{-t/2 T_{el}} = \frac{4 I_k}{T_{em}} t e^{-2t/T_{em}}. \quad (II)$$

U usporedbi s mehaničkom prelaznom pojmom brzina vrtnje raste u početku pojave sporije, a kasnije brže, a struja raste u početku naglo, ali dosije maksimalnu vrijednost od svega 73% I_k (za $t = 2 T_{el} = T_{em}/2$) i zatim opada prema nuli. Razlika se vidi na sl. 45 u usporedbi sa sl. 43 i 44.

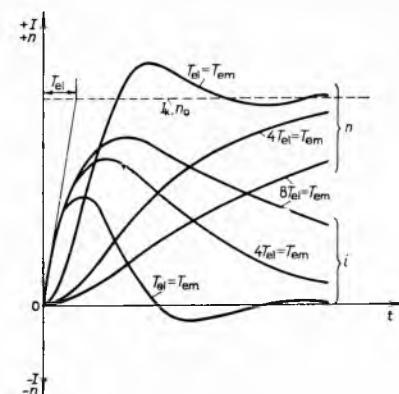
Kad je elektromehanička vremenska konstanta manja nego u graničnom slučaju, $T_{em} < 4 T_{el}$, jednadžbe prelaze u oblik

$$n = n_0 \left[1 - e^{-t/2 T_{el}} \left(\frac{\sin \omega t}{2 \omega T_{el}} + \cos \omega t \right) \right], \quad (I)$$

$$i = \frac{I_k}{T_{el} \omega} e^{-t/2 T_{el}} \sin \omega t, \quad (II)$$

gdje je ω apsolutna vrijednost diskriminante karakteristične

jednadžbe, $\omega = \sqrt{\frac{1}{T_{el}} \left(\frac{1}{T_{em}} - \frac{1}{4 T_{el}} \right)}$. Na sl. 45 vidi se da u slučaju jednakosti vremenskih konstanti $T_{el} = T_{em}$ nastaje kolebanje i brzine vrtnje i struje, a struja povremeno postaje čak i negativna,



Sl. 45. Zalet bez tereta elektromotornog pogona s nezavisno uzbudjenim istosmjernim motorom, uz različite odnose T_{el} i T_{em}

tj. elektromotorni se pogon povremeno odnosi prema mreži kao generator; pogon prigušeno titra. U elektromotornim pogonima to se uglavnom događa samo kad radni mehanizam ima zamašne mase koje su vrlo male prema zamašnoj masi motora, kad je snaga motora mala i kad nema uključenog predotpora u armaturnom strujnom krugu.

Kad je elektromehanička vremenska konstanta veća nego u graničnom slučaju, $T_{em} > 4 T_{el}$, prelaze jednadžbe stanja u oblik

$$n = n_0 \left[1 - e^{-t/2 T_{el}} \left(\frac{\sinh \omega t}{2 \omega T_{el}} + \cosh \omega t \right) \right], \quad (I)$$

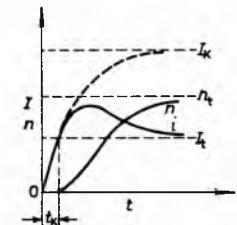
$$i = \frac{I_k}{\omega T_{el}} e^{-t/2 T_{el}} \sinh \omega t. \quad (II)$$

Sl. 45 prikazuje tok struje i brzine za odnos $T_{em} = 8 T_{el}$. Vidi se kako povećane mase (prema ranijim slučajevima) usporavaju pojavu.

Zalet s opterećenjem. Za zalet istog elektromotornog pogona, ali s teretom M_t , mogu se u principu prikazati isti odnosi, samo uz nešto složeniji matematički oblik jer dolazi i do promjene graničnih uvjeta. Od prvog trenutka ($t = 0$) pa sve dok struja ne naraste do iznosa I_t ($t = t_k$) koji odgovara momentu tereta M_t , elektromotorni pogon stoji ($n = 0$), jer motor ne razvija dovoljno velik moment (sl. 46). Kako osnovna jednadžba za električnu

ravnotežu prelazi u oblik $U = i R + L \frac{di}{dt}$, ($E = 0$!), prvi se dio prelazne pojave odvija kao u pasivnom kratkospojnom krugu, a tek poslije, kad je $i > I_t$, prema prikazanim zakonitostima. Dinamičke karakteristike elektromotornog pogona, u usporedbi sa statičkim karakteristikama elektromotora, ovise o više raznovrsnih parametara i ne mogu se jednoznačno unaprijed odrediti, već se, kad je to potrebno, određuju od slučaja do slučaja. Postupci i metode načelno su jednaki, bez obzira na to o kojoj se vrsti elektromotora radi, ali uzimaju u obzir individualne tehničke osobine pojedinih motora.

Karakter dinamičkog stanja očigledno određuju omjeri vremenskih konstanti. Prirodne su vremenske konstante samih elektromotora takve da se gotovo uvijek mogu očekivati složene prelazne pojave. Promjene unose dva elementa: zamašne mase radnog mehanizma i dodatni radni otpor u strujnom krugu rotora. Zamašne mase radnog mehanizma mogu biti i neznatne u usporedbi s masama motora, ali mogu biti i mnogostruko veće (desterostruko i više kod teškog pogona). Kad se mehanička i elek-



Sl. 46. Zalet elektromotornog pogona s nezavisno uzbudjenim istosmjernim motorom uz konstantni moment tereta

tromehanička vremenska konstanta povećava (uslijed toga što su mase radnog mehanizma velike), električna vremenska konstanta brzo postaje vrlo mala u odnosu prema njima te se ona može zanemariti i prelazna pojava se može razmatrati kao čisto mehanička. Dodatni radni otpor u strujnom krugu rotora djeluje dvojako. Povećava elektromehaničku vremensku konstantu proporcionalno ukupnom otporu i u istom omjeru smanjuje električnu vremensku konstantu (vrlo malo smanjuje mehaničku vremensku konstantu), što opet dovodi do stanja gdje za tehnička razmatranja zadovoljava i promatranje same mehaničke prelazne pojave. To je gotovo uvijek tako u elektromotornim pogonima s istosmjernim i kolutnim asinhronim motorima koji se zalijeću, koče i podešavaju otpornicima (dizalice, liftovi, izvozni strojevi, prevlaci, itd.).

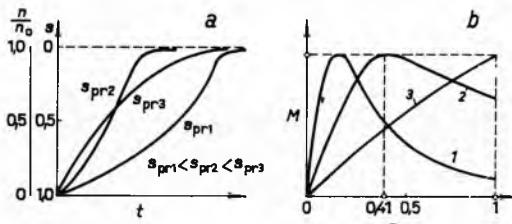
Vremenska analiza dinamičkih stanja elektromotornog pogona omogućava određivanje niza važnih tehničkih podataka i umnogome je osnovica modernog razvoja regulacione tehnike. No i u jednostavnijim elektromotornim pogonima omogućava zahvate za poboljšanje tehničkih i ekonomskih pokazatelja pogona. Na primjer: u elektromotornom pogonu s asinhronim motorom (bez efekta potiskivanja struje) za razvijeni moment motora M_m vrijedi Klossova jednadžba:

$$M_m = \frac{2 M_{pr}}{\frac{s_{pr}}{s} + \frac{s}{s_{pr}}} = \frac{2 a M_n}{\frac{s_{pr}}{s} + \frac{s}{s_{pr}}},$$

gdje je a omjer prekretnog momenta (M_{pr}) i nominalnog momenta (M_n), koji predstavlja za motor uvijek poznatu konstantnu veličinu. Trajanje mehaničke prelazne pojave (bez tereta, radi jednostavnosti) iznosi

$$t = \frac{m D^2 \pi n_s}{2} \int_{s_2}^{s_1} \frac{ds}{M_n} = \frac{T_m}{a} \left[\frac{s_{pr}}{2} \ln \frac{s_1}{s_2} + \frac{s_1^2 - s_2^2}{4 s_{pr}} \right],$$

gdje je uzeto $n_s (1 - s_2) = n_s \approx n_s$. Želi li se što kraća prelazna pojava, može se općenito potražiti minimum za trajanje prelazne pojave t u ovisnosti o prekretnom klizanju motora s_{pr} .



Derivacijom prednjeg izraza i iz zahtjeva da $\frac{dt}{ds_{pr}}$ iščezava u tački minimuma, slijedi da je:

$$s_{pr} = \sqrt{\frac{s_1^2 - s_2^2}{2 \ln \frac{s_1}{s_2}}},$$

a minimalno trajanje prelazne pojave:

$$t_{min} = \frac{T_m}{a} \sqrt{\frac{s_1^2 - s_2^2}{2} \ln \frac{s_1}{s_2}}.$$

Na osnovi ovih izraza može se analizirati bilo kakva prelazna pojava. Npr. za zalet, $s_1 = 1$, $s_2 = 0,05$ (ne smije se uzeti $s_2 = 0$ iz ranije objašnjениh razloga), izlazi $s_{pr} = 0,41$; za protustrukno kočenje od pune brzine do stajanja ($s_1 = 2$, $s_2 = 1$), $s_{pr} = 1,47$, a za potpuno reverziranje od pune brzine u jednom do pune brzine u drugom smislu vrtnje ($s_1 = 2$, $s_2 = 0,05$), $s_{pr} = 0,735$. Kako je prekretno klizanje asinhronog motora dano omjerom radnog i induktivnog otpora u rotorskom krugu, $s_{pr} \approx R_2/X_2$, može se utjecati na trajanje prelazne pojave podešavanjem radnog otpora na vrijednost koja daje potrebno prekretno klizanje za minimalno

trajanje prelazne pojave. Kolutnom se motoru može dodatni otpornik podesiti na potrebnu vrijednost, a kavezni se motor može posebno graditi za neki elektromotorni pogon tako da ima prirodno taj optimalni otpor. To je značajno u čitavom nizu jednostavnih i grubih elektromotornih pogona, bilo da su pogonjeni posebnim kaveznim motorima bilo da ih pogone kolutni motori s jednim stepenom otpornika (valjaoničke kotrljače, motori za podešavanje teških masa, prevlačnici, okretaci, gruba dizala). Sl. 47 prikazuje kvalitativno, a u medusobnom omjeru i kvantitativno, odnose vremena zaleta, pri čemu je krivulja momenta I prirodnja za motore, a ostale, 2 i 3, mogu se dobiti davanjem otpora u rotorski krug ili posebnom konstrukcijom.

Energetske prilike u dinamičkim stanjima. Svako tijelo momenta inercije J , kad se vrti kutnom brzinom ω , ima kinetičku energiju $E_k = J \omega^2/2$. Kad se to tijelo jednim zahvatom dovede iz stanja mirovanja u punu vrtnju brzinom ω , potroši se na gubitke bar još toliko energije, tako da mu za postizanje tog stanja treba dovesti bar dvostruku energiju. Za pogon s asinhronim motorom diferencijal vremena iznosi

$$dt = - J \omega_s \frac{ds}{M_m - M_t},$$

gdje M_m znači razvijeni moment elektromotora, M_t moment te reta, a s klizanje. Množeći lijevo i desno sa $M_m \omega_s s$, dobiva se

$$M_m \omega_s s dt = - J \omega_s^2 \frac{M_m}{M_m - M_t} s ds.$$

Budući da je $M_m \omega_s$ snaga u zračnom rasporu motora (snaga okretnog polja), a $M_m \omega_s s$ su gubici u bakru rotora, lijeva strana predstavlja diferencijal energije, koji integriran od početka do kraja prelazne pojave daje ukupne gubitke u bakru rotora:

$$\int_0^t M_m \omega_s s dt = A_{Cu2} = J \omega_s^2 \int_{s_2}^{s_1} \frac{M_m}{M_m - M_t} s ds.$$

Za zalet bez tereta ($M_t = 0$, $s_1 = 1$, $s_2 = 0$) slijedi: $A_{Cu2} = J \omega_s^2/2$.

Usporedi se grubo statička i dinamička stanja, može se zaključiti ovo: u statičkim stanjima gubici su otprikljike između 5 i 10% od korisnog rada, pri čemu na gubitke u bakru rotora otpada 2-4%. U dinamičkim stanjima mogu već sami gubici u bakru rotora biti istog reda veličine kao promjena kinetičke energije. Zapravo to ovisi o tome o kojoj se prelaznoj pojavi radi i o njenim granicama klizanja s_1 i s_2 , odnosno granicama kutne brzine ω_1 i ω_2 . Transformira li se navedeni izraz u općenitiju ovisnost o kutnoj brzini vrtnje, dobije se:

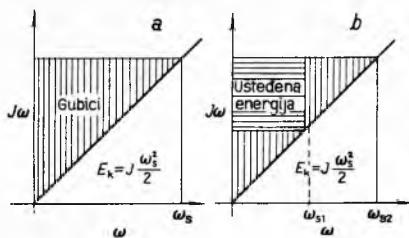
$$A_{Cu2} = J \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{M_m}{M_m - M_t} (\omega_0 - \omega) d\omega,$$

gdje ω_0 znači idealnu kutnu brzinu vrtnje praznog hoda. Tako npr. za protustrukno kočenje bez tereta ($M_t = 0$, $s_1 = 2$, $s_2 = 1$, odnosno $\omega_1 = -\omega_0$, $\omega_2 = 0$) slijedi da su gubici u bakru jednaki čak trostrukoj vrijednosti poništene kinetičke energije. Postoji li moment tereta, ti gubici još i porastu. Dakle, dinamička su stanja elektromotornog pogona s općenitog gledišta utroška energije znatno nepovoljnija od statičkog. Posebno se česte dinamičke pojave negativno odražavaju i na sposobnost elektromotora da vrši mehanički rad. Budući da se za vrijeme trajanja (čestih) prelaznih pojava akumulira u bakru nerazmijerno velika količina topline, snaga se elektromotora u stacionarnom stanju mora smanjiti da mu se namoti ne bi pregrijali preko dopuštene granice. Stanje se još pogoršava činjenicom da se u dinamičkim stanjima toplina iz namota odvodi lošije zbog toga što se veliki gubici energije u namotima pretvaraju u toplinu u razmijerno kratko vrijeme. Teški elektromotorni pogoni s velikom zamašnom masom radnog mehanizma i velikim momentom tereta posebno su pogodeni tom pojavitom.

Mjere za smanjenje gubitaka. Energetski gubici, uz smanjenje sposobnosti elektromotora da vrši mehanički rad, i vremenski gubici u proizvodnom procesu elektromotornog pogona negativni su efekti trome mase, momenta inercije. Gubici ener-

gije, posebno onaj njihov dio koji grijie namote, mogu se u nekim slučajevima smanjiti kako je navedeno u nastavku.

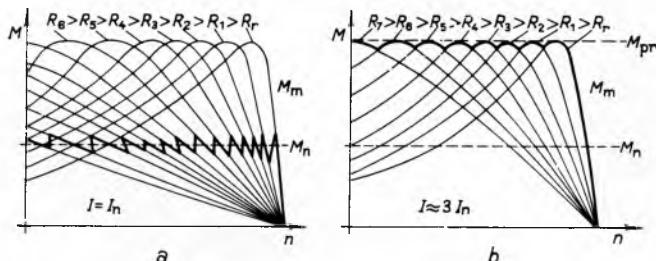
Prva je mogućnost da se prelazne pojave izvode postepeno, tj. da se s početne brzine $n_1(\omega_1)$ na konačnu brzinu $n_2(\omega_2)$ ne prelazi izravno, nego u nekoliko koraka, tj. s nekoliko međubrzina. Ta se metoda osniva na činjenici da je promjena kinetičke energije sistema (a i gubici koji zbog nje nastaju) proporcionalna razlici kvadrata početne i završne brzine vrtnje. Vršili se zalet elektromotornog pogona, npr., umjesto običnim kaveznim motorom, asinhronim polnopreklopnim motorom s dvije brzine, tako da se najprije uklopi manja brzina, a veća tek kad elektromotorni pogon postigne manju, uštedi se energija kako to pokazuje sl. 48 b. Slična se ušteda može postići ako se



Sl. 48. Usporedba gubitaka pri zaletu: a: običnog asinhronog kaveznog motora, b: dvobrzinskog asinhronog kaveznog motora

pogonu s asinhronim motorom postepeno diže frekvencija ili se preklapa na izvore različite frekvencije, ili ako se pogonu s istosmjernim motorom postepeno diže napon, ili se on preklapa na izvore različite visine napona. Idealan je u tom smislu pogon s Leonardovim agregatom, gdje se napon na motoru može podešavati i kontinuirano, pa se energetski gubici mogu svesti na po volji nisku vrijednost, ako se samo dovoljno polako izvodi dinamička pojava.

Druga je mogućnost da se prelazne pojave elektromotornog pogona izvode s uključenim otpornicima u strujnom krugu rotora (istosmjernog ili asinhronog kolutnog) motora. Time se uopće ne smanjuju energetski gubici izazvani prelaznom pojmom, ali se smanjuje termičko opterećenje elektromotora, jer se dio energetskih gubitaka pretvara u toplinu u otpornicima izvan stroja. Koliki će dio gubitaka otpasti na otpornike izvan stroja ovisi o veličini otpornika. Za zalet elektromotornog pogona u koji je ugraden kolutni asinhroni motor (s otpornicima) postoji bezbroj varijanti od kojih sl. 49 prikazuje dvije: a) zalet uz nominalni moment M_n i b) zalet uz prekretni moment M_{pr} . Očito



Sl. 49. Zalet kolutnog asinhronog motora otpornicima R_1 do R_r u rotorskom krugu, a s nominalnim momentom M_n , b s prekretnim momentom M_{pr}

je varijanta a) povoljnija s gledišta termičkog opterećenja stroja, a varijanta b) s gledišta trajanja prelazne pojave jer se zalet odvija uz povećani moment.

