

Pojam i značaj elektromotornih pogona

Elektromotorni pogon (eng. electric drive) je elektromehanički sistem u kome elektromotor pokreće radnu mašinu, pri čemu se vrši pretvaranje električne energije u mehanički rad. Elektromotorni pogoni imaju važnu ulogu u svakodnevnom životu i razvoju društva uopšte. U svetu preko 50% od ukupno proizvedene električne energije elektromotorni pogoni pretvore u mehanički rad. Elektromotorni pogoni se koriste u industriji, rudarstvu, vozilima, aparatima u domaćinstvima, ručnim alatima, klima uređajima, pumpama, kompresorima, robotima i drugim sistemima. Prednosti elektromotornih pogona u odnosu na druge vrste pogona su:

- imaju širok opseg snaga (počev od snaga ispod jednog vata (npr. elektronski časovnici), pa do više stotina megavata (npr. pumpe u reverzibilnim hidroelektranama)),
- imaju širok opseg obrtnih momenata (iznad jednog miliona Nm npr. u valjaonicama)
- imaju širok opseg brzina (preko 100.000 ob/min npr. u centrifugalnim mašinama),
- imaju sposobnost da rade u skoro svim radnim uslovima (prinudno hlađeni, potpuno zatvoreni, potopljeni, u eksplozivnoj atmosferi itd.),
- imaju sposobnost da počnu sa radom odmah i to pod punim opterećenjem,
- imaju različite konstrukcije, prilagođene različitim potrebama ugradnje u radne mašine (npr. više manjih motora montiranih na mjestima direktne upotrebe umjesto jednog većeg sa mehaničkim prenosnicima, zatim motor sa rotorom sa spoljašnje strane, linearni motor umjesto rotacionog itd.),
- imaju pozitivne ekološke efekte (ne koriste zapaljiva goriva, ne emituju gasove, proizvode relativno male vibracije i buku),
- imaju veoma male potrebe za održavanjem,
- imaju veoma male gubitke praznog hoda,
- imaju veoma visok stepen iskorišćenja,
- mogu da izdrže visoka kratkotrajna preopterećenja,
- imaju mogućnost lakog upravljanja brzinom ili momentom i to u širokom opsegu brzina bez potrebe za mehaničkim mijenjanjem prenosnog odnosa,
- imaju veoma brz dinamički odziv prilikom upravljanja,
- imaju mogućnost lakog mijenjanja smjera obrtanja (mogućnost reverziranja bez mehaničkih prenosnika), mogu da rade u sva 4 kvadranta (imaju jednostavan revers),
- imaju mogućnost generatorskog kočenja sa rekuperacijom (regeneracijom) električne energije natrag u izvor električne energije,
- imaju ravnomjeran obrtni momenat i miran hod bez vibracija,
- imaju dug period eksploatacije (životni vijek), jer ne rade pod naročito visokim temperaturama itd.

Nedostaci elektromotornih pogona u odnosu na druge vrste pogona su:

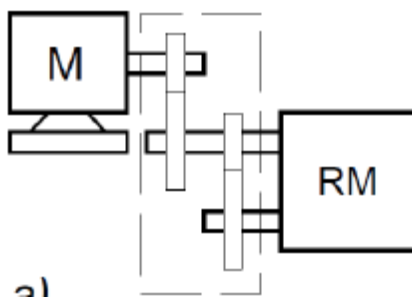
- zavisni su od izvora električne energije, što ograničava njihovu primjenu u električnoj vuči. Ekonomski prihvatljiva akumulatorska baterija je oko 50 puta teža nego odgovarajuća količina goriva za motor sa unutrašnjim sagorevanjem.
- imaju mali odnos snage prema težina.

