

ELEKTRIČNE MAŠINE I ELEKTROMOTORNI POGONI

Električne mašine

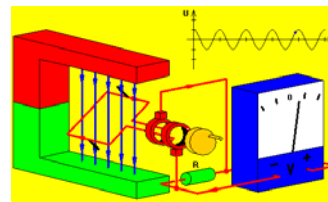
Princip rada

Pojam mašine i električne mašine

- Uređaj koji energiju transformiše u mehanički rad
- Električne mašine transformišu energiju električne struje u mehanički rad
- Električne mašine su reverzibilne
- Električni motori
- Električni generatori
- Transformatori

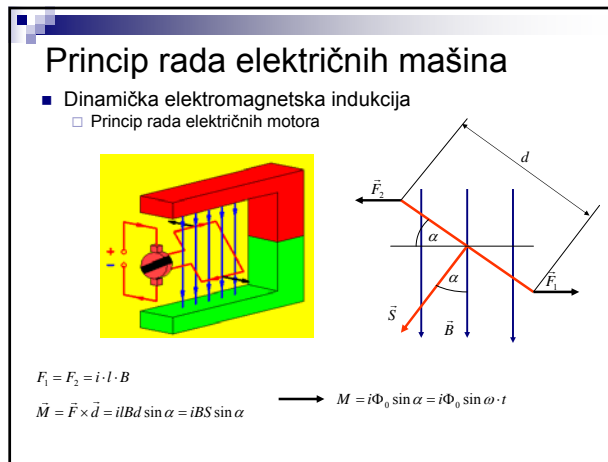
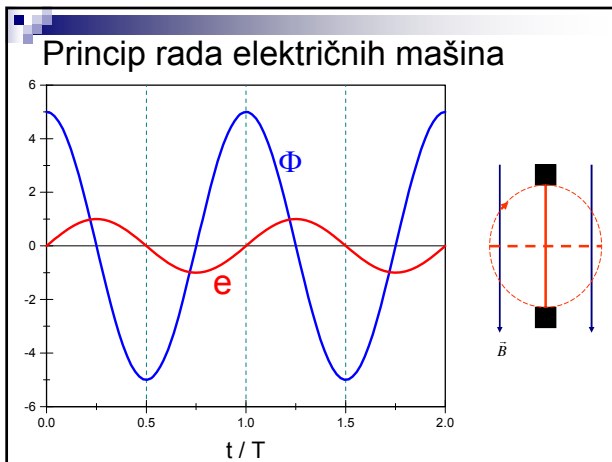
Princip rada električnih mašina

- Dinamička elektromagnetska indukcija
 - Princip rada generatora

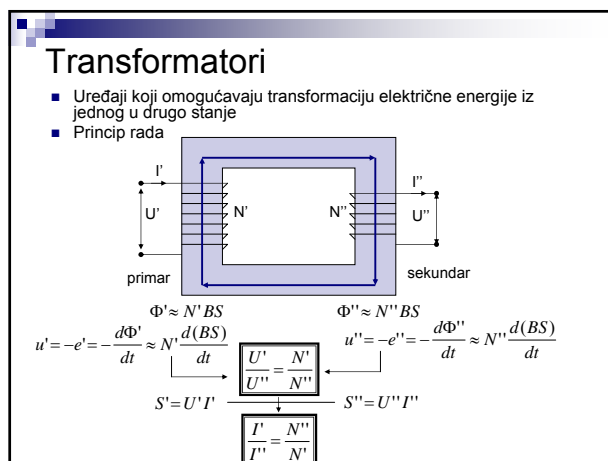


$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\vec{B} \cdot \vec{S}) = -\frac{d}{dt}(BS \cos \alpha) \rightarrow e = -\frac{d}{dt}(BS \cos \alpha) = \omega BS \sin \alpha = \omega \Phi_0 \sin \omega t$$

$\alpha = \omega \cdot t$



- ### Sumarno
- Princip
 - dinamička elektromagnetska indukcija
 - nastaje naizmjenična EMS
 - princip je reverzibilan
 - Praksa
 - koristi se istovremeno veliki broj namotaja
 - magnetsko polje se proizvodi elektromagnetom