Treća je mogućnost u serijskom i paralelnom preklapanju nekoliko motora (kad elektromotorni pogon ima više jednakih istosmjernih motorova); ona se može dopuniti kombinacijom s otpornicima. Takva je primjena česta u oblasti vuče, npr. kod tramvaja i manjih električnih vlakova. Jedan takav primjer prikazuje i sl. 50.

Sve navedene mogućnosti imaju zajedničku manu da popravljajući energetske i toplinske prilike produžuju trajanje prelaznih pojava.

Izbor nominalne brzine vrtnje motora očigledno ima veliku ulogu u elektromotornim pogonima s čestim dinamičkim stanjima. Tražit će se ekonomično rješenje uz što povoljnije vremenske i energetske pokazatelje. Odabравši za elektromotorni pogon vrstu motora koja zadovoljava osnovne zahtjeve radnog mehanizma, općenito se postavlja još pitanje cijene. Cijena je, grubo uzeto, proporcionalna težini, a ova volumenu motora i dalje volumenu (težini) rotora, jer su veličine statora i rotora jedna drugoj proporcionalne. Moment motora proporcionalan je snazi motora i obratno proporcionalan brzini vrtnje, a snaga je proporcionalna induciranoj elektromotornoj sili i struji motora:

$$M_m \sim P/\omega \sim E I/\omega.$$

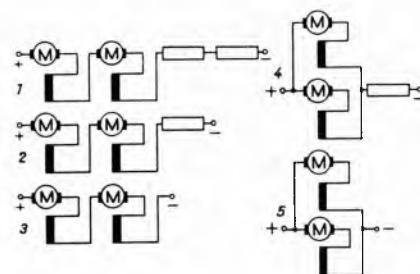
Elektromotorna sila proporcionalna je broju zavoja, indukciji u zračnom rasporu, brzini vrtnje, promjeru i duljini rotora. Nazivna struja motora proporcionalna je nazivnom strujnom oblogu, promjeru rotora i obratno proporcionalna broju zavoja. Iz toga se može dokazati da je

$$M \sim (D^2 \pi/4) l \cdot A B k,$$

gdje je l duljina a D promjer rotora, B indukcija u zračnom rasporu, A strujni oblog a k konstanta konstrukcijskih odnosa u stroju. Strujni oblog A i indukcija B pri današnjem su stanju gradnje električnih strojeva približno konstantni, a $D^2 \pi l/4$ je volumen rotora stroja, tako da je moment motora proporcionalan volumenu rotora i motora, pa prema tome težini i cijeni. Najmanji, najlakši, i najjeftiniji motor za neku potrebnu snagu u elektromotornom pogonu bit će motor što veće nominalne brzine vrtnje jer će uz $P = k \omega M$ imati najmanji nominalni moment. Tako se biraju motori za elektromotorne pogone u stacionarnom stanju, pogotovo jer brzohodni motori za istu snagu imaju i manje gubitke (asinhroni još i bolji $\cos \varphi$) od sporohodnih. Čak se u mnogo slučajeva i za sporohodne radne mehanizme u elektromotornim pogonima sa stacionarnim režimom biraju brzohodni elektromotori s reduktorom brzine vrtnje kao optimalno rješenje.

Medutim, za elektromotorne pogone s dinamičkim ili pretežno dinamičkim režimom okolnosti su nešto drugačije. U tom slučaju trajanje prelaznih pojava i energetski gubici pokušavaju se ocijeniti na osnovi zakona sličnosti. Prema tim zakonima, ako se geometrijski sličnim električnim strojevima linearne dimenzije mijenjaju za faktor x , druge se veličine mijenjaju (u stacionarnom stanju) ovako: površine, hlađenje, struje, magnetski tokovi — za faktor x^2 ; volumeni, gubici, težine, mase — za faktor x^3 ; snaga za faktor x^4 , itd. Električni strojevi mogu se smatrati geometrijski sličnim ako im je omjer među promjerom i duljinom rotora (D/l) jednak. Pri serijskoj gradnji električnih strojeva manje i srednje veličine taj je omjer (iz konstrukcijskih razloga) u jednom nizu strojeva redovno konstantan, pa za njih navedeni odnosi važe dosta tačno. Kod velikih i najvećih strojeva od konstantnosti omjera D/l po pravilu se nešto odstupa.

Ako se za dinamičke pojave odaberu neki »predstavnici« koji ih prikazuju, mogu se pomoći zakona sličnosti ocijeniti odnosi između parametara za geometrijski slične strojeve različitih brzina vrtnje u dinamičkom režimu. Tako gubici u bakru rotora za zalet bez tereta, $A_{Cu2} = E_K = J \omega^2/2$, dobro predstavljaju gubitke, a mehanička vremenska konstanta T_m trajanje prelaznih pojava. Na taj način dobiva se da za geometrijski slične električne strojeve iste snage, a različitim brzinama vrtnje, vrijede



Sl. 50. Primjer redoslijeda postupnog uklapanja vučnog pogona s dva serijska istosmjerna motora u stepenima 1...5

odnos

$$\frac{E_{k1}}{E_{k2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{0,25\cdots 0,5}; \quad \frac{T_{m1}}{T_{m2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{0,25\cdots 0,5}$$

To znači da brzohodni strojevi pri dinamičkim pojavama troše u omjeru drugog do četvrtog korijena brzinu vrtanje više energije na gubitke E_k i da im je trajanje prelazne pojave T_m u istom omjeru dulje. Pri tome se oštira vrijednost omjera odnosi na strojeve manje i srednje snage, a blaža na strojeve veće snage. Za elektromotorni pogon s dinamičkim ili pretežno dinamičkim režimom rada prikladniji je, dakle, skupljii sporohodni motor. Zamašne mase radnog mehanizma ne mijenjaju ovaj odnos, iako nisu uzete u obzir pri razmatranju zakona sličnosti, jer se one uвijek manifestiraju reducirane na osovinu motora. Posljedica je ovakvih odnosa da se u svim elektromotornim pogonima s dinamičkim karakterom rada, naročito onima veće snage, pojavljuju sporohodni motori, npr. u reverzibilnim valjačkim stanicima, rudničkim izvoznim strojevima, teškim transporterima i dizalicama.

Utjecaj momenta inercije i zamašnih masa. Prema dosad izloženom morao se dobiti utisak da moment inercije i zamašne mase elektromotornog pogona imaju samo štetan utjecaj, jer za njihovo svladavanje treba trošiti energiju, a ne daju nikakvog korisnog efekta. Međutim, pri pogonu s udarnim opterećenjima,

o kojemu dosad još nije bilo govora (pogon valjaonica, štanci i sl.) pojavljuje se i neki koristan efekt zamašnih masa i momenta inercije. Nastupaju li u nekom elektromotornom pogonu udarna opterećenja (sl. 51), bio bi elektromotor u periodima vremena t_1, t_2, t_3 i t_0, t_1 potpuno rasrećen, a u periodima t_1, t_2 i t_3, t_4 potpuno opterećen, te bi tako opterećivao i mrežu. Očito je da u trenucima t_1 i t_3 u motoru ne može skokom narasti struja na vrijednost I_t , tj. motor ne može skokom razviti potreban moment jednak momentu tereta M_t , a ne može ni skokom u trenucima t_2 i t_4 poništiti struju i moment. Moment tereta M_t dijelom svladavaju razvijeni moment motora M_m i moment ubrzanja M_u (zamašne mase elektromotornog pogona), pa je $M_t = M_m + M_u$ (M_u potpomaže moment motora!):

$$M_u = J \frac{d\omega}{dt} = \frac{m D^2 \pi}{2} \cdot \frac{dn}{dt}.$$

Neka je npr. posrijedi pogon s istosmjernim nezavisno uzbudnjim motorom. Tada vrijedi:

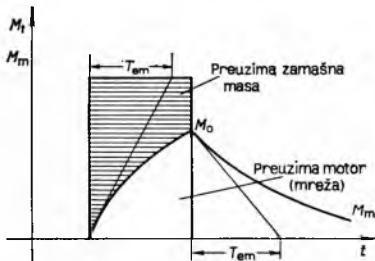
$$M_t - M_m = M_t - M_n \frac{n_0 - n}{n_0 - n_t} = - \frac{m D^2 \pi}{2} \cdot \frac{dn}{dt}.$$

Nakon separacije varijabli ova diferencijalna jednadžba dobiva oblik

$$\frac{M_n dn}{M_t(n_0 - n) - M_n(n_0 - n)} = - \frac{2 M_n dt}{m D^2 \pi (n_0 - n_t)} = - \frac{dt}{T_{em}},$$

čije je rješenje

$$M_m = M_t (1 - e^{-t/T_{em}}),$$



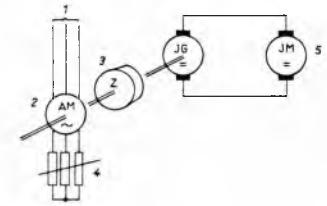
Sl. 52. Podjela opterećenja pri udarnom teretu između zamašne mase i elektromotora. M_t moment motora u času nestanka tereta

tj. zamašne mase preuzimaju dio $M_t e^{-t/T_{em}}$ tereta, na račun smanjenja brzine vrtanje. Stanje prikazuje sl. 52. Kad prođe opterećenje, motor ubrzava agregat i stoga razvija moment

$$M_m = M_0 e^{-t/T_{em}},$$

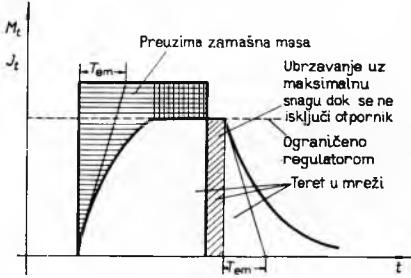
gdje je M_0 moment motora u trenutku nestanka tereta. Tako se udarci tereta ne prenose u mrežu, već se vremenski »izjednačuju«. Za što bolje izjednačenje povoljnja je veća kinetička energija elektromotornog pogona, dakle brzohodni motor, kojemu se katkada još dodaje i zamašnjak. Neprilike nastupaju kad su udarna opterećenja kombinirana s drugim dinamičkim pojavama, npr. sa zaletima i kočenjima. Tako je to kod teških reverzibilnih valjaničkih stanova (bluminga i slabinga), kad elektromotorni pogon poslije svake radne operacije koči do zaustavljanja i ubrzava do punе brzine u suprotnom smjeru, a svako je opterećenje udarno.

Proizvodni proces traži što kraće reverziranje — sporohodni motor — a zbog udarnih opterećenja i izjednačenja bila bi potvrdnija velika kinetička energija — brzohodni motor. Kad električna mreža podnosi udarce (i do 50 MW) rješenje je sporohodni motor. U slabijim mrežama rješenje je Ilgner-Leonardov agregat (sl. 53).



Sl. 53. Ilgner-Leonardov agregat.
1 Trofazna mreža, 2 trofazni motor, 3 zamašnjak, 4 vodni otpornik s regulatorom, 5 radni mehanizam

Pogonski je motor tog agregata istosmjerni sporohodni stroj (u najvećim pogonima s brzinom vrtanje 40...50 min^{-1}) s malom elektromehaničkom vremenskom konstantom. On prenosi udarce »tvrdо« u istosmjerni strujni krug, tj. na generator aggregata. Agregat je pogonjen trofaznim asinhronim kolutnim motorom, brzohodnim, tako da ima veliku kinetičku energiju (dodan je i zamašnjak). Stoga agregat prenosi udarce na mrežu mekano. U rotor asinhronog motora priključen je tekućinski otpornik s regulatorom kojim se otpor rotora može kontinuirano mijenjati. Regulator radi kao graničnik struje, tj. kad struja dosegne dozvoljenu (podešenu) granicu, regulator naglo uključuje otpor u rotor, čime povećava elektromehaničku vremensku konstantu, i cijeli ostatak tereta preuzima zamašna masa aggregata, na račun brzine vrtanje aggregata. Primjer prenosa udarca s ograničenjem preko aggregata prikazuje sl. 54. Iz toga slijedi da se inercija elektromotornog pogona može iskoristiti samo kad se upotrijebi kao akumulator kinetičke energije.



Sl. 54. Opterećenje mreže pri pogonu Ilgner-Leonardovim agregatom s ograničenjem tereta

Zanimljivo je pitanje udarnih opterećenja motora s potpuno tvrdom statičkom karakteristikom, kao što je sinhroni motor. I takav motor ne može skokom razviti potreban moment, pa brzina elektromotornog pogona mora u početku pojave padati. Vidi se i bez ulaska u dublju analizu da se to može dogoditi samo ako se istodobno povećava kut ϑ među rotacionim poljem statora i rotorom. Istovremeno s porastom kuta ϑ i padom brzine elektromotornog pogona formira se moment koji raste i preko iznosa momenta tereta, zaustavlja pad brzine i stabilizira novo sinhrono pogonsko stanje s novim, povećanim kutom ϑ . To se dogada kad je udarac momenta tereta M_t tolik da motor dospijeva formirati dovoljno velik moment. Ako je udarac momenta tereta M_t previelik, pa motor ne dospije formirati dovoljno velik moment prije nego što poraste do prevelikog iznosa, motor ispadne

iz koraka i elektromotorni se pogon počinje zaustavljati. I ovdje zamašna masa ima sličnu ulogu akumulatora energije kao u prije navedenom slučaju. Uz veću zamašnu masu elektromotora pogona mijenja se kut ϑ sporije, pa motor ima više vremena da formira potrebnii moment.

Stabilnost elektromotornog pogona. Za ocjenu kvaliteta elektromotornog pogona važno je svojstvo i njegova stabilnost. Razlikuje se pojam statičke stabilnosti (u stacionarnom stanju) od dinamičke stabilnosti (u dinamičkim stanjima).

Statička stabilnost. Ako elektromotorni pogon u stacionarnom stanju pod utjecajem bilo kakvog uzroka ili smetnje (u napojnoj mreži, u radnom mehanizmu itd.) promjeni brzinu vrtnje za iznos Δn_p , nakon prolaza smetnje mijenjan će se razlika brzine prema stacionarnoj po zakonu

$$\Delta n = \Delta n_p e^{(\tan \mu - \tan \tau)/J},$$

gdje je $\tan \mu$ nagib karakteristike momenta motora M_m , a $\tan \tau$ nagib karakteristike momenta tereta M_t u stacionarnoj radnoj tački (sl. 55). U statički stabilnom pogonu morala bi se brzina vrtnje vratiti nakon prolaza smetnje na prvobitnu vrijednost, tj. Δn bi moralno s vremenom postati jednako nuli. To će se i dogoditi kad je eksponent prirodne funkcije negativan, tj. uvjet je statičkog stabiliteta: $\tan \mu - \tan \tau < 0$, odnosno $\tan \mu < \tan \tau$. To znači: kad smetnja izbací pogon iz stacionarne brzine, moraju u posljednjem stanju vladati takvi odnosi momenta motora i momenta tereta da se oni opisuju promjeni uzrokovanoj smetnjom. U protivnom slučaju

Sl. 55. Statička stabilnost
Sl. 56. Primjeri statičke stabilnosti. Pogon je stabilan u tačkama B, D, E, a nestabilan u tačkama A i C. M_m karakteristika momenta motora, $M_{t1} \dots M_{t4}$ karakteristike momenta tereta

pogon nije statički stabilan, tj. ako ga smetnja izbací iz stacionarne tačke, on nastavlja povećavati razliku brzine vrtnje. Npr. na sl. 56 prikazane su karakteristike elektromotornog pogona koji je stabilan u tačkama B, D i E, a nestabilan u tačkama A i C.