Vrste elektromotornih pogona

S obzirom na način povezivanja elektromotora sa radnom mašinom, elektromotorni pogon može biti:

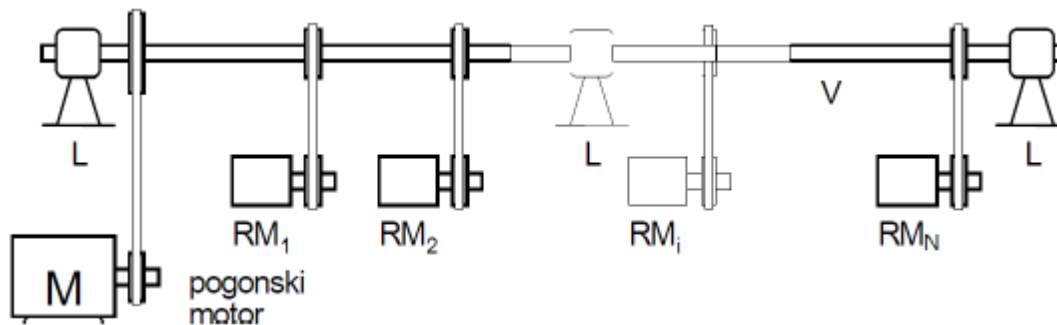
- pojedinačni,
- grupni i
- višemotorni.

Pojedinačni elektromotorni pogon (slika 8.41), kod njega jedan elektromotor pokreće samo jednu radnu mašinu (koja može imati više radnih mehanizama). Ovakav elektromotorni pogon omogućava promjenu smjera radne mašine promenom smjera obrtanja elektromotora, kao i uvođenje raznih sistema regulacije. Ovakav pogon omogućava raspored mašina saglasno postupku proizvodnje, kao i napajanju pokretnih radnih mašina, a upotrebom upravljačkih sistema moguće je i bolje prilagođavanje karakteristika motora tehnologiji rada radne mašine.



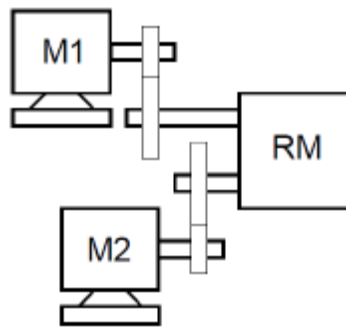
Slika 8.41. Pojedinačni pogon

Grupni elektromotorni pogon (slika 8.42), kod njega jedan veliki elektromotor preko mehaničkog (npr. kajišničkog) prenosnika pokreće vratilo, a ono preko drugih mehaničkih (npr. kajišničkih) prenosnika pokreće više radnih mašina (koje mogu imati više radnih mehanizama). Ovakav pogon ima više nedostataka (kao što su npr.: nizak stepen iskorišćenja i vrlo ograničene mogućnosti upravljanja), zbog čega se danas retko koristi.



Slika 8.42. Šema grupnog pogona: RM_1, RM_2, \dots, RM_N - radne mašine, L – ležaj, V - vratilo

Višemotorni elektromotorni pogon (slika 8.43), kod njega više elektromotora pokreće jednu radnu mašinu (koja ima više radnih mehanizama), pri čemu svaki od tih elektromotora pokreće po jedan radni mehanizam te mašine. Pokretanja tih mehanizama su međusobno uslovno povezana. Ovakav elektromotorni pogon se koristi kada se zahtjeva više vrsta kretanja (npr. kod strugova, glodalica, veš mašina, kranova (za pokretanje kranskog mosta koristi se jedan motor, a za pokretanje kranske kuke drugi motor itd.)), kretanja su nezavisna, sekvencirana ili malo usklađena. Više motora može da obavlja svoje funkcije na kompleksnoj proizvodnoj traci, pri čemu rad tih motora mora biti usklađen (sinhronizovan) kako bi cijela proizvodna traka efikasno funkcionisala. Upravljanje ovakvim pogonom može biti poluautomatizovano, kada u nekim operacijama upravljanja učestvuje čovek, i automatizovano, kada je celokupno upravljanje prenijeto na upravljački sistem.