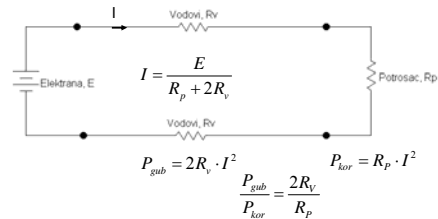
Transformatori

$$n = \frac{N'}{N''} \quad \text{odnos transformacije}$$

- Omogućavaju transformaciju električne energije iz oblika niskog napona i visoke jačine struje u oblik visokog napona i niske jačine struje i obrnuto
- Transformatori mogu transformisati isključivo naizmjeničnu struju

Primjena transformatora za prenos električne energije

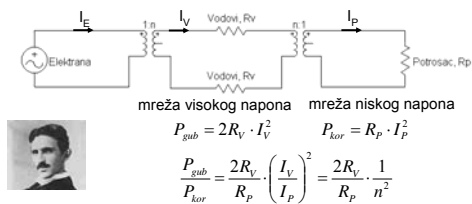
- Prenos električne energije jednosmjernom strujom (Edisonov sistem)



- Povećanje snage potrošača znači povećanje snage gubitaka
- Smanjenje gubitaka moguće je samo smanjenjem otpornosti vodova
 - debeli vodovi (skupo)
 - kratki vodovi (elektrocentrale)

Primjena transformatora za prenos električne energije

- Prenos električne energije naizmjeničnom strujom (Teslin sistem)



- Samo se naizmjenična struja može transformisati
- Prenos naizmjeničnom strujom je n^2 jeftiniji od prenosa jednosmjernom strujom
- Izgradnja elektrana gde je najpovoljnije
- Pretvaranje svih vrsta energije u električnu

Transformatori

Primjena, vrste, konstrukcija i zaštita transformatora

Transformator je električna mašina, koja ima zadatak da preobrazi (transformiše) naizmjenični napon jedne vrijedosti u naizmjenični napon druge vrijednosti, a iste učestanosti, pri što većem koeficijentu korisnog dejstva ($\eta=0,96-0,99$).

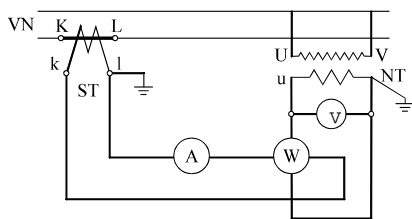
Primjena transformatora je veoma raznovrsna i oni neosporno spadaju među najrasprostranjenije električne uređaje. Koriste se u prenosu i distribuciji električne energije, pri mjerenju visokih napona i jakih struja, u raznim industrijskim postrojenjima, automatici, radio tehnici, elektronici itd.

Transformatori snage

Kao što smo ranije govorili, neposredno iza generatora u elektrani se ugrađuje "uzlazni transformator", koji podiže napon na vrijednost (110, 220, 380 kV), koja omogućava ekonomičan prenos električne energije na velike udaljenosti. Na kraju dalekovoda postavlja se "silazni transformator", koji visoki napon dalekovoda smanjuje na vrijednost, koja je standardizovana za distribuciju ili potrošače.

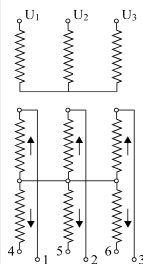
Mjerni transformatori

Vrlo visoki naponi i vrlo jake struje, iz tehničkih razloga, ne mogu se direktno mjeriti, već se koriste naponski (NT) i strujni (ST) mjerni transformatori. Na istoj slici, pored mjerenja struje i napona, prikazano je i mjerenje snage visokonaponskog sistema. Naponski transformatori grade se za različite primarne napone, a nominalni napon sekundara je 100V. Strujni transformatori umjesto primarnog namotaja imaju bakarnu šinu (N=1). Nominalna struja sekundara je 1A (5A). Karakteristična veličina mjernih transformatora je **prenosni odnos transformacije**, koji predstavlja odnos nominalnih primarnih i sekundarnih vrijednosti. Po jedan kraj sekundara i naponskog i strujnog transformatora je uzemljen. Strujni transformatori moraju imati mogućnost kratkog spajanja sekundara. Ako bi se sekundar, npr. pri zamjeni instrumenta, ostavio otvoren, na njemu bi se indukovao relativno visok napon, koji može biti opasan po život rukovaoca. Zato se sekundar strujnog transformatora ne smije ostaviti otvoren, već se kratko spaja.