Dinamička stabilnost. Pojam dinamičke stabilnosti elektromotornog pogona usko je vezan na regulirane (automatske) ili upravljane pogone. Kad u prelaznoj pojavi brzina vrtnje ne prelazi u neku konačnu vrijednost nego oko neke vrijednosti nepričušeno oscilira (koleba, njije), posrijedi je dinamički nestabilan elektromotorni pogon. Dinamički je, dakle, stabilan onaj pogon kome nakon prelazne pojave brzina vrtnje teži nekoj konačnoj vrijednosti. Svi slučajevi prikazani ranijom sl. 45 predstavljaju dinamički stabilne elektromotorne pogone, pa i slučaj kad je $T_{el} = T_{em}$, jer brzina teži konačnoj vrijednosti n_0 , iako kroz neko vrijeme oscilira oko nje. Sl. 57 prikazuje načelno kako je

Sposobnost elektromotora da savlada neki pogon s dinamičkim pogonskim režimom ne vidi se iz njegovih ubičajenih parametara: snage, struje, brzine vrtnje, priključnog napona, itd. Općenito je ocjena prikladnosti nekog elektromotora za neki konkretni elektromotorni pogon s češćim dinamičkim stanjima mnogo složeniji zadatok nego u slučaju stacionarnog elektromotornog pogona. Za neke vrste motora namijenjene specijalno elektromotornim pogonima s isključivo dinamičkim režimom (npr. motora za valjaoničke kotrljače) uveden je pojam *konstante ubrzanja K_u* , parametra koji pokazuje koliku ukupnu zamašnu masu može takav motor ubrzati od mirovanja do nominalne brzine vrtnje u toku jednog sata, a da mu se pri tome namoti ne pregriju. Pri gradnji trofaznih motora manjih i srednjih snaga općenitije namijene obično se daje podatak koliko puta može takav motor zaletjeti vlastitu zamašnu masu u jednom satu a da se ne pregrije, uz pretpostavku da osim zaleta i nakon zaleta ne vrši nikakav mehanički rad. Taj broj zaleta z ujedno je i neko mjerilo sposobnosti motora za dinamičke režime (u jednom se dijelu literature sa z označuje broj reverziranja). S porastom snage elektromotora broj z pada. Na osnovi zakona sličnosti (v. str. 429), za motore iste brzine vrtnje, omjer brojeva zaleta obratno je proporcionalan korijenu iz omjera snaga motora

$$\frac{z_1}{z_2} = \sqrt{\frac{P_2}{P_1}}.$$

On za sitne motore (ispod 1 kW) iznosi i više od 10 000, a za velike (iznad 1000 kW) iznosi i manje od 20. Vidi se da su mali motori sposobniji za savladavanje dinamičkih režima od velikih. Gradnja motora namijenjenih pretežno dinamičkim režimima (npr. gradnja dizaličnih motora) orijentira se na manje zamašne mase motora (povećanjem duljine rotora na račun promjera), kako bi se povećala njihova sposobnost »ubrzavanja«. To dolazi naročito do izražaja u teškim elektromotornim pogonima velikih snaga; kad je naime zamašna masa radnog mehanizma mnogostruko veća od zamašne mase motora, brzo dolazi do toga da svega jedan zalet na sat »potroši« cijelu sposobnost toplinskog opterećenja motora. I stacionaran režim takvih elektromotornih pogona predstavlja dinamički problem jer pogon treba zaletom dovesti u stacionarno stanje.

B. Jurković

IZBOR ELEKTROMOTORA ZA ELEKTROMOTORNI POGON

Termička stanja. U poglavljiju o energetskim prilikama u dinamičkim stanjima elektromotornog pogona već su neka pitanja izbora elektromotora za elektromotorni pogon načeta razmatranjem o izboru brzine vrtnje elektromotora (str. 429). Kao u tom slučaju, tako i općenito pri odabirajući prikladnog, »pravog« motora za neki pogon, dominantnu ulogu imaju pitanja u vezi s termičkim naprezanjima. Osnovni parametri motora: moment, snaga, priključni napon, itd. treba da su ispravno odabrani, ali moguće je i da se za dinamičke režime elektromotornog pogona parametri moraju odabrati drugačije nego za stacionarni režim.

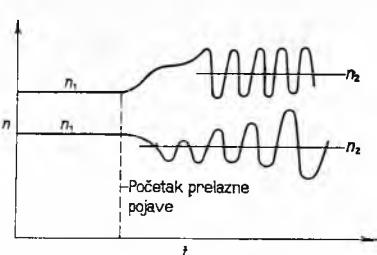
Pri stacionarnom režimu elektromotornog pogona izbor motora s obzirom na termičko opterećenje ne predstavlja nikakvu poteškoću, osim u slučaju ekstremno teških elektromotornih pogona, gdje opet dolaze do jačeg izražaja dinamička stanja. Snaga stroja u trajnom radu mora biti jednakna snazi koju traži radni mehanizam ili veća od nje. Pri tome uvijek su moguća znatna kratkotrajna preopterećenja koja su već pri konstrukciji stroja predvidena sa bar 60% (prema bilo kojim propisima). Termička slika u trajnom radu daje se ovdje samo radi zaokruženja cjeline. U procesu zagrijavanja vrijedi naime:

$$\theta = \theta_m (1 - e^{-t/T_t}) + \theta_0 e^{-t/T_t},$$

gdje je θ_0 nadtemperatura (nad okolinom) u početku trajnog rada, θ_m konačna nadtemperatura, a θ trenutna nadtemperatura namota stroja (sl. 58 a). T_t je toplinska vremenska konstanta (v. str. 425). Za hlađenje vrijedi:

$$\theta = \theta_p e^{-t/T_t},$$

gdje je θ_p početna nadtemperatura od koje hlađenje počinje (za potpuno ugrijani stroj $\theta_p = \theta_m$, sl. 58 b). Vladaju li u toku procesa hlađenja drugi uvjeti (recimo elektromotorni pogon stoji, pa se mijenja odvođenje topline) nego u toku procesa zagrijavanja

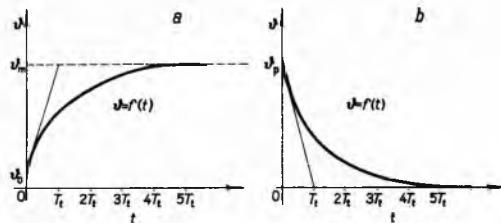


Sl. 57. Dinamička nestabilnost

brzina vrtnje dinamički nestabilnog pogona. Uzročnik je dinamičke nestabilnosti obično regulator ili neki drugi organ upravljanja elektromotornog pogona.

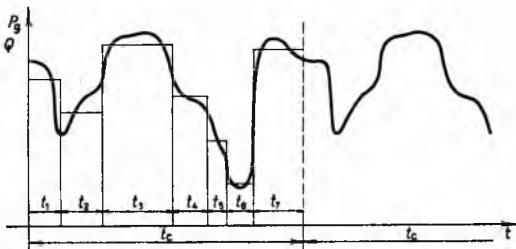
vanja, treba to uzeti u obzir promjenom toplinske vremenske konstante.

U (djelomično) dinamičkim stanjima problem je mnogo za-mršeniji. Razvijeno je više metoda izračunavanja stvarnog (termičkog) opterećenja motora za pojedine vrste elektromotornih pogona. Sve te metode izviru iz opće metode srednje vrijednosti gubitaka koje u elektromotoru izaziva neki elektromotorni pogon.



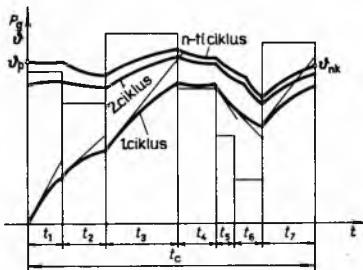
Sl. 58. Zagrijavanje (a) i hlađenje (b) motora u trajnom radu

Metoda srednje vrijednosti u osnovi je metoda pokušavanja. Provjerava se da li elektromotor može termički "izdržati" tok zagrijavanja uslijed opterećenja koja izaziva neki elektromotorni pogon. Za taj konkretni pogon s konkretnim motorom izračuna se vremenski tok ukupnih gubitaka koji je jednak toplinskom toku, $P_g(t) = Q(t)$ (sl. 59), koji za opći slučaj pretpostavimo proizvoljno. Kako se operacije radnog mehanizma poslije nekog određenog vremena t_e (tj. poslije završenog ciklusa operacije) ponavljaju, tako se i slika gubitaka ponavlja. Ciklus se može



Sl. 59. Aproksimacija krivulje opterećenja sa n odsječaka konstantnog iznosa gubitaka

podijeliti na vremenske odsječke t_i u kojima se pretpostave neki srednji konstantni gubici (sl. 59 i 60). U svakom od vremenskih odsječaka t_1, t_2, \dots stroj se ugrijava ili hlađi, a tok trenutne nad-temperature vidi se na sl. 60. U svakom narednom ciklusu početna je temperatura, dakako, jednaka konačnoj temperaturi prethodnog ciklusa. Nakon mnogo ciklusa temperatura se



Sl. 60. Tok zagrijavanja (tok trenutne nad-temperature) za opterećenje prema podjeli na sl. 59 uz srednje konstantne gubitke za svaki vremenski odsječak t_i

krivulja ponavlja. Zagrijanje (nadtemperatura) θ_p na početku ciklusa postaje jednako zagrijanju θ_{nk} na kraju ciklusa i iznosi:

$$\theta_{nk} = \theta_p e^{-t_e/T_t} + \frac{1}{Sh} [Q_1 (1 - e^{-t_1/T_t}) e^{-(t_e - t_1)/T_t} +$$

$$+ Q_2 (1 - e^{-t_2/T_t}) e^{-(t_e - (t_1 + t_2))/T_t} + \dots + Q_n (1 - e^{-t_n/T_t})].$$

U jednadžbi znači S površinu, a h koeficijent prelaza topline. Isto zagrijanje mogli bi izazvati i neki konstantni srednji gubici

$Q_{sr} = Q_{sr}$ kad bi samo dovoljno dugo trajali. Ako se to uvede u gornju relaciju, sve e-funkcije razviju u redove i uzmu samo prva dva člana, slijedi nakon sredjenja:

$$Q_{sr} = \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + \dots + Q_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}.$$

Motor za koji se provodi provjera odgovara pripadnom elektromotornom pogonu kad su izračunati srednji gubici manji ili jednaki njegovim nominalnim gubicima. Uvjet prikladnosti motora za odgovarajući mehanizam dakle glasi: $Q_{sr} = P_{g sr} \leq Q_n = P_{gn}$. Mjenjaju li se uvjeti hlađenja u pojedinim vremenskim odsječcima, može se pokazati da vrijedi ista metoda ako se uzmu u obzir odgovarajuće promjene toplinskih vremenskih konstanti:

$$Q_{sr} = \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + \dots + Q_n t_n}{\frac{T_t}{T_{t_1}} t_1 + \frac{T_t}{T_{t_2}} t_2 + \dots + \frac{T_t}{T_{t_n}} t_n}.$$

Na primjer, ciklus elektromotornog pogona rudničkog izvoznog stroja ima 4 izrazita pogonska stanja (sl. 61): zalet (t_1, T_z), radni period (t_2, T_t), zaustavljanje (t_3, T_s) i stajanje (T_4, T_s). Srednji ekvivalentni gubici iznose:

$$Q_{sr} = \frac{Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + Q_3 t_3}{\frac{T_t}{T_z} (t_1 + t_3) + t_2 + \frac{T_t}{T_s} t_4}.$$

Vremenska konstanta stanja (mirovanja) T_z veća je općenito 2...4 puta od

vremenske konstante T_t pri nominalnoj brzini vrtnje. Veće vrijednosti vremenske konstante stajanja odgovaraju većim, bolje hlađenim i izmjeničnim strojevima, a manje manjim, lošije hlađenim i istosmjernim strojevima. Prosječna vremenska konstanta T_z (pri zaletu, kočenju) odgovara nekoj vrijednosti između T_t i T_s , približno

$$T_z \approx 2 T_t T_s / (T_t + T_s).$$

Metoda srednjih vrijednosti gubitaka razvijala se u dva smjera. Iz nje je potekao princip tačnog računanja na računskim strojevima koji se primjenjuje samo pri proračunu ekstremno važnih ili skupih mehanizama. Ako se npr. za proračun zadane elektrolokomotive za koju su poznati svi parametri mreže, elektromotora i radnog mehanizma (pruga, njezini nagib, putna brzina, vojni red, otpori, masa vozila i tereta, itd.) odaberu radi primjene metode srednjih vrijednosti vrlo kratki vremenski razmaci, mogu se pomoći digitalnog računala potrebnom tačnošću izračunati sve nepoznate veličine i njihove promjene, zaključno sa zagrijavanjem namota elektromotora lokomotive. Na osnovi takvog takođe provedenog proračuna zagrijavanja vidi se da li lokomotiva može da savlada sve predviđene režime vožnje, da li ima dovoljno rezerve, itd.

Metode ekvivalentnih vrijednosti. Za jednostavne elektromotorne pogone primjena je metode srednje vrijednosti gubitaka prezamorna, posebno za brzu ocjenu koja se često traži. Zbog toga se razvoj te metode kretao prema pojednostavljenju (drugi smjer razvoja metode srednje vrijednosti), što je donjelo: metodu ekvivalentne struje, metodu ekvivalentnog momenta i metodu ekvivalentne snage. Za sve te metode važi da je uvjet ispravnosti izbora motora ispunjen ako su ekvivalentne vrijednosti koje daje konkretni pogon manje od nominalnih vrijednosti motora ili najviše jednake njima $I_e \leq I_n$, $M_e \leq M_n$, $P_e \leq P_n$, gdje I_e i I_n znače ekvivalentnu i nominalnu struju, M_e i M_n ekvivalentni i nominalni moment, a P_e i P_n ekvivalentnu i nominalnu snagu.

Metoda ekvivalentnih vrijednosti struje u praksi je dovoljno tačna za elektromotorne pogone u kojima motor za vrijeme pogona ima konstantan magnetski tok Φ , jer su onda gubici u željezu konstantni. To vrijedi za trofazni asinhroni motor i za nezavisni istosmjerni motor kad se ne upravlja poljem. Budući da su gubici u bakru proporcionalni kvadratu struje, izračunava se ekvivalentna struja (prema metodi srednjih gubitaka) po jednadžbi

$$I_e = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Tako ekvivalentna struja za primjer pogona rudničkog stroja prema sl. 61 glasi:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3}{\frac{T_t}{T_z} (t_1 + t_3) + t_2 + \frac{T_t}{T_s} t_4}}.$$

Budući da je moment motora proporcionalan magnetskom toku i struji (kod izmjeničnih motora još i faktoru snage $\cos \varphi$), može se, umjesto metode ekvivalentnih struja, za motore s konstantnim magnetskim tokom primijeniti *metoda ekvivalentnih momenata*:

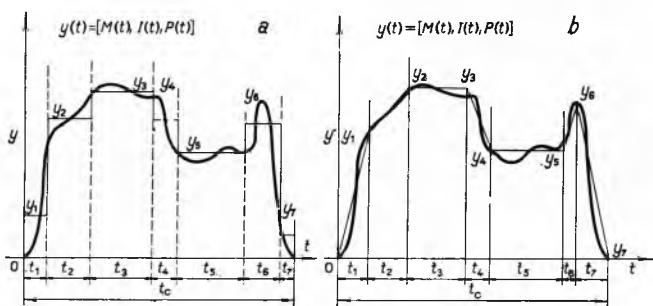
$$M_e = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Prednost joj je pred metodom ekvivalentnih struja što je za mnoge elektromotore poznata ovisnost $M_m(t)$, a nije poznata ovisnost $I(t)$, ali joj je manja u primjeni na izmjenične motore što zanemaruje utjecaj faktora snage $\cos \varphi$ i zato daje nešto manje tačne rezultate nego metoda ekvivalentnih struja.

Za elektromotorne pogone u kojima nema promjena brzine vrtnje može se (zbog toga što su snaga i moment proporcionalni, $P = k n M$) primijeniti *metoda ekvivalentne snage*:

$$P_e = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Pri primjeni metode ekvivalentnih vrijednosti nije uvijek najprikladnije podijeliti krivulju $I(t)$ ili $P(t)$ na vremenske odječke konstantnog srednjeg iznosa funkcije. Često je tačnije u njima stvarnu krivulju nadomjestiti pravcima koji se približavaju krivulji kao da se funkcija linearno mijenja, pa se time nadomjesna slika više približi realnosti. Sl. 62 prikazuje obje mogućnosti, i to sl. 62 a samo s odsječcima konstantnih veličina, a sl. 62 b s pravcima pogodnog nagiba. Pri tome se površine



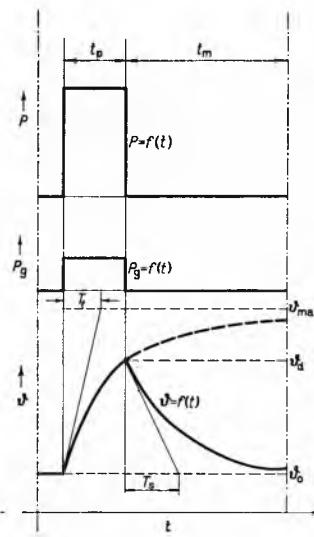
Sl. 62. Usporedba aproksimacije toka opterećenja: a) vremenskim odsječcima konstantnog opterećenja, b) pravcima pogodnog nagiba

trokutā, npr. onog ispod linije \overline{Oy}_1 na sl. 62 b, računaju po jednadžbi $Y_{e1} = \sqrt{\frac{y_1^2}{3}}$, površine »trapezā«, na primjer onog ispod linije $\overline{y_3 y_4}$ na slici 62 b, po jednadžbi $Y_{e4} = \sqrt{\frac{y_3^2 + y_3 y_4 + y_4^2}{3}}$ pa se tek s takvim ekvivalentnim veličinama funkcije po odsječcima stvarna ekvivalentna vrijednost

$$Y_e = \sqrt{\frac{y_{e1}^2 t_1 + y_{e2}^2 t_2 + \dots + y_{en}^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}.$$

Prednost je metoda ekvivalentnih i srednjih vrijednosti njihova univerzalnost i mogućnost da se prema značaju elektromotornog pogona može raditi s manjom ili većom tačnošću, sve do najveće tačnosti koja se postiže primjenom elektronskih računala. Mana im je što su u složenijim slučajevima, kao i sve metode pokušavanjem, zamorne i dugotrajne. Tome doprinosi i nezgodna okolnost da su veličine M , I , P ili P_g obično poznate kao funkcije brzine vrtnje, a ne kao funkcije vremena, što u slučaju dinamičkih pojava zahtijeva još i komplikirana preračunavanja.