Slika 8.43. Dvomotorni pogon

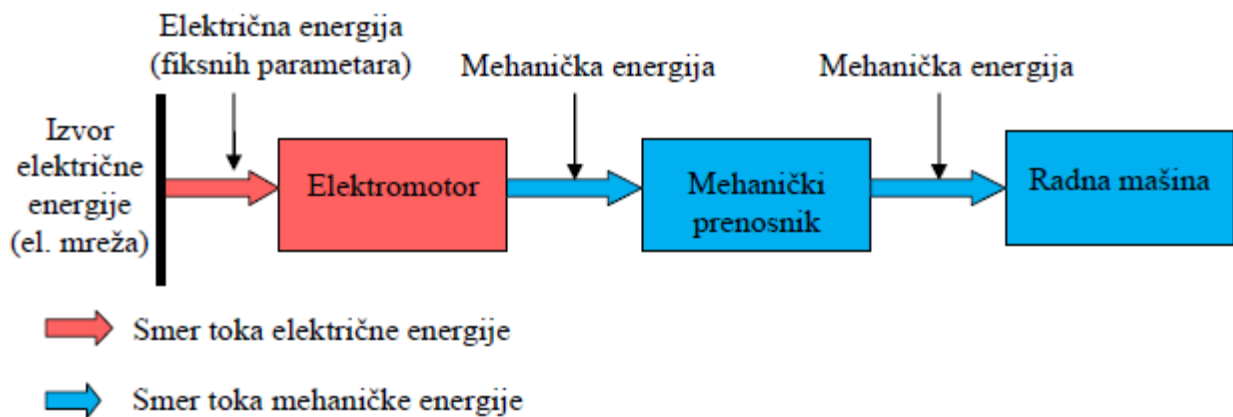
S obzirom na to da li imaju mogućnost regulacije karakterističnih veličina elektromotorni pogoni mogu biti:

- neregulisani i
- regulisani.

Neregulisani elektromotorni pogoni

Neregulisani elektromotorni pogon se u opštem slučaju sastoji od, slika:

- elektromotora,
- mehaničkog prenosnika i
- radne mašine (mehaničkog opterećenja, tehnološkog procesa).



Slika Strukturna blok šema neregulisanog elektromotornog pogona

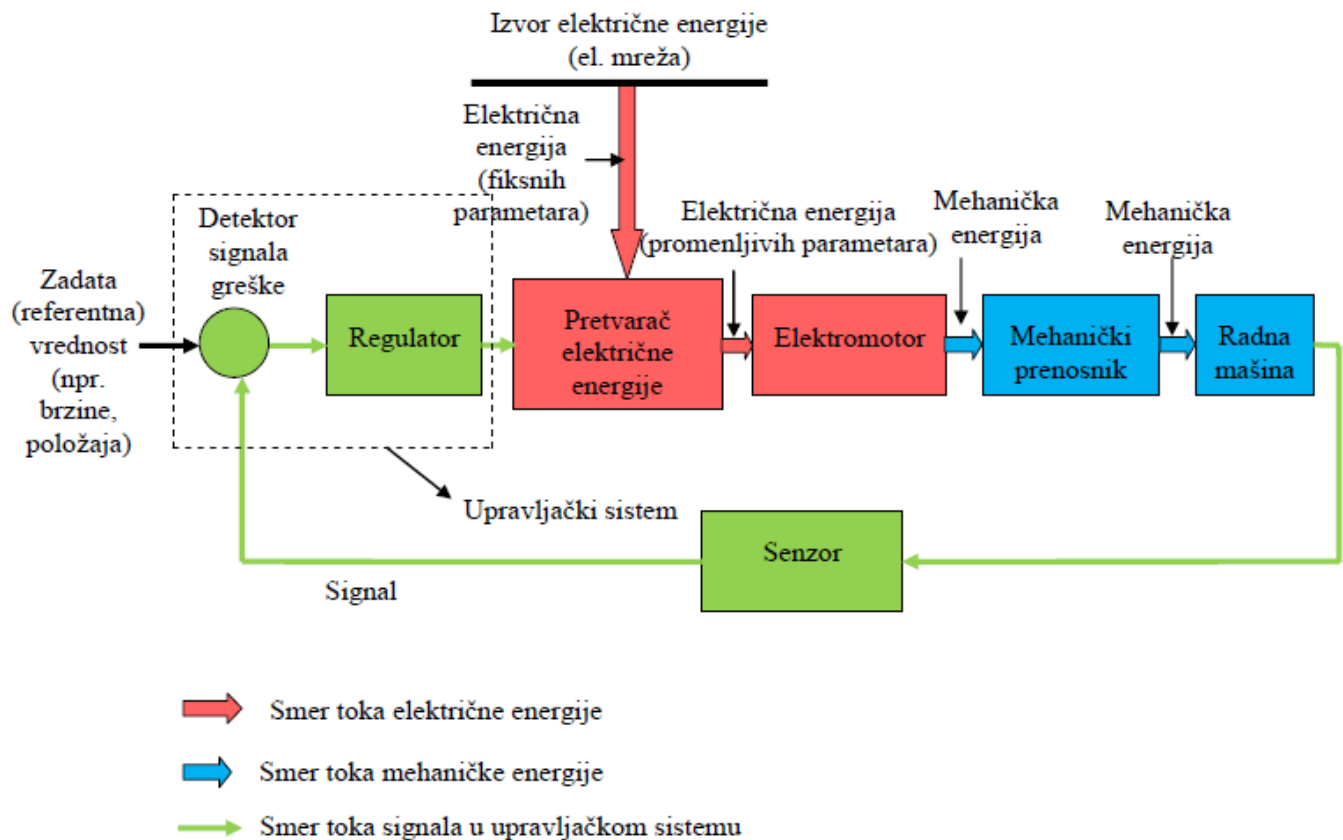
U nereguliranim EMP-ima nema upravljačkog sistema (regulatora) niti pretvarača električne energije, kao ni senzora. Elektromotor se direktno priključuje na izvor električne energije, a njegova brzina zavisi od parametara električne energije koja dolazi iz izvora i od radne mašine.