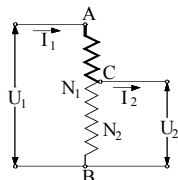
Da bi se dobile stvarne vrijednosti visokonaponskog sistema, mjerene prema slici, pokazivanje voltmetra U_v treba pomnožiti sa prenosnim odnosom naponskog transformatora (npr. 110.000/100), pokazivanje ampermetra sa prenosnim odnosom strujnog transformatora (npr. 1.000/1); snaga će se dobiti kada se pokazivanje vatmetra pomnoži sa prenosnim odnosima i strujnog i naponskog transformatora.

Promjena broja faza



Kod pretvaranja naizmjenične struje u jednosmjernu, za potrebe potrošača koji koriste jednosmjernu struju (kao što je elektroliza aluminijuma), transformatori se koriste za promjenu broja faza. Višefazni sistemi su pogodni za napajanje ispravljača, jer se tada dobije manje talasasta jednosmjerna struja. Pogodnom vezom namotaja sekundara trofazni sistem se lako pretvara u šestofazni, sa faznim pomjerajem od $\pi/3$.

Autotransformatori

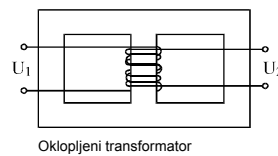
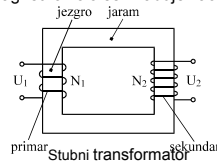


Ponekad je potrebno da odnos transformacije bude blizak jedinici, tj. da je sekundarni napon samo malo niži (ili viši) od primarnog. Tada je pogodnije, i ekonomičnije, da se gradi autotransformator, gdje je jedan dio namotaja istovremeno i primarni i sekundarni.

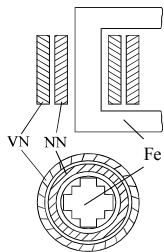
Kako su struje I_1 i I_2 skoro u protivfazi, u zajedničkom dijelu namotaja teče, dakle, njihova razlika, pa se i presjek ovog dijela namotaja izrađuje od provodnika manjeg poprečnog presjeka, čime se postiže ušteda u materijalu za izradu transformatora.

Konstrukcija transformatora

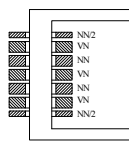
Osnovni dijelovi transformatora su: magnetno kolo i namotaji. Magnetno kolo, koje služi za zatvaranje magnetnog fluksa, izrađuje se od čeličnih limova na bazi silicijuma, i nazivaju se trafo-limovi. Limovi su izolovani specijalnim lakom, kako bi se smanjile vrtložne struje indukovane u magnetnom kolu, a time se smanjuju gubici snage - gubici u gvožđu. Debljina limova se kreće od 0,3 do 0,5 mm. Transformatori, čije je magnetno kolo izrađeno kao na sl.1, nazivaju se **stubni transformatori**. U nekim slučajevima, posebno kod trofaznih transformatora, radi ravnomjerne raspodjele magnetnog fluksa, magnetno kolo se izrađuje kao na sl. 2.



Na jedan stub postavlja se i primarni i sekundarni namotaj jedne faze. Namotaji se izrađuju od izolovane bakarne žice. Izuzetno, npr. kod pećnih transformatora elektroćelinskih peći za topljenje čelika, sekundar se izrađuje od bakarnih šina. Prema obliku namotaja, razlikujemo transformatore sa cilindričnim namotajima i transformatore sa prstenastim namotajima



Cilindrični namotaj



Prstenasti namotaj

Zaštita transformatora

Na visokonaponskom dovodu postavlja se **prenaponska zaštita**. To su odvodnici prenapona koji štite transformator od nedozvoljeno visokih napona, koji mogu da se pojave u visokonaponskoj mreži.

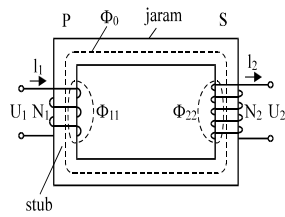
Prekostrujna zaštita štiti transformator od nedozvoljeno jakih struja, koje bi mogle izazvati nedozvoljeno pregrijavanje ili čak dinamičko oštećenje.