Tipiziranje elektromotornih pogona. Tehnička praksa je odavna uvela standardne tipove opterećenja elektromotornog pogona da bi se pojednostavilo odabiranje motora bar za neke elementarne pogone. Različni tehnički propisi i standardi (uglavnom nacionalni) svrstavaju dio elektromotornih pogona u veći ili manji broj tipova. Ovdje je, bez obzira na konkretne propise, odabran nekoliko tipova po vrsti opterećenja, koja proširuju uvid u izbor elektromotora.



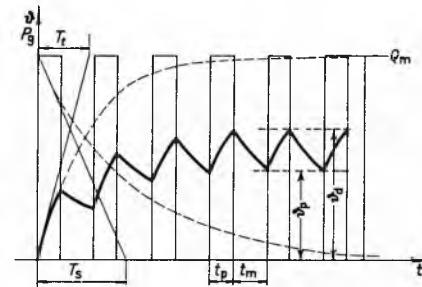
Sl. 63. Kratkotrajno opterećenje: snaga P , gubici P_g i tok krivulje zagrijavanja $\theta = f(t)$

žno i snage) u takvom pogonu iznad nominalne struje I_n može se računati iz poznatih jednadžbi zagrijavanja i hlađenja. Iz njih slijedi:

$$I_{krat} = I_n \sqrt{\frac{1 + \frac{P_{Fe}}{P_{Cun}} e^{-t_p/T_t}}{1 - e^{-t_p/T_t}}},$$

gdje su P_{Fe} gubici u željezu, a P_{Cun} nominalni gubici u bakru motora.

Ako se pogon s kratkotrajnim opterećenjem ponovo uklapa prije nego se motor dospije ohladiti, pa se takav radni ciklus ponavlja (sl. 64), radi se o *isprekidanim pogonu*. Pri njemu se smjenjuje radni period t_p s periodom mirovanja t_m . Intermittenčija ε tog pogona definirana je kao omjer između trajanja radnog perioda i trajanja cijelog ciklusa: $\varepsilon = \frac{t_p}{t_p + t_m} \cdot 100\%$. [Mnogi propisi tipiziraju pogone prema intermitenciji ε (15...65%) i ukupnom trajanju jednog ciklusa ($t_p + t_m$). Postoji mnogo elektromotornih pogona koji se mogu tako klasificirati. Ovamo ide najveći dio pogona za dizala, pogona za posluživanje industrijskih peći, transportnih i pomoćnih uređaja u metalurgiji itd.]



Sl. 64. Gubici i tok krivulje zagrijavanja pri isprekidanim opterećenju. T_p temperatura na početku rada, T_d temperatura na kraju rada

Na sl. 64 vidi se da je i u takvim pogonima zagrijanje motora manje nego pri pogonu u trajnom radu (ako je motor nominalno opterećen), pa se za određenu intermitenciju ε mogu dozvoliti snage motora veće od nominalnih u trajnom radu. Primjenom jednadžbi grijanja i hlađenja može se pokazati da je omjer između struje (približno i snage) motora u isprekidanim pogonu I_{int} i nominalne struje I_n prikazan jednadžbom

$$\frac{I_{int}}{I_n} = \sqrt{\frac{1 + e^{-t_p/T_t} \left[\frac{P_{Fe}}{P_{Cun}} (1 - e^{-t_m/T_s}) - e^{-t_m/T_s} \right]}{1 - e^{-t_p/T_t}}}.$$

Sličan je *trajni pogon s isprekidanim opterećenjem*. Elektromotorni pogon se trajno vrti s praktički konstantnom brzinom vrtnje, ali se smjenjuju periodi opterećenja t_p i periodi mirovanja t_m . Tipičan takav pogon jest pogon štanci (dubilica) i nekih kontinuiranih valjanočkih stanova (sl. 65). Razlikuje se od isprekidanog pogona samo po tome što je toplinska vremenska konstanta jednaka i u periodu hlađenja i u periodu zagrijavanja ($T_s = T_t$). Istim načinom kao za isprekidanog pogon može se pokazati da za omjer između struje (približno i snage) u trajnom pogonu s isprekidanim opterećenjem i nominalne struje vrijedi jednadžba

$$\frac{I_{tr\ int}}{I_n} = \sqrt{\frac{1 + e^{-t_p/T_t} \left(\frac{P_{Fe}}{P_{Cu\ n}} - e^{-t_m/T_t} \right)}{1 - e^{-t_p/T_t}}}.$$

Povećanje struje (snage) kratkotrajnog pogona, isprekidanog pogona i trajnog pogona s isprekidanim opterećenjem, u odnosu prema struci (snazi) motora u trajnom pogonu, to je veće što je veći omjer između nominalnih gubitaka u željezu P_{Fe} i bakru $P_{Cu\ n}$. Zato se za takve pogone grade posebni nizovi motora s gubicima u željezu povećanim na račun gubitaka u bakru, nazvani obično *dizaličnim motorima* po njihovoj najčešćoj primjeni. Trajanje ciklusa isprekidanog pogona ograničeno je propisima obično na 10 min, pa je pri razmatranju zanemaren (zbog relativno malog broja uklapanja na sat) problem dinamičkih gubitaka. Zato relacija izvedena za takav isprekidanog pogon primijenjena na pogon s većim brojem uklapanja na sat daje netačnu, suviše veliku vrijednost struje, pa motor može stvarno podnijeti samo manje opterećenje. Često se zbog toga zajedno s podacima o dizaličnim motorima daje i podatak o dozvoljenom broju uklapanja na sat z za određenu intermitenciju ϵ . Kad su dinamičke pojave u elektromotornom pogonu s kaveznim asinhronim motorom češće, može se broj dozvoljenih uklapanja dobro ocijeniti ako se podrobnije razmatraju energetske prilike u statičkom i dinamičkom dijelu ciklusa. Ako su P_{gn} gubici pri nominalnoj snazi motora u trajnom radu, P_g pri snazi koju treba elektromotorni pogon (u kilovatima), a A_z i A_k gubici u bakru za jedan zalet ili kočenje (u kilovat-satima), može se takvim motorom uz intermitenciju ϵ ostvariti

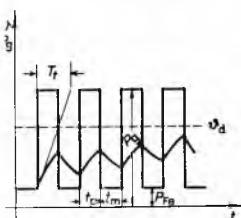
$$z \approx \frac{\left[(P_{gn} - P_g) \epsilon - P_{gn} \frac{T_t}{T_s} (1 - \epsilon) \right]}{(A_z + A_k)}$$

ciklusa na sat, dakako ciklusa s po jednim zaletom i kočenjem.

Pokretanje teških elektromotornih pogona (puštanje u rad) predstavlja s gledišta izbora motora svojevrstan problem. Pri velikim snagama koje zahtijeva radni mehanizam i uz vrlo velike zamašne mase, zagrijavanje je tokom pokretanja znatno. U elektromotornim pogonima velike snage i velike zamašne mase dolazi npr. do toga da se namoti kavezni motor već za vrijeme jednog zaleta zagriju preko dopuštene granice.

Takav teški elektromotorni pogon može se pokretati istosmjernim nezavisno uzbudjenim motorom ili kolutnim asinhronim motorom uz pomoć dodatnih otpornika, s približno nominalnim momentom (v. sl. 49 a), pri čemu se veći dio topline razvija u otpornicima van stroja, a u samom stroju pojavljuju se samo gubici reda veličine nominalnih. Takav način pokretanja zahtijeva velike i skupe pokretačke otpornike (za velike struje i s mnogo kontaktata) i izvjesnu automatiku za programiranje prepajanja, a i pokretanje je nešto usporenje. Takvi su motori skupljii od kaveznog, posebno istosmerni, a i osjetljiviji su prema kvarovima u eksploataciji. Takav elektromotorni pogon u cjelini znatno je komplikiraniji od pogona s kaveznim motorima i ima mnogo više osjetljivih mesta gdje može nastupiti kvar.

U praksi mnogi teški elektromotorni pogoni rade pod teškim uvjetima: uz trešnju, prašinu i sl. (pogoni drobilica, rotacionih peći, mlinova, teških ventilatora, ekshaustora, pumpi itd.) Upravo



Sl. 65. Trajni rad s isprekidanim opterećenjem, gubici i tok krivulje zagrijavanja

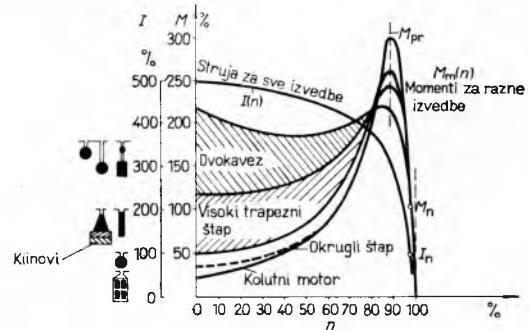
je za ovakve vrste pogona vrlo važna sigurnost rada i jednostavnost posluživanja, koje se često provodi i daljinski. Da nema problema sa zagrijavanjem pri pokretanju, grubi bi kavezni motori predstavljali idealno rješenje za ovu vrstu pogona jer su oni najneosjetljiviji, najjeftiniji i jer imaju najmanje potencijalnih izvora kvarova. Za takve elektromotorne pogone nastoji se stoga pažljivim izborom odrediti kavezni motor koji može izdržati predviđena termička naprezanja. Zapravo se mora već pri gradnji takvih motora posebno analizirati termička situacija. Kako zalet takvog elektromotornog pogona traje 15...100 s, mora se u principu predviđati da se svi gubici zbog zaleta akumuliraju kao toplina u namotima, jer se ovi za vrijeme zaleta ne dospiju ohladiti. Povišenje temperature pod tom pretpostavkom izlazi iz izraza za gubitke pri zaletu i iznosi za rotor:

$$\Delta\vartheta_2 = \frac{m D^2 \pi^2 n_s^2}{c_2 m_2} \int_{s_n}^1 \frac{M_m}{M_m - M_t} s ds,$$

a sličnim izvodom dobije se i izraz za stator:

$$\Delta\vartheta_1 = 3 R_1 \frac{m D^2 \pi n_s}{2 c_1 m_1} \int_{s_n}^1 \frac{I_1^2}{M_m - M_t} ds,$$

gdje su $\Delta\vartheta_1$ i $\Delta\vartheta_2$ zagrijanja uslijed zaleta za stator (indeks 1) i rotor (indeks 2), c_1, c_2 specifične topline namota, m_1, m_2 mase vodiča, R_1 , I_1 otpor i struja faze statorskog namota, s_n nominalno klizanje. Integral mora se dakako izračunati grafičkim putem. Zagrijanje statora može se smanjiti (kako se vidi iz izraza za $\Delta\vartheta_1$) povećanjem mase namota m_1 , čime ujedno pada i vrijednost otpora R_1 , što je uobičajeni konstrukcijski zahvat u takvom slučaju. Nadalje treba birati motor koji uz što veći moment motora M_m ima što manju struju u zaletu I_1 , da vrijednost integrala bude što manja. Sl. 66 prikazuje prirodne karakteristike $M_m(n)$ i $I_1(n)$ za velike asinhronne motore. Iz njih se vidi da prednjem uvjetu najbolje odgovara dvokavezni motor jer ima najveće momente uz pretpostavljene jednakne struje. Povećanje momenta konstrukcionim zahvatom povećanja otpora rotora ne dolazi u obzir jer smanjuje masu namota rotora, pa je taj utjecaj veći od utjecaja povećanja momenta, tj. povećava se zagrijanje rotora. Za rotor je kriterij minimalnog termičkog opterećenja više vezan na čisto toplinske odnose jer su mu gubici, stvoreni za vrijeme zaleta, proporcionalni kinetičkoj energiji (uz moment tereta $M_t = 0$) bez obzira na konstrukciju, a moment tereta unosi male promjene.



Sl. 66. Tok mehaničkih karakteristika $M_m(n)$ i $I_1(n)$ velikih trofaznih asinhronih motora različitih izvedbi rotora uz istu struju zaleta

Termički je najpovoljniji rotor s trapeznim štapovima (utorima) zbog velikog odvoda topline. Goli bakar namota je naime u utorima (sl. 66) natisknut na željezo klinovima koji su ispod bakra, pa je prelaz topline mnogo brži nego u dvokaveznom motoru, koji iz tehničkih razloga nužno ima neku minimalnu zračnost između namota rotora i željeza. Ona doduše iznosi svega 2...3 desetinke milimetra, ali to ipak u znatnoj mjeri sprečava prelaz topline. Prelaz topline različit je od slučaja do slučaja, ali pri pokretanju od ~1 min dvokavezni namot uspije predati okolini svega do 15%, a trapezni i preko 60% stvorene topline. Tako je jednokavezni rotor s trapeznim štapovima u termičkom

pogledu daleko najpovoljnija izvedba za teške elektromotorne pogone. To odlučuje i u ukupnom izboru budući da je rotor, zbog znatno manje mase bakra namota, kritičniji od statora. Za teške je elektromotorne pogone jednokavezni motor s trapeznim štapovima povoljniji od dvokavezognog, usprkos nepovoljnijem odnosu razvijenog momenta i statorske struje. U ovim pogonima postoji velika razlika u tome da li se elektromotor pokreće iz hladnog ili iz toplog (pogonskog) stanja. Pri pokretanju iz hladnog stanja temperatura njegovih namota tek se kreće prema dopuštenoj vrijednosti; pri pokretanju iz toplog stanja temperatura namota počinje rasti od dopuštene vrijednosti ili nešto ispod nje ako motor ima izvjesne rezerve u normalnom radu. To znači da pri pokretanju kaveznim motorom iz toplog stanja općenito nastaju termička preopterećenja, posebno u vrlo teškim elektromotornim pogonima. Da se izbjegne utjecaj takvih preopterećenja na životni vijek stroja za teške elektromotorne pogone s nešto češćim pokretanjem (jedanput dnevno ili češće), treba odabrati za $\sim 15\text{--}30\%$ veću snagu elektromotora nego što je ona koju traži radni mehanizam, kako bi se skraćenje životnog vijeka povećanim trošenjem uslijed dinamičkih stanja kompenziralo smanjenim trošenjem u trajnom radu.

Utjecaj okoline na izbor stroja. Opći uvjeti okoline elektromotornog pogona: vlaga, atmosfera, prašina, temperatura okoline, stabilnost podloge, visinski smještaj itd. imaju važnu ulogu u izboru motora. Tehnička je praksa razvila nizove strojeva koji su u manjoj ili većoj mjeri već svojom konstrukcijom zaštićeni od pojedinih negativnih utjecaja ili kombiniranog djelovanja više njih. Različiti propisi o gradnji motora razlikuju više kategorija motora zaštićenih protiv pristupa stranih tijela i posebno vode, od potpuno »otvorene« do potpuno zatvorene izvedbe nepropusne za vodu. Grade se motori kojima su namoti zaštićeni od vlage, soli, agresivnih kemijskih para, zatim zaštićeni od agresivnih bioloških faktora, pljesni, glijivica, termita itd. Postoje izvedbe motora otporne prema trešnji i udarima, zatim izvedbe pogodne za rad u atmosferi eksplozivnih zapaljivih plinskih smjesa i para (u kemijskoj industriji, u rudnicima itd.). Za svaku konkretnu okolinu bira se konstrukcionalna izvedba koja je predviđena za uvjete koji u njoj vladaju. Na povišenoj temperaturi okoline ili pri lokaciji elektromotornog pogona na znatoj nadmorskoj visini radi se o ispravnom izboru snage, budući da je opet u pitanju zagrijavanje elektromotora. Svi propisi, ograničavajući zagrijanje namota stroja (nadtemperaturu ϑ_d), ograničavaju zapravo temperaturu namota, jer predviđaju neki opći nivo temperature okoline ϑ_{on} , obično 40°C . Ako je temperatura okoline ϑ_o viša od predviđene, treba sniziti snagu stroja, da temperatura zagrijanog namota ne bi prešla vrijednost koju dopuštaju materijali izolacije (klasa izolacije) stroja. Općenito se snaga uslijed povišene temperature okoline smanjuje prema jednadžbi

$$P_n' = P_n \sqrt{\left(1 + \frac{\vartheta_{on} - \vartheta_o}{\vartheta_d}\right) \left(1 + \frac{P_{Fe}}{P_{Cu,n}}\right)} - \frac{P_{Fe}}{P_{Cu,n}}.$$

gdje je P_n nominalna, a P_n' smanjena snaga.

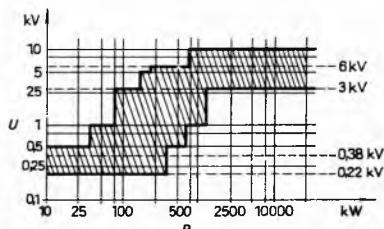
S porastom nadmorske visine pada gustoća zraka, pa je hlađenje elektromotora sve slabije. Do visine od 1000 metara nad morem nije potrebno uzimati u obzir oslabljeno hlađenje. Kad su visine smještaja veće, smanjena se snaga može izračunati iz formule

$$P_n' = P_n (1,1 - H \cdot 10^{-4}),$$

u kojoj su P_n i P_n' nominalna i smanjena snaga u kilovatima, H visina u metrima. Budući da je na velikim visinama temperatura okoline obično niska, dio smanjenja snage zbog visinskog položaja kompenzirat će se povišenjem snage prema malo prije prikazanoj relaciji za korekciju snage uslijed promijenjene temperature okoline ($\vartheta_o < \vartheta_{on}$).