Regulisani elektromotorni pogoni

Savremeni regulisani elektromotorni pogon se u opštem slučaju sastoji od, slika:

- elektromotora,
- mehaničkog prenosnika,
- radne mašine (mehaničkog opterećenja, tehnološkog procesa)

- pretvarača električne energije (npr. pretvarača energetske elektronike),
- upravljačkog sistema (regulatora u širem smislu) i
- senzora.



Slika Strukturna blok šema regulisanog elektromotornog pogona

U zatvorenom krugu regulacije se signal stvarne vrijednosti regulisane veličine povratnom spregom dovodi na ulaz detektora signala greške gdje se poredi sa signalom zadate vrijednosti regulisane veličine. Kao rezultat tog poređenja na izlazu detektora signala greške se dobija signal greške. Upravljački sistem (regulator) na osnovu veličine i znaka signala greške na svom izlazu generiše upravljački signal pomoću koga preko pretvarača električne energije djeluje na elektromotor (i radnu mašinu) tako da odstupanje stvarne od zadate vrijednosti regulisane veličine svede na nulu ili na zanemarivo malu vrijednost.

1. Elektromotor Elektromotor je glavni deo elektromotornog pogona, koji pokreće (pogoni) radnu mašinu pri čemu ona vrši mehanički rad. Elektromotor pretvara električnu energiju koju uzima iz mreže u mehanički rad koji predaje radnoj mašini. U EMP-ima se koriste tri osnovne vrste elektromotora:

- motori jednosmerne struje,
- asinhroni motori i
- sinhroni motori.

Ranije su se u EMP-ima sa promjenljivom brzinom obrtanja koristili motori jednosmjerne struje, dok su se asinhroni i sinhroni motori koristili isključivo u neregulisanim EMP-ima. To je zbog toga što je regulaciona oprema koja je bila potrebna u EMP-ima sa promjenljivom brzinom bila složena i skupa. Pojavom pretvarača energetske elektronike i mikroracunara primjena složenih tehnika upravljanja (kao što su upravljanje orijentacijom polja, upravljanje promjenom strukture sa klizajućim karakteristikama itd.)

nije više tako složena i skupa. Tako da su u savremenim EMP-ima sa promjenljivom brzinom asinhroni i sinhroni motori, (pa i neke nove vrste motora, kao što su motori jednosmjerne struje bez četkica i motori promenljive reluktanse) zamijenili motore jednosmjerne struje.