Izbor priključnog napona također ima određenu ulogu u izboru motora. Danas je to pitanje manje važno jer bilo kakva transformacija napona predstavlja sve manji problem. Važno je samo da priključni napon elektromotora bude odabran u granicama koje daju dobro tehnološko i ekonomsko rješenje. Napon po vodiču ($e = B l v$) za električni stroj male snage malen je uslijed male duljine rotora l i male obodne brzine rotora v (B je indukcija u zračnom rasporu), a za velik stroj napon po vodiču je velik

zbog velikog l i v . Iz toga slijedi da strojevima manje snage odgovara niži, a strojevima veće snage viši priključni napon, jer je broj vodiča u namotu rotora ograničen i prema gore (vodiči ne smiju biti pretanki) i prema dolje (mora biti bar jedan vodič u svakom utoru!). Uvaže li se tehnologija izvedbe izolacije namota i sigurnost motora od električnog probroja kroz izolaciju, dolazi se do sličnog zaključka. Sl. 67 prikazuje mogućnosti tehnički ispravnog i ekonomičnog izbora priključnog napona za elektromotorne pogone s trofaznim motorima. Ispravan napon

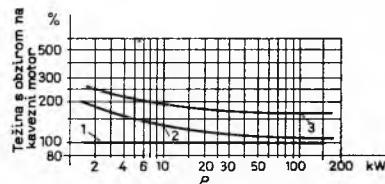


Sl. 67. Izbor napona za trofazne motore.
Ekonomični su naponi unutar šrafiranih područja

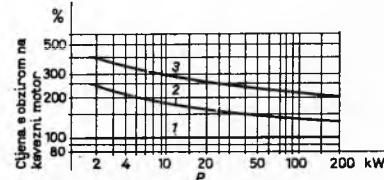
za određenu snagu nalazi se unutar šrafiranih područja ograničenog dvjema izlomljenim crtama, potegnutim na visini uobičajenih nominalnih naponova. Za kolektorske motore, mađa za njih u načelu vrijede isti odnosi, problemi komutacije postavljaju još veća ograničenja u izboru napona. Uglavnom se kod njih nastoji napon zadržati na donjoj mogućoj granici za veće snage motora.

Ekonomičnost elektromotornog pogona izuzetno je važna kategorija među onima koje utječu na izbor elektromotora. No, budući da se ekonomičnost nekog radnog procesa može sagledati tek uvezši u obzir čitav niz faktora od kojih je često veći dio izvan samog elektromotornog pogona, ne može se ovdje provesti cijelo kompleksno razmatranje. Zbog toga je ovdje spomenuto samo pitanje cijene elektromotora, kao elementa ispravnog izbora.

Trofazni asinhroni kavezni motor tehnički je najjednostavniji i najlakši stroj. Već je kolutni asinhroni motor iste snage i iste izvedbe nešto teži zbog kliznih koluta, a još teži je, zbog kolektora, istosmjerni motor. To je posebno izraženo kad strojevi imaju male snage. Odnose prikazuje sl. 68. Zbog skupih materijala



Sl. 68. Usporedba težine raznih vrsta motora:
1 kavezni motor, 2 kolutni motor, 3 istosmjerni motor

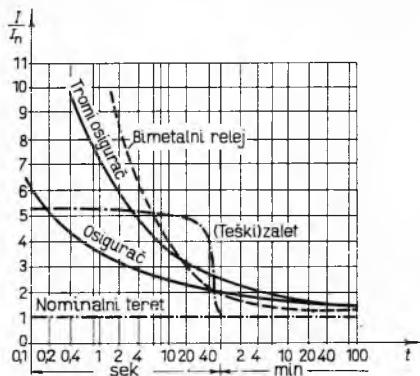


Sl. 69. Usporedba cijena raznih vrsta motora:
1 kavezni motor, 2 kolutni motor, 3 istosmjerni motor

jala kolektora i kliznih koluta (bakra, mjedi), a posebno zbog toga što je relativno mnogo rada potrebno za njihovu izradu, raste omjer cijena u korist kaveznog motora brže nego omjer težina (usporedi sl. 68 i sl. 69), što je još potencirano masovnošću velikoserijske proizvodnje kaveznih asinhronih motora, posebno manjih i srednjih snaga.

ZAŠTITA ELEKTROMOTORNIH POGONA

Zaštita elektromotornih pogona dio je opće zaštite postrojenja za proizvodni proces. Ona se sastoji od niza tehničkih mjer poduzetih u gradnji i eksploataciji jednog ili više među sobom vezanih elektromotornih pogona radi osiguranja od štete zbog kvarova samog postrojenja kao i od šteta u proizvodnom procesu. U širem smislu zaštita obuhvaća mnoga kompleksna tehnika, a u osnovi i ekonomski pitanja izgradnje pogonskih rezervi, višestrukog osiguravanja napajanja električnom energijom itd. U užem smislu zaštita elektromotornog pogona je zaštita protiv predviđljivih uzroka uništenja ili oštećenja (onesposobljenja) njegovog elektromotora. I u toj svojoj užoj funkciji zaštita mora voditi računa takođe o ekonomskoj važnosti konkretnog elektromotornog pogona, pa štititi elektromotor na način koji najbolje odgovara cjelini. Npr. za elektromotorni pogon sidrenog vitla ili kormila broda, ili za pogon pumpi na metalurškim pećima, gdje prekid rada elektromotornog pogona može dovesti do uništenja vrijednosti nerazmjerne većih od vrijednosti elektromotora, logično je da u momentima kvara ili preopterećenja motor dalje radi, čak i uz cijenu vlastitog uništenja, sve dok se ne uklopi rezerva ili poduzme druga prikladna mjera. Takva se nužnost posebno ispoljava kad prekid pogona može ugroziti sigurnost ljudi. U osnovi zaštita elektromotora u elektromotornom pogonu ide za tim da se izgrade mjerne, signalni i uklopni uređaji koji isključuju motor s napojne mreže čim dode do kvara, do strujnog ili termičkog preopterećenja, ili uopće do stanja koje bi moglo izazvati oštećenja ili uništenje motora, a posebno njegovih namota. Osnovni, historijski najstariji, elementi zaštitnih uređaja preuzeti su iz zaštite električnih mreža i instalacija opće namjene, a to su rastalni osigurači, prekostrujni releji i bimetalični termički releji (v. *Električni sklopni aparati*). Za elektromotorne pogone



Sl. 70. Vremenske karakteristike rastalnih osigurača i bimetaličnih releja; vremenske karakteristike struja motora

s trajnim opterećenjem u stacionarnom stanju problem zaštite zaista je sličan problemima pri zaštiti mreže. Nastupi li uslijed bilo kakvog uzroka preopterećenje (povećanje struje), osigurači, bimetalični relej ili prekostrujni relej isključe motor s mreže (ili daju najprije znak za uzbunu a tek zatim isključe motor). Sl. 70 pokazuje prosječne karakteristike (vremensku ovisnost) za normalne i trome rastalne osigurače i bimetalične releje, a sl. 71 za prekostrujni relej. Osigurači se uvek ugradjuju direktno u dovod struje, a releji obično preko strujnog transformatora. Pločice bimetaličnog releja savijaju se uslijed razvijene topline, i to proporcionalno kvadratu struje, a kad se bimetali savine do neke granice, on zatvori komandni kontakt. Bimetalični relej radi, dakle, kao i rastalni osigurač, na termičkom principu. Prekostrujni relej radi

na principu elektromagnetske indukcije. Svitak, kojim (direktno ili posredno preko strujnog transformatora) protječe struja motora, uvlači željeznu jezgru koja mehaničkim putem zatvara komandne kontakte. Položaj jezgre i brzina njena kretanja ovise

Sl. 71. Vremenske karakteristike prekostrujnog releja

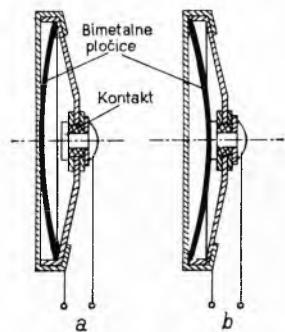
na principu elektromagnetske indukcije. Svitak, kojim (direktno ili posredno preko strujnog transformatora) protječe struja motora, uvlači željeznu jezgru koja mehaničkim putem zatvara komandne kontakte. Položaj jezgre i brzina njena kretanja ovise

o jačini struje; prekostrujni relej radi, dakle, na »strujnom« principu.

Zaštita u zaletu. Nažalost, već kod malo duljeg zaleta elektromotornog pogona, posebno u teškim elektromotornim pogonima, zaštita analogna mrežnoj radi krivo, tj. ona isključuje pogon još u pokretanju, što se vidi i na sl. 70, gdje karakteristika struje u zaletu siječe karakteristike rastalnih osigurača i bimetaličnog releja (slično je i s karakteristikom prekostrujnog releja). Upotrijebe li se zaštitni elementi dimenzionirani za (znatno) veću struju od nominalne struje motora, zalet se može izvršiti, ali tad više nema zaštite od preopterećenja, budući da elementi zaštite prorade tek pri struci daleko većoj od nominalne. Katkada se rastalni osigurači ipak tako dimenzioniraju, ali onda oni štite samo od kratkog spoja, a ne i od preopterećenja. Zaštita se u zaletu može ipak postići i s bimetaličnim ili prekostrujnim relejima ako se taj priključi preko posebnog vremenskog releja. Vremenski relej uklapa zaštitni relej tek kad prode određeno (za svaki elektromotorni pogon individualno) vrijeme, koje se podeši tako da se zaštita uklapa tek nakon prolaza velikih struja. Druga je varijanta tog principa da strujni transformator koji napaja zaštitu nije linearan, već zasićen (sl. 72). Tada je struja koja djeluje na zaštitni uređaj pri malim vrijednostima (u oblasti nominalne snage i uobičajenih preopterećenja) normalna, a zatno smanjena pri velikim vrijednostima.

Zaštita pogona s pretežno dinamičkim opterećenjem. Za takve elektromotorne pogone upravo opisana zaštita uopće ne odgovara. Već je ranije pokazano da se pri statičkom stanju proces zagrijavanja elektromotora odvija po eksponencijalnom zakonu s vremenskom konstantom T_t koja približno odgovara homogenom tijelu, a u dinamičkim stanjima da taj proces teče znatno brže, kao da se bakar ne hlađi. Može se približno reći da se taj proces odvija po eksponencijalnom zakonu čija bi znatno manja vremenska konstanta odgovarala samo namotu motora kao homogenom tijelu. Približno se toplinske pojave u motoru odvijaju sporo pri strujama manjim od $2 I_n$, a brzo pri strujama većim od $3 I_n$, a unutar vrijednosti struja od $2 I_n$ do $3 I_n$ brzina se toplinskih pojava postepeno mijenja. Zaštitni uređaj koji radi na prethodno opisanom principu nema takvu toplinsku karakteristiku, a takva bi ona morala biti u elektromotornim pogonima s češćim dinamičkim stanjima. Samo za ekstremno velike i skupe elektromotorne pogone katkad se grade posebni bimetalični releji s termičkim balastom, posebno za svaki konkretni pogon. Oko tijela bimetalica doda se u tom slučaju izolaciona masa, pa se na taj način u zaštitnom releju imitiraju toplinske vremenske konstante konkretnog elektromotora, adekvatno različitim opterećenjima. Elektromotorni pogoni sa čestim dinamičkim stanjima uspješno se štite samo zaštitom koja reagira direktno na temperaturu namota. U novije vrijeme razvijeno je više elemenata za takvu zaštitu (otpornički termometri, bimetalične sonde i sl.) koji se ugraduju u namot stroja, direktno mjeru njegovu temperaturu i ovisno o temperaturi uklapaju zaštitnu aparaturu ili alarmne uređaje. Ti elementi sami moraju imati mali toplinski kapacitet, kako bi brzo poprimali temperaturu namota koju mjeru. Za primjer je na sl. 73 prikazan princip rada male termosonde (bimetalične sonde). Bi-

metalna pločica (~1 cm promjera) napravljena je tako da je savijena u jednu stranu (sl. 73 a) ako je hladnija od neke kritične vrijednosti temperature, a u drugu stranu (sl. 73 b) ako je toplija od te vrijednosti. Pri kritičnoj vrijednosti temperature, a



Sl. 73. Princip izvedbe i funkciranje bimetalične termosonde

a to je najviša temperatura koja se još dopušta, pločica »pre-skoci« iz jednog položaja u drugi i zatvori kontakt. Time daje analog sklopki da iskluci motor ili alarmnom uredaju da dade potrebnii signal. Pomoću više takvih termosondi s različitim temperaturama preskoka mogu se u jednom motoru ostvariti različite kombinacije zaštite. Na primjer, kad se temperatura namota penje prema dopuštenoj, može prva termosonda uključiti signalni ili alarmni uredaj da upozori na takvo zagrijavanje. Ako temperatura namota dalje raste, može druga termosonda (građena za višu temperaturu) isklupiti stroj s mreže. U višebrzinskim kaveznim motorima može, na primjer, termosonda s najnižom kritičnom temperaturom signalizirati visoko zagrijanje, termosonda sa srednjom kritičnom temperaturom isklupiti namot za najveću brzinu i blokirati ga, da se smanje dinamički gubici, a tek treća sonda s najvećom kritičnom temperaturom potpuno isklupiti motor s mreže i zaustaviti elektromotorni pogon.

U elektromotornim pogonima, naročito u pogonima s trofaznim visokonaponskim motorima, uobičajena je još podnaponska (ili nulnaponska zaštita). Nestane li napon u mreži, podnaponski relj (po izvedbenom principu sličan prekostrujnom) isklupi odmah stroj s mreže da ne bi pri naglom povratku napona došlo do oštećenja motora zbog eventualnih strujnih udaraca. Moglo bi doći (iako se to zbiva rijetko) i do probroja izolacije uslijed eventualnih prenapona, a slabije mreže bi i teško izdržale zajednički udarac struje u svim motorima ako je napon izostao na dulje vrijeme. Katkada takva zaštita trofaznih motorova isklapa i kod sniženog napona (ne samo kod nestanka), da se spriječe posljedice povećanja struje.

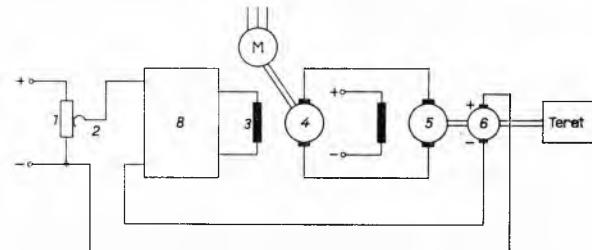
Z. Smolčić

REGULACIJA ELEKTROMOTORNIH POGONA

Često je potrebno da se u aparatima ili strojevima neka fizikalna veličina, tzv. regulirana (upravljava) veličina, mijenja (regulira, upravlja) promjenom neke druge fizikalne veličine, tzv. vodeće veličine. Vodeća veličina može djelovati na upravljanju veličinu preko otvorenog ili zatvorenog regulacionog kruga ili sistema.

U otvorenom regulacionom krugu (pri tzv. *upravljanju*) dovodi se vodeća veličina na uredaj koji daje signal za upravljanje na ulaz nekog pojačala. Pojačalo utječe na promjenu upravljane fizikalne veličine u skladu s promjenama vodeće veličine. Pri-

2 potenciometra 1, koji je napon namješten tako da odgovara željenoj brzini vrtnje. Kad brzina vrtnje motora odstupa od zadane vrijednosti, naponi su različiti a razlika među njima, tzv. napon odstupanja, razmjeran je odstupanju regulirane veličine od zadane vrijednosti. Napon odstupanja, pojačan u pojačalu 8, utječe na uzbudu 3 generatora i time mijenja brzinu vrtnje motora tako da se odstupanje smanjuje dok brzina vrtnje ne poprimi zadani vrijednost. Stručno se kaže da je krug djelovanja na sl. 75 zatvoren povratnim djelovanjem regulirane veličine.



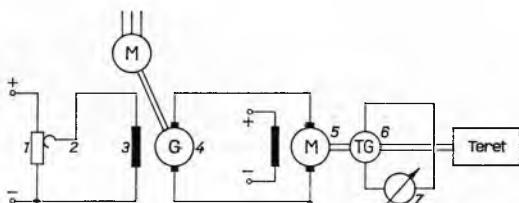
Sl. 75. Regulacija brzine vrtnje istosmjernog motora sa zatvorenim regulacionim krugom

Gradnja upravljačkog sistema s otvorenim krugovima je lakša, ali sistem sa zatvorenim krugovima ima niz drugih prednosti. Ovi sistemi, naime, uslijed svog principa rada ne treba da budu tačno baždareni jer oni neovisno o uzroku greške smanjuju odstupanje. Oni zadržavaju svoju veliku tačnost čak i onda kad se parametri njihovih elemenata tokom vremena bitno promijene (uslijed promjene temperature, utjecaja vlage, trošenja aparature itd.). (V. članak *Regulacija*.)

Danas se često kombinira upravljanje s reguliranjem.

Regulacioni sistemi elektromotornih pogona. U automatski reguliranim elektromotornim pogonima za valjaonice, u pogonima izvoznih strojeva u ruderstvu, u dizalima, na alatnim strojevima i u strojevima za obradu papira, tekstila, plastičnih masa itd. zauzima istosmjerni motor prvo mjesto. Brzina vrtnje nezavisno uzbudjenog istosmjernog motora može se veoma jednostavno regulirati promjenom napona armature, a i promjenom uzbudne struje motora. Reguliranje brzine vrtnje motora promjenom napona na rotoru izvodi se reguliranjem napona istosmjernog izvora koji napaja taj motor. Napon za rotor može se dobiti napajanjem iz reguliranog istosmjernog generatora (Leonardov pogon) ili napajanjem iz reguliranih ispravljajučih sklopova (upravljački pogoni). U elektromotornim pogonima manjih snaga ponekad se susreće i transduktori (magnetska pojačala) u kombinaciji s usmjerivačima kao regulirani izvori istosmjernog napona za pogon motora. U Leonardovom pogonu regulira se napon istosmjernog generatora promjenom njegove uzbudne struje, u ispravljajučim pogonima regulira se ispravljeni napon promjenom kuta paljenja ispravljajučih ventila (živih ili u posljednje vrijeme sve češće silicijumskih), a u transduktorima promjenom struje u upravljačkim namotima. To se upravljanje vrši s relativno vrlo malom snagom, što omogućuje da se za napajanje uzbudnih, odnosno upravljačkih namota, strojeva i uredaja za upravljanje kuta paljenja ventila primjenjuju elementi kao što su elektromasinska pojačala, magnetska pojačala, tiratronska (cijevna) i (u posljednje vrijeme sve češće) tranzistorska i tiristorska pojačala. Najčešće se regulira brzina vrtnje na određenu konstantnu vrijednost, pri čemu se željena vrijednost može podešavati u širokim granicama. Ponekad se zahtijeva takoder reguliranje momenta pokretanja ili struje armature motora na konstantnu ali podesivu vrijednost. Postoji mnogo različnih regulacionih sklopova; brojne publikacije svakodnevno donose nova rješenja koja se osnivaju na suvremenom stanju razvoja elektronike i tehnologije gradnje pomoćne opreme (uredajā, aparata). U nastavku opisano je samo nekoliko najvažnijih sklopova koji se primjenjuju u automatskoj regulaciji elektromotornih pogona.

Regulacija u Leonardovom pogonu. Osnovni spoj Leonardovog pogona prikazuje sl. 74. Sl. 76 predstavlja najjednostavniju načelu shemu automatske regulacije brzine vrtnje takvog pogona. Istosmjerni generator 2 uzbuduje se iz izmjenične mreže preko upravljanog ispravljачa 4 [sklopa tiratrona, ili živinog

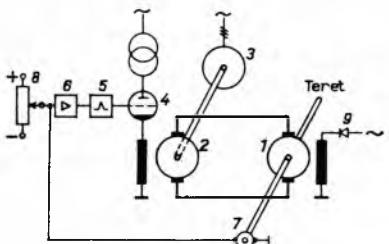


Sl. 74. Upravljanje brzinom vrtnje istosmjernog motora s otvorenim regulacionim krugom

mjer takvog sistema s otvorenim krugom djelovanja predstavlja upravljanje brzinom vrtnje istosmjernog motora, što prikazuje uredaj na sl. 74. Pomakom klizača 2 na potenciometru 1 mijenja se struja u uzbudnom namotu 3 generatora 4. To dovodi do promjene napona na stezalkama motora 5 kome se zbog toga promijeni brzina vrtnje. Mjernim instrumentom 7 mjeri se brzina vrtnje pomoću tahogeneratora 6 (v. *Električna mjerena*, TE 3, str. 659). Ta upravljana veličina, tj. brzina vrtnje, ne utječe više na vodeću veličinu, jer ne postoji zatvorena petlja, pa odatile i naziv otvoreni krug ili otvoreni sistem. U otvorenim sistemima može se mjeriti rezultat upravljačkih procesa, ali sistem ne poduzima nikakve mjerje koje bi ispravljale pogrešku ili smanjile odstupanje od željene veličine.

Nasuprot tome u zatvorenim sistemima (pri tzv. *regulaciji*) uvijek se mjeri stvarna vrijednost regulirane veličine i uspoređuje sa željenom, a sistem radi tako da razliku među njima nastoji održavati u što užim granicama. Primer zatvorenog sistema regulacije brzine vrtnje istosmjernog motora prikazuje sl. 75. Ova se slika razlikuje od prethodne po tome što se napon na stezalkama tahogeneratora 6 uspoređuje s naponom na klizaču

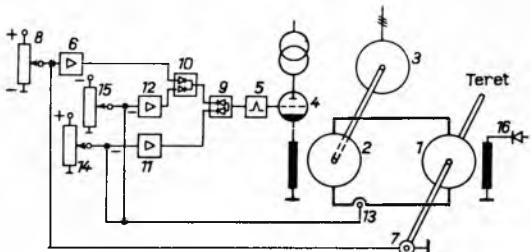
ventila, ili (u posljednje vrijeme sve češće) tiristora]. Pomoću impulsnog uređaja 5 za upravljanje rešetkom (mrežicom) ventila 4 može se mijenjati napon uzbude generatora od nule do maksimalne vrijednosti. Impulsnim uređajem upravlja pojačalo 6 koje pojačava signal odstupanja dobiven usporedbom namještene vrijednosti na potenciometru 8 i stvarne vrijednosti koju daje tahogenerator 7. Regulacioni sistem teži smanjenju iznosa tog signala



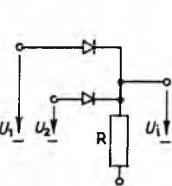
Sl. 76. Regulacija brzine vrtnje elektromotor-nog pogona s Leonardovom grupom. 1 Pogonski motor, 2 istosmjerni generator, 3 asinhroni motor, 4 upravljanji ispravljач, 5 impulsni uređaj, 6 pojačalo, 7 tahogenerator, 8 potenciometar, 9 ispravljач uzbude motora

odstupanja, tj. nastoji da brzina vrtnje bude što bliža željenoj vrijednosti. Namještanjem davača željene vrijednosti (potenciometra) može se mijenjati (voditi) brzina vrtnje motora. Potrošak snage za to namještanje iznosi samo nekoliko vata, a motor može imati snagu i nekoliko megavata. Istosmjerni motor 1 uzbuduje se u ovom slučaju iz posebnog ispravljača 9.

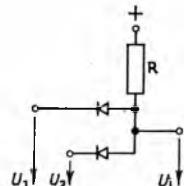
Prikazani spoj ima izvjesnih slabosti. Kad se npr. željena vrijednost naglo (udarno) poveća za veći iznos, može prenagli porast induciranih napona generatora prouzrokovati u toku prelazne pojave previšoku struju armature, koja bi mogla, za vrijeme dok motor ne postigne novu namještenu brzinu vrtnje, ošteti kolektor. Stoga treba predvidjeti spoj za ograničenje struje armature, naročito u zaletu, a i pri kočenju, čime će se spriječiti nedozvoljeno opterećenje motora. Sl. 77 prikazuje regulaciju



Sl. 77. Regulacija brzine vrtnje (prema sl. 76) s paralelnim ograničenjem armaturne struje. 1-8 kao u sl. 76, 9 i 10 nelinearni članovi, 11 i 12 pojačala, 13 davač istosmjerne struje, 14 i 15 potenciometri, 16 ispravljач za uzbudnu struju



Sl. 78. Nelinearni član (birac) koji propušta manji signal. U_1 signal regulirane veličine (brzine vrtnje), U_2 signal veličine koja se ograničuje (armaturna struja), U_3 izlazni signal (manji od para U_1 , U_2)



Sl. 79. Nelinearni član (birac) koji propušta veći signal. U_1 signal regulirane veličine (brzine vrtnje), U_2 signal veličine koja se ograničuje (armaturna struja), U_3 izlazni signal (veći od para U_1 , U_2)

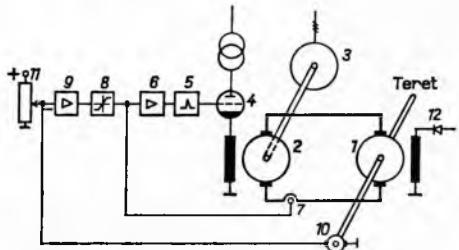
brzine vrtnje Leonardovog pogona s paralelno spojenim sklopom za ograničenje struje. Za razliku od sheme prikazane na sl. 76, na sl. 77 postoje još nelinearni članovi 9 (sl. 78) i 10 (sl. 79) (tzv.

birači) koji propuštaju signal manji odnosno veći od nekog poredbenog signala, zatim dva dodatna pojačala 11 i 12, davač istosmjerne struje 13 i potenciometri za namještanje 14 i 15.

Davač istosmjerne struje 13 treba da mjeri struju armature po iznosu i smjeru. Često se umjesto magnetskog transformatora istosmjerne struje (kakav je simbolički označen na slici) primjenjuje Hallov generator. Napon iz davača 13 uspoređuje se na potenciometrima 14 i 15 s namještenim naponima. Razlike se dovode pojačalima 11 i 12. Ako je struja zaleta, ili uopće struja u normalnom motornom pogonu, manja od namještenih vrijednosti na otporniku 14, pojačalo 11 se potpuno otvori i na izlazu se pojavi veliki pozitivni napon. S druge je strane pojačalo 12 zatvoreno i na njegovom izlazu vlasti negativni napon. Sada je izlazni napon pojačala 6 veći od naponova pojačala 12, a manji od naponova pojačala 11. Nelinearni članovi 10 i 9 propuštaju dakle signal pojačala 6 na impulsni uređaj za upravljanje ispravljачa 5. Spoj za ograničenje struje rotora ne djeluje. Ako struja zaleta premaši dozvoljenu vrijednost, pojačalo 11 nije više otvoreno. Čim napon na izlazu 11 postane manji od naponova pojačala 6, nelinearni član 9 propusti signal pojačala 11, koji dalje djeluje na impulsni uređaj i smanjuje uzbudni napon generatora, tako da struja zaleta ne prekoraci dozvoljenu vrijednost. Kad proradi spoj za ograničenje struje zaleta, signal odstupanja brzine vrtnje tolik je da je pojačalo 6 potpuno otvoreno. Time je osigurano da nelinearni član 9 sigurno propusti napon pojačala 11. Čim struja armature više ne premašuje dozvoljenu vrijednost, ponovo proradi pojačalo 6, a time i krug za regulaciju brzine vrtnje. Ako struja kočenja prekoraci dozvoljenu vrijednost, otvor se pojačalo 12, a nelinearni član 9 propusti njen napon prema impulsnom uređaju. Uzbudni napon generatora raste tako da struja kočenja ne prekoraci dozvoljenu vrijednost. Pri kočenju odstupanje brzine vrtnje smanjuje izlaz pojačala 6.

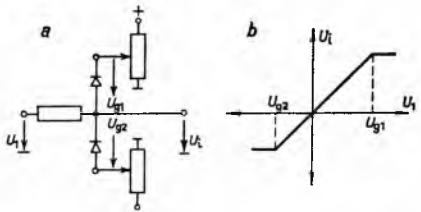
Dodavanjem spoja za ograničenje struje armature postiže se ubrzanje ili kočenje motora uz gotovo konstantnu struju, koja se podešava tako da bude manja od maksimalno dozvoljene vrijednosti.

Spojevi s podređenim regulacionim krugovima. U opisanom spoju lako dolazi do neželjenih pojava nestabilnosti pri prelazu iz stanja reguliranja brzine vrtnje u stanje ograničenja.



Sl. 80. Regulacija brzine vrtnje (prema sl. 76) s podređenim regulacionim krugom za ograničenje armaturne struje. 1 Pogonski motor, 2 istosmjerni generator, 3 asinhroni motor, 4 upravljanji ispravljач, 5 impulsni uređaj, 6 pojačalo, 7 davač istosmjerne struje, 8 graničnik, 9 pojačalo, 10 tahogenerator, 11 potenciometar, 12 ispravljач za uzbudnu struju

struje armature i obratno. Takve pojave lakše se izbjegavaju spojevima s tzv. podređenim regulacionim krugovima (sl. 80). Unutarnji regulacioni krug za ograničenje struje armature sastoji se od generatora 2, upravljanog ispravljaka u uzbudnom krugu generatora 4, impulsnog uređaja 5, pojačala 6 i davača istosmjerne struje 7. Željenu vrijednost ovome krugu daje vanjski regulacioni krug za regulaciju brzine vrtnje, koji se od dosada opisanih razlikuje po tome što je iz pojačala 9 uključen element za ograničenje, graničnik 8 (limiter). Preko graničnika dobiva krug za regulaciju struje rotora takvu željenu vrijednost da stvarna vrijednost brzine vrtnje što manje odstupa od vrijednosti namještene na potenciometru 11, a kako je izlazni napon limitera ograničen, postiže se jednostavno ograničenje armaturne struje. Podređeni krug regu-

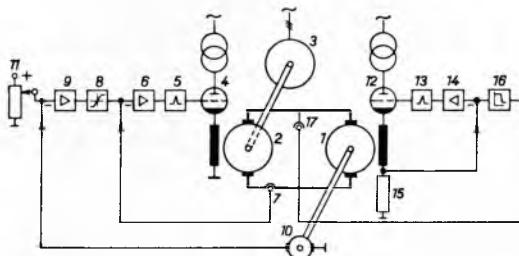


Sl. 81. Spoj za ograničenje (graničnik, limiter) (a) i karakteristika graničnika (b). U_1 signal veličine koja se ograničuje (struja armature), U_{g1} , U_{g2} granični naponi, U_1 izlazni ograničeni signal

lacija struje rotora radi neprekidno, a nadređeni ga krug regulacije vrtnje vodi. Spoj i princip djelovanja i karakteristika limitera prikazani su na sl. 81.

Dodatačna regulacija brzine vrtnje slabljenjem polja (tj. regulacijom uzbude motora) poželjna je ponekad i pored regulacije armature.

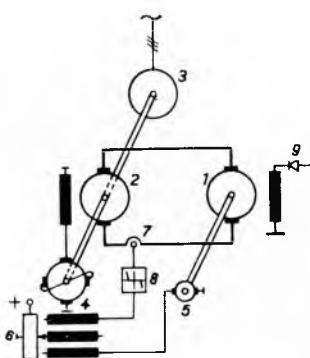
Pri primjeni spojeva treba voditi računa o međusobnoj sprezi obaju krugova. Sl. 82 daje primjer takvog spoja sa spregnutim regulacionim krugovima. Napon armature indirektno je ograničen na taj način što počinje smanjivati uzbudu motora čim se prekorači njegova nominalna vrijednost. Tako dolazi do povećanja brzine vrtnje, pa regulator brzine djeluje na napon armature nastojeći zadržati željenu vrijednost brzine vrtnje. I ovdje je



Sl. 82. Regulacija brzine vrtnje (prema sl. 76) s podređenim regulacionim krugom za ograničenje brzine vrtnje, spregnuta s regulacijom uzbudne struje. 1 Pogonski istosmjerni motor, 2 istosmjerni generator, 3 asinhroni motor, 4 upravljanu ispravljajuća sklopna grupa, 5 impulsni uredaj, 6 pojačalo, 7 davač istosmjerne struje, 8 graničnik, 9 pojačalo, 10 tahogenerator, 11 potenciometar, 12 upravljanu ispravljajuća sklopna grupa, 13 impulsni uredaj, 14 pojačalo, 15 otpornik za stvaranje pada napona koji služi za regulaciju uzbudne struje, 16 nelinearni član, 17 davač istosmjerne struje

krug regulacije struje armature podređen krugu regulacije brzine vrtnje, a uz to postoji u uzbudnom krugu motora poseban krug za regulaciju uzbudne struje. Željenu vrijednost uzbudne struje motora daje nelinearni član 16 koji mijenja svoj izlazni napon u ovisnosti o naponu armature motora (davač 17). Kad je namještena brzina vrtnje manja od nominalne, i napon armature je manji od nominalne vrijednosti, pa tada nelinearni član 16 daje konstantni napon koji odgovara punoj uzbudnoj struci motoru. Ako brzina postaje veća, raste i napon armature. Kad napon armature pređe nominalnu vrijednost, izlazni napon nelinearnog člana 16 jako padne, pa stoga padne i struja uzbude motora. Tako je napon armature praktički ograničen na nominalnu vrijednost čak i u toku prelaznih pojava. Nelinearni član 16 ima i donje ograničenje, kako bi se spriječio pad uzbudne struje motora ispod dozvoljenog minimuma.

Regulaciju pri beskontaktnom reverziranju (pri reverziranju bez otvaranja i zatvaranja sklopki) prikazuje sl. 83. Elektrostrojno pojačalo 4 [amplidin (v. članak Električni strojevi), rapidin i sl.] napaja uzbudni namot generatora 2. Kad zahtjevi za tačnost održavanja brzine vrtnje nisu načito oštiri, može se dinamičko pojačalo upotrijebiti direktno kao regulator. Stvarna vrijednost iz tahogeneratora 5 i željena vrijednost iz potenciometra 6 uspoređuju se u dva odvojena upravljačka namota. Reverziranje je omogućeno jednostavnim preklopmom napona željene vrijednosti. Djelovanje ograničenja struje rotora vidljivo je na shemama (davač 7 i graničnik 8).