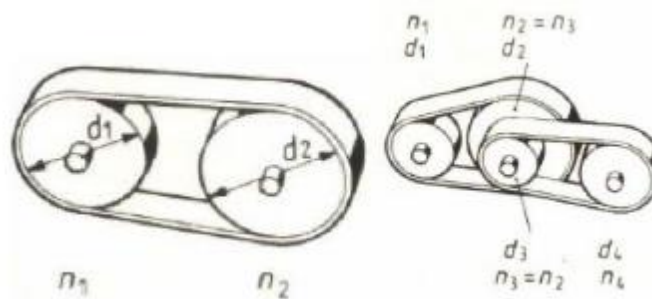
2. Mehanički prenosnik Mehanički prenosnik (zupčanik, kajišnik, spojnica itd.) služi za prenos mehaničke snage sa elektromotora na radnu mašinu. Pored toga mehanički prenosnik služi za prenos i prilagođavanje brzine, odnosno momenta, kao i vrste kretanja koje motor predaje radnoj mašini. Mehanički prenosnik mehanički povezuje elektromotor sa radnom mašinom. U najjednostavnijem slučaju mehanički prenosnik je zajedničko vratilo motora i radne mašine. Mehanički prenos snage sa elektromotora na radnu mašinu može biti direktan (preko spojnice) ili redukovan preko mehaničkog prenosnika.

U mehanike prenosnike spadaju:

- zupčasti prenosnici (paralelni, višestepeni, pod uglom itd.) sa fiksnim prenosnim odnosom (najčešće reduktori za smanjenje brzine i povećanje momenta), slika ,
- kajišni prenosnici (klinasti i pljosnati) sa fiksnim prenosnim odnosom (najčešće reduktori za smanjenje brzine i povećanje momenta), slika ,
- prenosnici sa promenljivim prenosnim odnosom (stepenasto, kao kod automobilskog mjenjača ili kontinualno),
- pužasti prenosnici, prenosnici rotacionog kretanja u translatorno,
- prenosnici sa lancem i lančanikom (slika).
- zamajci itd.



Slika Zupčasti prenosnici



Slika Kajišni prenosnici



Slika Prenosnici sa lancem i lančanikom

3. Radna mašina

Radna mašina je mehanički uređaj koji služi za obavljanje mehaničkog rada potrebnog tehnološkom procesu. Radne mašine su: pumpe (slika), ventilatori (slika), kompresori, dizalice, alatne mašine itd.

4. Pretvarač električne energije Najznačajniji element elektromotornog pogona je naravno elektromotor. Međutim, u savremenim elektromotornim pogonima veliku ulogu igra i elektronika i to dve njene grane:

- energetska elektronika i

- upravljačka elektronika.

Pretvarač električne energije služi da električnu energiju jednih parametara (visine napona, jačine struje, frekvencije i/ili broja faza) pretvori u električnu energiju drugih parametara (npr. pretvori trofaznu naizmjeničnu struju u jednosmjernu i obratno) radi regulacije karakterističnih veličina motora (brzine, ubrzanja, momenta, položaja i/ili trzaja) na način na koji mu to zada upravljački sistem. Kao pretvarači električne energije koriste se:

- pretvarači energetske elektronike, koriste se u savremenim pogonima;

- elektro-mehaničko-elektro pretvarači (npr. Vard-Leonardova grupa), koriste se u starijim pogonima;

- transformatori sa promenljivim prenosnim odnosom, koriste se u starijim pogonima i

- uređaji sa magnetnim pojačavačima, koriste se u starijim pogonima i dr.

5. Upravljački sistem Upravljački sistem uzima informacije o stanju pogona od odgovarajućih senzora koji se nalaze u povratnoj sprezi, kao i od pretvarača zadate vrednosti regulisanih veličina i obrađuje ih prema utvrđenim algoritmima. Upravljački sistem (ili regulator u širem smislu) služi za automatsko upravljanje radom elektromotora, tj. za puštanje u rad, kočenje, regulaciju karakterističnih veličina motora (brzine, ubrzanja, momenta, položaja i/ili trzaja), najčešće delujući svojim upravljačkim signalima na pretvarač energetske elektronike, ali ponekad i na sam motor (npr. pobudu motora) ili na mehanički prenosnik. Upravljački sistem je u savremenim pogonima elektronski (analogni ili digitalni) i sadrži tranzistore, integrisana kola, operacione pojačavače, logička kola, mikroprocesore i mikroracunare. Upravljački sistem često ima i zaštitnu funkciju i napaja se iz nekog izvora električne energije. Na bazi raznih mikroprocesora i DSP, razvijeni su različiti digitalni algoritmi upravljanja pretvaračima energetske elektronike.