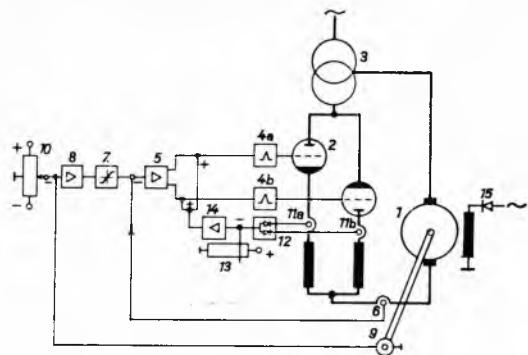


Sl. 83. Regulacija brzine vrtnje elektromotornog pogona Leonardove grupe s beskontaktnim reverziranjem. 1 Istosmjerni pogonski motor, 2 istosmjerni generator, 3 asinhroni motor, 4 amplidin, 5 tahogenerator, 6 potenciometar, 7 davač istosmjerne struje, 8 graničnik, 9 ispravljajuća uzbudna struja

Ispravljajući pogon. Osnovne sheme jednostrukih i dvostrukih ispravljajućih sklopova i principi djelovanja navedeni su u poglavljaju o statici elektromotornih pogona (v. str. 423, sl. 24 do 28). Jednostruki ispravljajući sklopovi (v. sl. 24 do 26) omogućuju regulaciju brzine vrtnje u jednom smjeru i reverziranje prepolariziranjem uzbudne struje. Želi li se beskontaktno brzo

reverziranje, potrebni su dvostruki unakrsni (v. sl. 27) ili antiparalelni (v. sl. 28) ispravljajući spojevi. U tim spojevima pojavljuje se kružna struja kroz obje grupe ispravljajuća i ona je uslijed malih otpora u tom krugu veoma osjetljiva prema razlikama kuta paljenja obiju grupa. Stoga se ranije obično uvodila dodatna regulacija kružne struje. Danas postoje u reguliranim ispravljajućim pogonima već tako precizni elementi regulacije i logički uklopnici elementi da se ti spojevi mogu izvoditi i bez dodatne regulacije kružne struje. Sl. 84 prikazuje automatsku regulaciju brzine vrtnje ispravljajućeg reverzibilnog elektromotornog pogona.

Impulsnim uređajima 4a i 4b upravlja se pomoću protutaktnog pojačala za regulaciju struje armature motora. Željenu vrijednost struje armature daje već prije opisani graničnik 7 nadređenog kruga regulacije brzine vrtnje. Radi ograničenja kružne struje dodana je regulacija kružne struje. Transformatori istosmjerne struje 11a i 11b mjeru struje obaju ispravljajuća. Nelinearni birač 12 propušta samo manji signal koji se nakon usporedbne na otporniku 13 pojavičava (14) i dovodi na oba impulsna uređaja tako da pri prevelikoj kružnoj struci oba ispravljajuća budu upravljana prema izmjenjivačkom pogonu. Brzina vrtnje može se potenciometrom 10 kontinuirano namještati od pozitivnih do negativnih vrijednosti. Pri tome obje grupe ispravljajuća beskontaktno prelaze iz ispravljajućeg u izmjenjivački pogon i obratno. Iznos kružne struje ostaje ispod određene vrijednosti.



Sl. 84. Regulacija brzine vrtnje ispravljajućeg elektromotornog pogona u antiparalelnom spoju. 1 Istosmjerni pogonski motor, 2 transformator, 4a i b impulsni uredaj, 5 pojačalo, 6 davač istosmjerne struje, 7 graničnik, 8 pojačalo, 9 tahogenerator, 10 potenciometar, 11 a i b davači istosmjerne struje, 12 nelinearni birač, 13 potenciometar, 14 pojačalo

Kako ispravljajući pogoni u unakrsnom i antiparalelnom spoju trebaju dvostruki broj ispravljajućih ventila, primjenjuju se samo tamo gdje je potrebno kontinuirano reverziranje bez mrtvih vremena. U svim ostalim slučajevima ekonomičnije je, zbog manjeg broja ventilâ, primijeniti jednostruki spoj.

Regulacija brzine vrtnje izmjeničnih motora. Brzina vrtnje ispravljajućih istosmernih elektromotornih pogona može se regulirati brzo, kontinuirano, uz minimalne gubitke. U posljednje vrijeme čine se veliki napori u razvoju ispravljajućih pogona izmjeničnim motorima, jeftinijih i manje osjetljivih prema veličini struje, brzine porasta struje itd., i zato prikladnijih za brže odvijanje prelaznih pojava (npr. reverziranja). Primjenom izmjeničnih motora u ispravljajućim pogonima nastoji se objediti visoka vrijednost regulacije brzine vrtnje ispravljajućih istosmernih pogona s pogonskim i ekonomskim prednostima izmjeničnih motora. Tri vrste izmjeničnih motora postaju uz pomoć ispravljajuća prikladne za regulaciju brzine vrtnje: asinhroni kolutni motori, asinhroni kavezni motori i sinhroni motori s normalnim statorskim i rotorskim namotom.

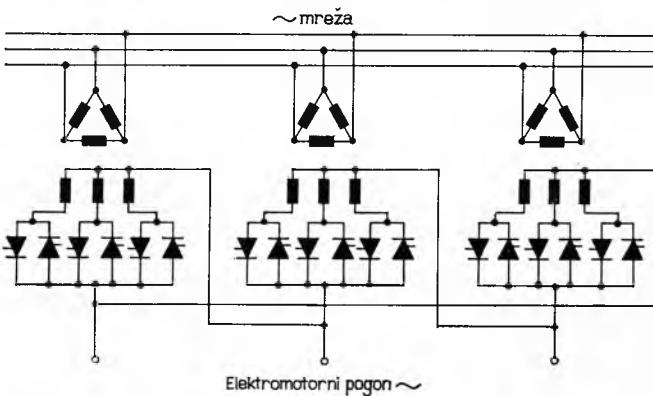
Ispravljajući spojevi za pogon izmjeničnih motora bitno se razlikuju od takvih spojeva za pogon istosmernih strojeva. Ispravljajući sklopovi istosmernih strojeva treba da daju kontinuirano promjenljiv istosmerni napon u pozitivnom i negativnom smislu, s mogućnošću vodenja struje u oba smjera. Pri primjeni izmjeničnog stroja ispravljajući sklopovi treba da omogućavaju mijenjanje frekvencije i amplitude triju izmjeničnih napona i struja (u statorskem ili rotorskem namotu) ovisno o brzini vrtnje i opterećenju. Ispravljajući sklop pretvara napon i frekvenciju mreže u pogonski napon i frekvenciju tako da odgovaraju brzini vrtnje stroja. Ispravljajući sklopovi ove vrste zovu se i pretvarači (ispravljajući pretvarač, konvertor frekvencije i napona). Primjenjuju se pretvarači sa istosmernim medukrugom i bez njega.

Pretvarač s istosmernim medukrugom podijeljen je tim medukrugom na dva dijela, u višepulsni ispravljajući i pripadni izmje-

njivački dio (princip na sl. 85). Kad namot motora crpe energiju iz mreže, ispravljačka grupa spojena s mrežom radi kao ispravljač, a spojena s namotom elektromotora, kao izmjenjivač. Kad se promijeni smjer kretanja energije, grupe među sobom izmijene svoje funkcije. Ovakav pretvarač dozvoljava samo prenos radne snage. Zbog malih kutova paljenja sam pretvarač troši induktivnu jalovu snagu, koju jedna ispravljačka grupa uzima iz mreže a druga iz stroja. Pretvarač je primarno priključen na mrežu koja ima svoju stalnu frekvenciju, a sekundarna se frekvencija može mijenjati u širokim granicama ispod i iznad mrežne frekvencije.

Grupom spojenom na mrežu upravlja se pomoću impulsnog uređaja koji daje rešetkama (prikazanim crticom na simbolu) impulse za promjenu kuta pomoći paljenja u taktu frekvencije mreže. Drugom grupom upravlja impulsni uređaj čiji se takt impulsa mijenja kontinuirano u skladu sa željenom sekundarnom frekvencijom.

Pretvarači bez istosmjernog medukruga sadrže tri ispravljačke grupe (sl. 86). Svaki je fazni namot stroja preko jedne od grupa

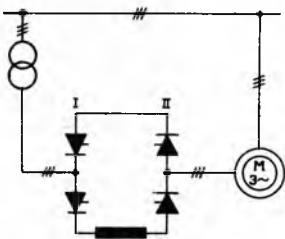


Sl. 85. Načelni spoj pretvarača frekvencije s istosmjernim međukrugom

spojen na mrežu. Svaka grupa mora biti sposobna da vodi struju i u jednom i u drugom smjeru. Ovaj pretvarač crpe radnu i jalovu snagu iz primarne mreže. Kad se traži da napon pogonskog motora određene frekvencije bude približno sinusnog oblika, ta je frekvencija promjenjiva samo unutar uskih granica. Najniža je moguća frekvencija negdje na polovini mrežne frekvencije.

Budući da su svi ispravljački ventilii spojeni s mrežom, mogu se primijeniti impulsni uređaji koji daju rešetki impulse u taktu mrežne frekvencije.

Sl. 87 prikazuje načelušku shemu regulacije brzine vrtnje kolutnog motora. Stator je spojen na mrežu. Rotorski krug je spojen na mrežu preko pretvarača s istosmjernim međukrugom i transformatora za prilagodavanje visine napona. Frekvencija impulsnih uređaja ispravljačke grupe I jednaka je frekvenciji mreže, a frekvencijom impulsa grupe II upravlja frekvencija u rotorskom namotu. Ovi su spojevi pogodni za pogon gdje se brzina vrtnje regulira u manjem rasponu (kontinuirane valjaoničke pruge, motori za brodsku propulziju i sl.).

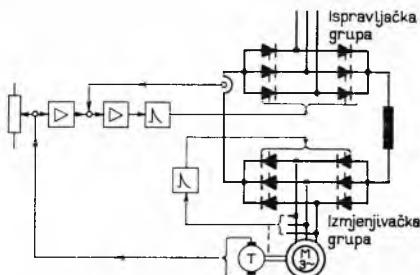


Sl. 86. Načelni spoj pretvarača frekvencije bez istosmjernog međukruga

a frekvencijom impulsa grupe II upravlja frekvencija u rotorskom namotu. Ovi su spojevi pogodni za pogon gdje se brzina vrtnje regulira u manjem rasponu (kontinuirane valjaoničke pruge, motori za brodsku propulziju i sl.).

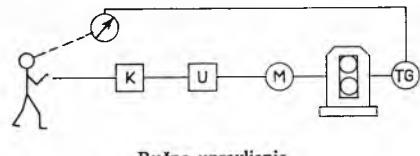
Sl. 88 prikazuje automatsku regulaciju brzine vrtnje asinhronog kavezognog motora pomoći pretvarača s istosmjernim međukrugom. Ovaj spoj ima izgleda da bude primjenjivan u reverzibilnim pogonima, u izvoznim postrojenjima u rudnicima, u

pomoćnim pogonima metalurgije i sl. Statorski namot se napaja naponom promjenljive frekvencije i amplitudne. Regulacija napona vrši se pomoći ispravljačke grupe, a regulacija frekvencije pomoći izmjenjivačke grupe. Princip rada regulacionih krugova razumljiv je iz sheme. Danas su takvi pogoni još skupi, ali u skoroj budućnosti, zahvaljujući razvoju proizvodnje i pojeftinjenju tiristora i ostalih regulacionih logičkih elemenata, možemo očekivati da će se ti spojevi sve više primjenjivati u regulacionoj tehnici.

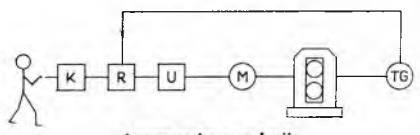


Sl. 88. Načelna shema regulacije brzine vrtnje izmjeničnog (kavezognog) motora s pretvaračem frekvencije (s istosmjernim međukrugom). T tahogenerator

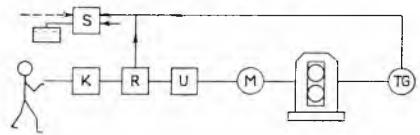
Stupnjevi mechanizacije i automatizacije radnih procesa. Do sada su prikazani primjeri elektromotornih pogona s upravljanjem ili automatskom regulacijom različitih veličina. Ti stupnjevi automatizacije, upravljanje i automatska regulacija, omogućuju samo djelomičnu automatizaciju procesa, jer rad pogona još uvijek ovisi o tome koliko će brzo čovjek reagirati na promjene uvjeta rada i nanovo namjestiti željene vrijednosti automatskih reguliranih krugova. Težnja za daljim skraćenjem radnih procesa, za što jeftinijom proizvodnjom boljeg kvaliteta uz što manje otpada (škarta) doveo je do razvoja automatizacije čitavih sistema, pri kojoj se pojedini radni procesi reguliraju u međusobnoj uskoj vezi. Taj je razvoj na svom putu prošao kroz više stepena. Osim upravljanja i automatske regulacije pojedinih radnih procesa dalji je stepen na nivou sabiranja i obrade podataka, a konačni na nivou vođenja cijelog sistema elektročimkim računalom.



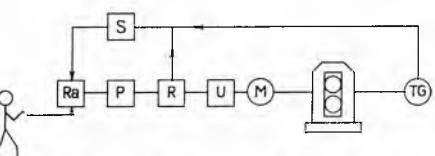
Ručno upravljanje



Automatska regulacija



Automatska regulacija uz sabiranje i obradu podataka



Automatska regulacija uz vođenje računalom

Sl. 89. Stupnjevi upravljanja i automatizacije, elektromotornog pogona (valjački stan), M motor, Ra računalo, P programator, K postavni clan, U izvršni clan, TG tahogenerator, S sabiranje i obrada podataka

Pri sabiranju i obradi podataka mjere se i sabiru svi važniji podaci radnih procesa u proizvodnji i zatim registriraju električnim ili mehaničkim putem. Tokom obrade ovih podataka, uspostavljajući ih s unaprijed zadanim programom radnog procesa, utvrđuju se utjecaji nastalih odstupanja. Oni se mogu smanjiti ili potpuno odstraniti namještanjem željenih vrijednosti regulacionih krugova.

Pri vodenju računalom sabiru se neprestano sve informacije na osnovi mjerjenih podataka o svim važnim veličinama procesa. Računskim strojevima izračunavaju se optimalne vrijednosti i automatski šalju potrebna naredenja u programatore. Programatori prenose naredenja regulatorima pošto su ih uskladili i dopunili podacima zadanih proizvodnih programa u obliku vodećih veličina za pojedine procese (elektromotorne pogone), čije se izlazne veličine neprekidno upravljaju tim sistemom težeći k ukupnom optimalnom rezultatu.

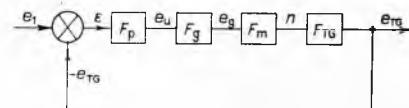
Sl. 89 zorno ilustrira sva četiri stupnja razvoja upravljanja na primjeru elektromotornog pogona jednog valjačkog stana. Izlazna veličina je brzina vrtnje, mjerena tahogeneratorom. Pri ručnom upravljanju čovjek mora neprestano osmatrati instrument tahogeneratora i podešavati brzinu vrtnje na vrijednost koju mu je zadao tehnik. Pri automatskoj regulaciji poslužilac samo namjesti željenu vrijednost brzine vrtnje (prema zahtjevu tehnika) za određeni program, ali on ne može utjecati na smetnje koje djeluju izvan regulacionog kruga, a utječe na kvalitet valjanog materijala (npr. pritisak valjaka, temperaturu materijala, zatezanje, progib, i sl.). Kada se svi ti mjereni podaci trajno sabiru i vode na jedno mjesto, čovjek uspoređuje odstupanja od vrijednosti zadanih u programu, odabire optimalnu brzinu vrtnje i namješta je na postavnom članu. U posljednjem stepenu to čovjekovo odabiranje zamjenjuje računski stroj koji neprekidno prilagoduje brzinu vrtnje optimalnoj vrijednosti za postizanje dobrog kvaliteta valjanog materijala.

Dinamičke karakteristike automatski reguliranih sistema. Regulacioni sistemi moraju održavati određenu funkcionalnu ovisnost vodeće i regulirane varijable. Pri većem broju regulacionih krugova u sistemu postavlja se zahtjev u još oštijem obliku. Traži se jednostavna proporcionalnost vodeće i regulirane veličine. U praksi je ostvarenje idealnih regulacionih sistema, koji bi tačno održavali tražene funkcionalne ovisnosti, praktički nemoguće zbog samog načina njihovog djelovanja. Može se govoriti samo o nekoj većoj ili manjoj tačnosti, o većem ili manjem približavanju idealnim uvjetima. Što je viši stupanj tačnosti, tj. što je manje odstupanje regulirane veličine od tražene vrijednosti i što je veća valjanost regulacije, to su regulacioni uređaji komplikirani. Zbog toga je projektiranje automatskog regulacionog uredaja zapravo traženje razumnog kompromisa između nastojanja da se postigne što bolja valjanost regulacije i nastojanja da se ovaj zadatak ostvari što jednostavnijim tehničkim sredstvima. Vidi se koliko je važna ispravna formulacija zahtjeva u pogledu dinamičkih karakteristika regulacionog uredaja kojima se određuju dozvoljena odstupanja pogonskih uvjeta od idealnih. Ti bi se zahtjevi mogli skupiti u ove grupe; a) zahtjev da bude osigurana stabilnost uredaja; b) zahtjev u pogledu veličine regulacionog odstupanja u stacionarnom stanju (zahtjev statičke tačnosti); c) zahtjev u pogledu ponašanja reguliranog uredaja u prelaznoj pojavi (zahtjevi valjanosti regulacije ili dinamičke karakteristike regulacije); d) zahtjev dinamičke tačnosti uredaja (u pogledu veličine regulacionog odstupanja pri kontinuirano promjenljivim utjecajima).

Stabilnost regulacionih sistema. Regulacioni sistemi, na osnovi svog principa djelovanja, skloni su titranjima budući da se jedan dio energije može vraćati od izlaza na ulaz. Da bi regulator uopće mogao raditi, on mora imati i osobinu smanjivanja početne promjene regulacione veličine. Zbog toga je zahtjev za stabilnošću prvi i najvažniji uvjet normalnog rada regulacionih sistema. Pri tome je još važno postizanje stabilnosti s određenim stepenom sigurnosti, jer se mora predvidjeti da za vrijeme pogona mogu nastupiti izvjesne promjene parametara sistema. Regulacioni krug postaje nestabilan kad polinom u nazivniku izraza za prenosnu funkciju zatvorenog kruga

$$F_z = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n}$$

(koji se polinom običava nazivati »karakterističnom jednadžbom«) sadrži bar jedan korijen s pozitivnim realnim dijelom. Tada se u vremenskoj funkciji odziva regulacionog kruga pojavljuju članovi s faktorom e^{+at} , što znači da bar jedan dio raste s vremenom, a time je čitav krug nestabilan. Pogledajmo ove odnose na primjeru najjednostavnije regulacije brzine vrtnje na sl. 75.



Sl. 90. Blok-dijagram regulacije brzine vrtnje prikazane na sl. 75. e_i Vodeća veličina, ϵ regulaciono odstupanje, e_u napon uzbude generatora, e_g inducirani napon generatora, n brzina vrtnje elektromotornog pogona; e_{TG} napon tahogeneratorskog, izlazne veličine; F_p , F_g , F_m , F_{TG} prenosne funkcije elemenata

Blok-dijagram tog regulacionog kruga prikazan je na sl. 90. Značenje pojedinih veličina dato je u legendi. (Regulaciono odstupanje ϵ razlika je između ulazne (vodeće) veličine i izlazne veličine (signalova povratne veze) regulacionog kruga). Prenosne funkcije elemenata glase: funkcija prenosa pojačala (konstanta pojačanja)

$$F_p = \frac{e_u}{\epsilon} = K_p ; \text{ funkcija prenosa generatora } F_g = \frac{e_g}{e_u} = \frac{K_g}{1+pT_g},$$

gdje K_g označava konstantu pojačanja generatora, a $T_g = \frac{L_g}{R_u}$ električnu vremensku konstantu uzbudnog kruga generatora;

$$\text{funkcija prenosa motora } F_m = \frac{n}{e_g} = \frac{K_m}{p^2 T_{el} T_{em} + p T_{em} + 1},$$

gdje K_m označava konstantu statičkog pojačanja motora, a T_{el} i T_{em} su električna i elektromehanička vremenska konstanta motora; funkcija prenosa tahogeneratora je konstanta tahogeneratora

$$F_{TG} = \frac{e_{TG}}{n} = K_{TG}.$$

Brzina vrtnje elektromotornog pogona ima isti vremenski tok kao napon tahogeneratora e_{TG} , samo s drugim iznosom. Te su dvije veličine proporcionalne. Prenosna funkcija otvorenog kruga glasi:

$$F_0 = \frac{e_{TG}}{\epsilon} F_p F_g F_m F_{TG} = \frac{K_p K_g K_m K_{TG}}{(1+pT_g)(p^2 T_{el} T_{em} + p T_{em} + 1)}.$$

Prenosna funkcija zatvorenog kruga dobije se iz definicije regulacionog odstupanja $\epsilon = e_i - e_{TG}$, te je

$$F_2 = \frac{F_0}{1+F_0} = \frac{K_p K_g K_m K_{TG}}{\frac{e_{TG}}{e_i}(1+pT_g)(p^2 T_{el} T_{em} + p T_{em} + 1) + K_p K_g K_m K_{TG}}.$$

Ukupni je faktor pojačanja kruga $K = K_p K_g K_m K_{TG}$. Sredi li se nazivnik, dobije se normalna prenosna funkcija zatvorenog regulacionog kruga:

$$F_2 = \frac{K}{p^2 T_g T_{em} T_{el} + p^2(T_g T_{em} + T_{el} T_{em}) + p(T_g + T_{em}) + 1 + K}$$

$$\text{ili } F_2 = \frac{K}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3}.$$

Jedan od kriterija za stabilnost regulacionog kruga, *Hurwitzov kriterij*, kaže da je krug stabilan kad determinanta koeficijenata karakteristične jednadžbe zadovoljava uvjet

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 \\ 0 & 0 & a_3 \end{vmatrix} > 0.$$

Dakle $a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$, odnosno, nakon sredenja nejednadžbe,

$$(T_g + T_{em}) \left(\frac{1}{T_g} + \frac{1}{T_{el}} \right) - 1 > K.$$

Može se desiti, uz nezgodne odnose veličina vremenskih konstanti, da taj uvjet ne bude ispunjen. Tada će bar jedan od kojih karakteristične jednadžbe imati pozitivan realni dio i krug

ELEKTROMOTORNI POGON

če biti nestabilan. U takvom slučaju mogao bi se postići uvjet stabilnosti smanjenjem pojačanja (faktora K), ali bi se time smanjila tačnost regulacije brzine vrtnje. Preostaje dakle zahvat u lijevu stranu nejednadžbe, u vremenske konstante kruga. Ako se, npr., ugradi u pojačalo proporcionalno-derivacioni pasivni korekcioni član prikazan na sl. 91, s funkcijom prenosa

$$T_c = \frac{e_2}{e_1} = G \frac{1 + p T_1}{1 + p T_2}, \text{ gdje je}$$

$$G = \frac{R_2}{R_1 + R_2}, \quad T_1 = CR_1, \quad T_2 = C \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2},$$

a $T_2 < T_1$, dobije se jednadžba korigiranog otvorenog kruga

$$F_{ok} = F_e F_p F_g F_m F_{TG} =$$

$$= \frac{G K_p K_g K_m K_{TG} (1 + p T_1)}{(1 + p T_2) (1 + p T_g) (p^2 T_{em} T_{el} + p T_{em} + 1)}.$$

Ako je korekcioni član tako odabran da ispunjava uvjet $T_1 = T_G$, jednadžba otvorenog korigiranog kruga svodi se na izraz

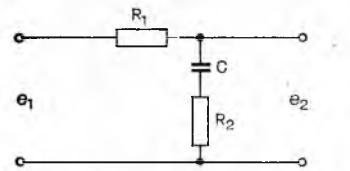
$$F_{ok} = \frac{e_{TG}}{\epsilon} = \frac{G K_p K_g K_m K_{TG}}{(1 + p T_2) (p^2 T_{em} T_{el} + p T_{em} + 1)},$$

što znači da sada umjesto konstante T_g imamo drugu, manju vremensku konstantu T_2 ($T_g > T_2$). Tako se može zadovoljiti nejednadžbu koju daje Hurwitzov kriterij stabilnosti, tj. stabilizirati regulacioni proces.

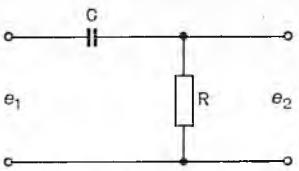
Dруги често upotrebljavani korekcioni element prikazan je na sl. 92. To je proporcionalno-integracioni (PI) pasivni element kojemu je funkcija prenosa

$$F_{c2} = \frac{e_2}{e_1} = \frac{1 + p T_1}{1 + p T_2},$$

gdje je $T_1 = CR_2$, $T_2 = C(R_1 + R_2)$, dakle $T_2 > T_1$. Analogno kao kod PD korekcionog elementa, pravilnim izborom vremenskih konstanti T_1 i T_2 može se postići stabilnost regulacionog procesa.



Sl. 92. Korekcioni PI pasivni element



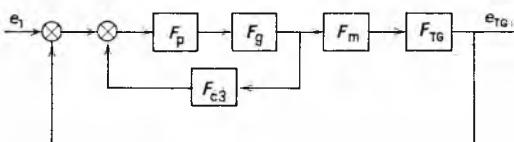
Sl. 93. Paralelni korekcioni član RC

Na sl. 93 dat je primjer paralelnog korekcionog člana RC , kojemu je funkcija prenosa

$$F_{ca} = \frac{e_2}{e_1} = \frac{p T}{1 + p T},$$

gdje je $T = RC$. Ispravnim izborom vremenske konstante T paralelnog korekcionog člana može se postići stabilnost regulacionog procesa uz nesmanjen ukupni faktor pojačanja kruga K .

Na sl. 94 prikazan je blok-diagram zatvorenog regulacionog kruga u koji je uključen paralelni korekcioni član RC .



Sl. 94. Zatvoren regulacioni krug s paralelnim korekcionim članom RC

Uvijek se nastoji da zahvati u regulaciono pojačalo mijenjaju karakteristike kruga kao što je to učinjeno u navedenim primjerima. Radi stabilizacije mijenjati neki parametar na strojevima bilo bi suviše skupo. Time postaje jasnija misao na kraju poglavljia o dinamici elektromotornih pogona: da je uzročnik nestabilnosti u reguliranim elektromotornim pogonima uvijek regulator, a nikad elektromotor.

J. Černelč

Sl. 91. Korekcion element PD (pasivni član RC)

Historijat i perspektiva razvoja. Prvi elektromotorni pogon ostvario je Jakobi 1834 tijerači primitivnim elektromotorom čamac po Nevi u Petrogradu (v. Električni strojevi, str. 174). Već u prvoj polovini ovog stoljeća udio elektromotora u direktnom korištenom radu iznosi 90%. Elektromotorni pogoni prošli su u svom razvoju kroz nekoliko faza, karakterizirane razvijenošću proizvodnih snaga i pripadnih tehničkih sredstava. U prvoj fazi jednostavnih stacionarnih elektromotornih pogona, koja se vremenski poklapa s drugom polovicom prošlog stoljeća, dominantnu su ulogu igrali istosmjerni elektromotori. Uz energetske izvore male snage i ograničenost udaljenosti prijenosa istosmjerne struje, elektromotorni je pogon, osim malom mogućnosti primjene, bio karakteriziran i relativno visokom cijenom mehaničkog rada. Revolucionaran obrat donosi primjena (trofaznog) izmjeničnog sistema s jeftinim asinhronim motorom, za čije uvođenje ima najveće zasluge Nikola Tesla. Mogućnost porasta snage energetskih izvora (generatora) povećana je za ~100 puta, domet prijenosa električne energije na daljinu za preko 1000 puta, a elektromotori pojefitnjuje za 50-70%. Asinhroni motor potiskuje istosmjerni u postojećim jednostavnim elektromotornim pogonima. To su osnovne karakteristike razvoja druge faze koja obuhvaća otrpljive prvih 40 godina ovog stoljeća. U toj se fazi elektromotorni pogon počinje masovno primjenjivati. Zbog nekih slabosti, prije svega zbog njihove relativne neprakladnosti za elektromotorne pogone s promjenjivom brzinom vrtnje, asinhroni motoare počinju djelomično zamjenjivati vrlo skupi izmjenični kolektorski motori koji se upravo pojavljuju, a koji se mogu priključiti izravno na izmjeničnu mrežu. Masovna primjena elektromotornog pogona dovodi do gradnje specijalnih vrsta ili nizova elektromotora namijenjenih pojedinim vrstama elektromotornih pogona. Karakteristika je te faze i sve veći razvoj komplikiranijih elektromotornih pogona s dinamičkim stanjima, a u nekim granama industrije i prometa zadržavaju se skupljci istosmjernih elektromotornih pogona (brodarstvo, valjaonice, vuča itd.). Treća faza karakterizirana je mogućnošću priključka istosmjernog motora posredstvom ispravljačkih uređaja na izmjeničnu mrežu i razvojem automatske. Kombinacija jeftinog transporta električne energije (izmjenične struje) s dobrim regulacionim osobinama istosmjernih strojeva stvara mogućnost relativno jeftinog programskog upravljanja elektromotornog pogona. Posebni impuls tom razvoju daje razvoj ispravljača (usmjerivača), uređaja koji spajaju izmjeničnu mrežu s istosmjernim motorom. Iako jeftini asinhroni motori zadržavaju svoje značenje u svim jednostavnijim elektromotornim pogonima (a to je još uvijek većina i po broju i po količini mehaničkog rada), istosmjerni strojevi ponovo osvajaju izgubljeni teren u oblasti trofaznih kolektorských motora, a i nova područja upravljanja, automatiziranih elektromotornih pogona. U toj fazi razvoj električnog dijela elektromotornih pogona snažno utječe i na razvoj radnih mehanizama. U nizu industrija postižu se ponекad iznenađujući rezultati produktivnosti radnih mehanizama i kvaliteti proizvodnje, omogućeni novom tehnikom upravljanja i automatizacije. U današnjoj fazi razvoja pojavljuju se potrebe za snagom pojedinih jedinica elektromotornog pogona do tehničke (čak i teoretske) granice, a već se osjećaju i veće potrebe u oblasti reguliranih elektromotornih pogona s istosmjernim motorima, čija je granična snaga niska. (Snage najvećih izmjeničnih strojeva koji se danas mogu graditi mijere se stotinama megavata; granična snaga istosmjernih sporohodnih (do 300 min^{-1}) motora naprotiv, ograničena je na 10 MW, a brzohodnih na još znatno manju snagu: pri 3000 min^{-1} granična snaga iznosi svega 1 MW). U toj oblasti istosmjerni će motor već u bliskoj budućnosti postati kočnica razvoja proizvodnosti, pa se traže nova rješenja.

Sve tri dosadašnje faze razvoja ipak imaju zajedničku tendenciju prilagođavanja elektromotora elektromotornom pogonu gradnjom specijalnih motora za specifične svrhe, ne zadržajući ozbiljnije u transformaciji energetskog izvora. Doduše već se u drugoj fazi Leonardovim agregatom pretvara izmjenična mreža u istosmjernu, i ta se pretvorba u trećoj fazi uz pomoć ispravljača još više širi, ali je ta tehniku još uvijek ograničena na upravljanje i automatiziranje elektromotornih pogona. Izgleda da budućnost leži u proširenju principa transformacije mreže na sve one elektromotorne pogone u kojima je potrebno kakva bilo promjena brzine vrtnje. Najviše tehničkih istraživanja ide danas u smjeru upravljanja izmjenične struje u istosmjernu, a zatim pretvarjanja te struje ponovo u izmjeničnu, proizvoljne promjenjive frekvencije, sve uz pomoć električnih ventila (tristora) upravljanja davačima impulsa. Jefitni izmjenični (asinhroni ili sincroni) motori upravljeni frekvencijom dobivaju na taj način regulaciona svojstva istosmjernih motora, a u energetskom smislu (tj. u pogledu dinamičkih pojava) mogućnosti su takvih motora jednake mogućnostima istosmjernog motora u Leonardovom spaju. Time se postiže priključak najekonomičnijeg i najjednostavnijeg motora na najekonomičniju mrežu i to gotovo bez gubitaka pri transformaciji energije, zahvaljujući stanju današnje tehnike. Problem današnjice je zapravo problem visoke cijene električnih ventila i regulacionog uređaja (davača impulsa). Budućnost obećava rješenje tog problema, jer se gotovo ni na jednom polju tehnike na ulazu toliku sredstva kao na tom. To se već odražava naročito na području tristora, čije su se cijene posljednjih godina smanjile za nekoliko puta uz istovremeno mnogostruko povećanje tehničkih mogućnosti. Danas se već i tehnički i ekonomski isplati gradnja takvih elektromotornih pogona sa (u biti) dvostrukom pretvorbom mreže na onim rijetkim područjima velike brzine vrtnje gdje snage prelaze granične mogućnosti istosmjernog stroja, npr. u kontinuiranim valjaonicima čitljim prugama, ili na područjima gdje je istosmjerni motor nepraktičan (kemijska industrija, pogoni ugroženi od eksplozije i slično). Izgleda da budućnost donosi eru široke automatizacije procesa i čitavim tvornicama s jednostavnim trofaznim motorom, kao osnovnim elementom i širokom primjenom transfiguracije priključne mreže.

B. Jurković

LIT.: W. Schuisky, Elektromotoren, ihre Eigenschaften und ihre Verwendung für Antriebe, Wien 1951. — M. W. Mejerow, Grundlagen der selbsttätigen Regelung elektrischer Maschinen, Berlin 1954. — H. Chestnut, R. W. Mayer, Servomechanisms and regulating system design, 2 vols, New York 1955. — M. G. Tschilkin, Elektromotorische Antriebe, Berlin 1957. — A. Leonard, Elektrische Antriebe, Stuttgart 1959. — W. H. Ahrend, C. J. Savant, Servomechanism practice, New York-Toronto-London 1960. — H. Bühler, Einführung in die Theorie geregelter Gleichstromantriebe, Basel-Stuttgart 1962. — B. P. Andreeva, Yu. A. Sabanin, Osnovy elektroprivoda, Moskva 1963. — A. T. Goloban, Osnovy elektroprivoda, Moskva 1965. — P. Volk, Antriebstechnik in der Metallverarbeitung, Berlin-Heidelberg-New York 1966. — J. Ch. Gille, P. Decaulne, M. Péligrin, Théorie et calcul des asservissements linéaires, Paris 1967.

J. Černelč M. Ibrahimpašić B. Jurković Z. Smolčić