Načini opterećivanja elektromotora

U toku rada elektromotor se ponaša onako kako to od njega zahtjeva radna mašina kako bi mogla da izvrši predviđene radne operacije. Postoje tri osnovna načina opterećivanja elektromotora:

1. trajno, koje može biti:

a) ravnomerno i

b) promenljivo.

2. kratkotrajno i

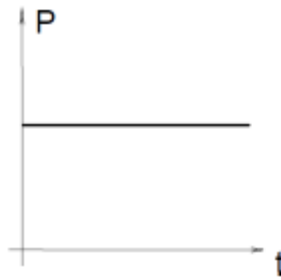
3. isprekidano (intermitirano) opterećenje.

Pored navedene tri osnovne vrste opterećenja elektromotora postoje i njihove kombinacije.

1. Trajno opterećenje. - Tokom cijelog radnog ciklusa radne mašine elektromotor je opterećen konstantnom ili promjenljivom snagom,

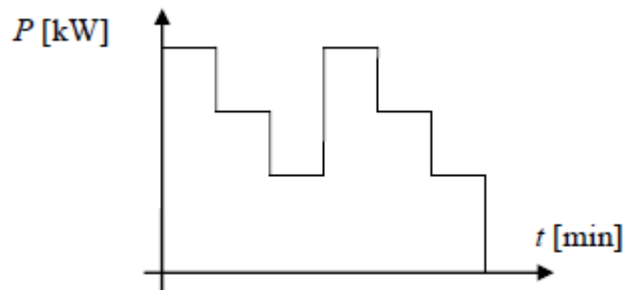
a) Ravnomjerno opterećenje. - Tokom cijelog radnog ciklusa radne mašine elektromotor je opterećen konstantnom snagom, slika 8.45 a. Trajanje opterećenja je toliko dugo da temperature svih dijelova

elektromotora dostižu stacionarna stanja. Ovako su opterećeni elektromotori koji pokreću ventilatore, pumpe itd.



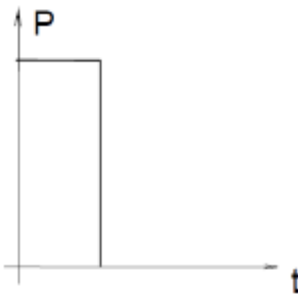
Slika 8.45 a. Ravnomjerno opterećenje

b) Promjenljivo opterećenje. – Tokom cijelog radnog ciklusa radne mašine elektromotor je opterećen promjenljivom snagom, ali bez prekida rada (opterećenja) motora, slika 8.45 b. Ovako su opterećeni elektromotori koji pokreću brusilice itd.



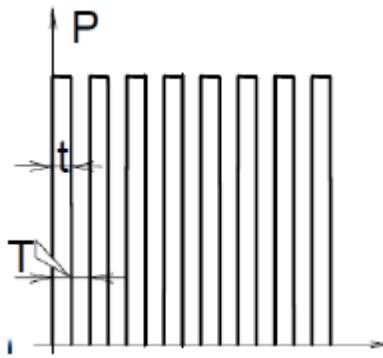
Slika 8.45 b. Promjenljivo opterećenje

2. Kratkotrajno opterećenje. - Motor je samo kratkotrajno opterećen (period rada je relativno kratak), slika 8.45 b. Temperatura tokom rada motora ne uspeva da dostigne stacionarno stanje, a period prekida rada (opterećenja) je dovoljno dug da se motor praktično ohladi do temperature okolne sredine. Primjer za ovaj režim može biti pogon kрана.



Slika 8.45. Kratkotrajno opterećenje

3. Intermitirano (isprekidano) opterećenje. - Tokom trajanja radnog ciklusa elektromotor je jedno vreme neopterećen ($P = 0$). Periodi rada (opterećenja) i prekida rada (pauza) se smjenjuju, slika 8.45 c, pri čemu ni u jednom periodu rada temperatura motora ne dostiže stacionarno stanje. Primjer ovakvog opterećenja je pogon lifta, rendisaljke ili automatskog struga, koji pri serijskoj proizvodnji obavlja jednu operaciju.



Slika 8.45. Intermitirano opterećenje

Karakteristična veličina za ovakvo opterećenje naziva se koeficijent intermitencije: $i = t/T$ koji se najčešće izražava u procentima:

$$i = (t/T) \cdot 100\%$$

gdje je:

T - vremenski period radnog ciklusa, u min

t - vremenski period rada (opterećenja) motora u toku radnog ciklusa, u min

Elektromotori se rade za navedene vrste opterećenja i na natpisnoj pločici se nalaze odgovarajuće oznake. U zavisnosti od vrste opterećenja elektromotora, razlikuju se i nominalni podaci elektromotora.

Ako se očekuje da će elektromotor biti trajno opterećen konstantnom ili promenljivom snagom tokom cijelog radnog ciklusa, bez prekida rada (pauza u radu), onda se koriste motori opšte namjene, koji su predviđeni za trajni rad.

Osnove dinamike elektromotornog pogona

U toku rada elektromotora razlikuju se **dva radna stanja**:

- **ustaljeno radno (pogonsko) stanje**, je stanje u kome ne dolazi do promjene brzine (ubrzavanja ili usporavanja), i

- **prelazno radno (pogonsko) stanje**, je stanje u kome dolazi do promjene brzine (ubrzavanja odnosno usporavanja, uglavnom nastaje prilikom puštanju u rad odnosno zaustavljanja elektromotora).

Dinamiku elektromotornog pogona čine sva radna (pogonska) stanja tog pogona, kao i njihove promjene. Pod promenom radnog (pogonskog) stanja podrazumjeva se promjena brzine obrtanja i brzina promjene pogonskog stanja. Jedan od osnovnih uslova koje elektromotor treba da ispuni jeste da sa odgovarajućom brzinom odziva prati sve promjene pogonskog stanja (brzine obrtanja ili promjene momenta).

Iz mehanike je poznato da je kod translatornog (pravolinijskog) kretanja tijela mase m brzinom v prvi izvod količine kretanja (proizvoda $m \cdot v$) jednak algebarskom zbiru svih sila koje djeluju na to tijelo u pravcu kretanja (**Drugi Njutnov zakon**):

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}(m \cdot v) &= \sum f_i \\ f_e - f_m &= \frac{d}{dt}(m \cdot v) \\ f_e - f_m &= m \frac{dv}{dt} + v \frac{dm}{dt}\end{aligned}$$

gde je:

f_e - pokretačka (motorna) sila

f_m - statička (otporna) sila koja se suprotstavlja kretanju

m - masa

v - brzina translatornog kretanja

Analogno izrazu (1) u slučaju rotacionog (obrotnog) kretanja tijela važi izraz:

$$\frac{d}{dt}(J \cdot \omega) = \sum_i M_i \dots\dots\dots(3)$$

gde je:

J - moment inercije tijela koje se obrće

ω - ugaona brzina tijela

M_i - i -ti obrtni moment koji djeluju na tijelo koje se obrće

Kod elektromotornih pogona obično se radi o rotacionom kretanju (obrtanju), koje nastaje kao posledica dejstva dva međusobno suprotstavljena momenta, tako da se iz izraza (3) dobija:

$$\begin{aligned}M_{em} - M_m &= \frac{d}{dt}(\omega \cdot J) \\ M_{em} - M_m &= J \frac{d\omega}{dt} + \omega \frac{dJ}{dt} \dots\dots\dots(4)\end{aligned}$$

Moment inercije J je najčešće konstantan pa je:

$$\omega \frac{dJ}{dt} = 0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$M_{em} - M_m = J \frac{d\omega}{dt} \quad \dots\dots\dots(6)$$

Jednačina (6) se naziva **osnovna (Njutnova) jednačina kretanja** i ona opisuje prelazno radno stanje.

Izraz $J \frac{d\omega}{dt}$ se naziva dinamički moment i označava sa M_u , tako da jednačina (6) dobija oblik:

$$M_{em} - M_m = M_u$$

Vrijednost dinamičkog momenta može biti pozitivna, negativna ili jednaka nuli, u zavisnosti od toga da li se sistem ubrzava, usporava ili je u stacionarnom stanju. Ovaj moment je različit od nule kada postoji promjena brzine. Dinamički moment je posljedica ubrzavanja ili usporavanja pojedinih obrtnih dijelova elektromotornog pogona. Da bi se neka masa počela obrtati potrebno je da postoji dinamički momenat M_u (da postoji razlika momenata $M_u = M_{em} - M_m$) koja će izazvati ubrzavanje motora (promjenu pogonskog stanja).

U stacionarnom (ustaljenom) radnom stanju je dinamički moment jednak nuli:

$$M_u = J \frac{d\omega}{dt} = 0$$

pa osnovna jednačina kretanja (6) dobija oblik:

$$M_{em} = M_m \quad \dots\dots\dots(7)$$

gde je:

M_{em} - **moment motora** (elektromagnetni ili vučni moment motora) u Nm, polazni moment motora M_{em} ne može biti veći od najvećeg kod asinhronog motora, a i kod svih ostalih motora u izvesnim granicama je određen izborom snage i tipa motora.

M_m - **moment radne mašine** (moment opterećenja ili statički, otporni, mehanički moment) u Nm, je posledica otpora koji se javljaju prilikom rada radne mašine (otpori trenja svih vrsta, otpor rezanja, otpor koji pruža teret pri podizanju itd.). Moment radne mašine M_m zavisi od karakteristika te radne mašine, kao i ugaona brzina ω , odnosno brzina obrtanja motora n , čije podatke dobijamo iz dijagrama koga daje konstruktor.

$M_u = J \frac{d\omega}{dt}$ - **dinamički moment** (moment ubrzavanja ili usporavanja) u Nm,

J – moment inercije rotora motora (moment inercije obrtnih masa rotora motora i radne mašine sveden na osovinu motora)

ω - ugaona brzina motora

$$\frac{d\omega}{dt} = \alpha = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad \text{-- ugaono ubrzanje vratila (osovine) motora}$$

θ - ugaoni položaj vratila (osovine) motora

Pri postavljanju osnovne jednačine kretanja (6) treba voditi računa o predznacima momenta motora M_{em} i momenta mašine M_m . Moment mašine M_m je **pozitivan** predznaka ako je njegov smjer suprotan od smjera obrtanja motora, a **negativan** ako je njegov smjer isti kao i smjer obrtanja motora. Moment motora M_{em} je **pozitivan** predznaka ako motor radi u svom uobičajenom motornom režimu, a **negativan** ako radi u režimu kočenja. Tako da u motornom režimu rada motora važi jednačina (6):

$$M_{em} - M_m = J \frac{d\omega}{dt} \dots\dots\dots(8)$$

Međutim, ako se određenom akcijom rukovaoca izazove promjena smjera elektromagnetne sile (kočenje motora), onda predznak elektromagnetnog momenta motora M_{em} postaje negativan i dolazi do smanjenja brzine u intervalu Δt ($-\Delta\omega$), pa jednačina (6) dobija oblik:

$$-M_{em} - M_m = J \frac{d(-\omega)}{dt} \dots\dots\dots(9)$$

tj:

$$\begin{aligned} -M_{em} - M_m &= -J \frac{d\omega}{dt} \quad / \cdot (-1) \\ M_{em} + M_m &= J \frac{d\omega}{dt} \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

Upoređujući jednačinu (10) sa jednačinom (8), može se uočiti da se promijenio samo predznak ispred momenta radne mašine M_m , jer je smjer djelovanja momenta radne mašine M_m isti kao i smjer djelovanja momenta motora M_{em} .