Od unutrašnjih kvarova, zaštita se ostvaruje pomoću **Buholcovog releja**, koji je smješten na cijevi koja povezuje kazan sa konzervatorom (manji sud za ulje iznad nivoa kazana). Unutrašnji kvarovi praćeni su enormnim zagrijavanjem, što dovodi do isparavanja ulja. Gasovi, na putu ka konzervatoru, prolaze kroz Buholcov rele. Plovak, koji se nalazi u releju, pri nailasku gasova, zatvara određene kontakte. Ako je gasova manje (manji kvar), plovak zatvara strujno kolo za svjetlosnu i zvučnu signalizaciju, a ako je gasova više, plovak zatvara strujno kolo za komandu prekidaču za automatsko isključenje transformatora.

Veći transformatori imaju i **nadtemperaturnu zaštitu**. Kontaktni termometri, koji mjere temperaturu ulja ili namotaja, daju, pri nedozvoljenom porastu temperature, kontakt strujnom kolu za signalizaciju ili isključenje.

Elementarna teorija transformatora

Namotaji primara i sekundara nisu konduktivno povezani. Energija se sa primarne strane prenosi na sekundarnu zahvaljujući fenomenu međusobne indukcije. Da bi induktivna sprega između primara i sekundara bila što bolja, namotaji se postavljaju na gvozdено jezgro



$$B = \mu \cdot \frac{NI}{l} \quad \mu_{Fe} = \mu_r \cdot \mu_0$$

$$\Phi_0 = B \cdot S_{Fe} \quad \Phi_1 = \Phi_0 + \Phi_{11}$$

$$\Phi_2 = \Phi_0 + \Phi_{22}$$

$$u_1(t) - R_1 \cdot i_1 - N_1 \frac{d\Phi_0}{dt} - N_1 \frac{d\Phi_{11}}{dt} = 0$$

$$-N_2 \frac{d\Phi_0}{dt} - N_2 \frac{d\Phi_{22}}{dt} - R_2 \cdot i_2 - u_2(t) = 0$$

$$\Phi_0 = \Phi_{0m} \cos \omega t$$

$$e_1 = -N_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = N_1 \omega \Phi_{0m} \sin \omega t = E_{1m} \sin \omega t$$

$$E_{1m} = N_1 \cdot \omega \cdot \Phi_{0m} = N_1 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \Phi_{0m} \rightarrow E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = 4,44 f \cdot N_1 \Phi_{0m}$$

$$E_2 = 4,44 f \cdot N_2 \Phi_{0m} \rightarrow \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2} = n_{12}$$

Električne mašine

Mašine za trofaznu naizmjeničnu struju

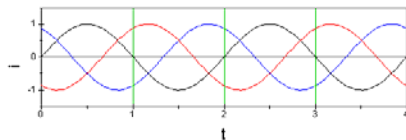
Pojam trofaznih sistema

- Još jedan Teslin izum koji dovodi do ogromnih ušteda
- Sistem tri struje ili napona jednakih amplituda, fazno pomjerenih za trećinu perioda, predstavlja *uravnoteženi trofazni sistem*

$$R: i_r = I\sqrt{2} \sin(\omega t)$$

$$S: i_s = I\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

$$T: i_t = I\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{4\pi}{3}) = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3})$$



zbir tri struje uravnoteženog trofaznog sistema uvijek je jednak nuli

Trofazni sistem u prenosu električne energije

- Povećanje prenesene snage zahtijeva povećanje broja "kanala" za prenos energije, odnosno broja provodnika, što značajno uvećava cijenu elektrodistributivnih sistema
- Teži se smanjenju jačine struje po provodniku, smanjenju broja provodnika, a povećanju ukupne prenesene snage

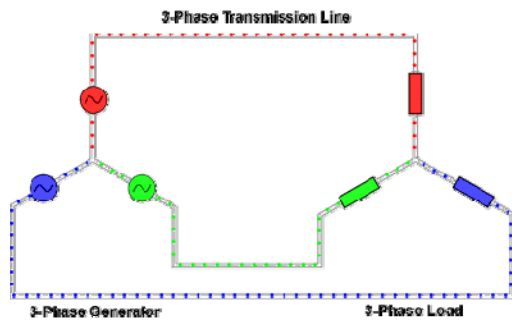


Provodnici druge i treće faze su povratni vodovi prve faze

$$E_R = E_S = E_T$$

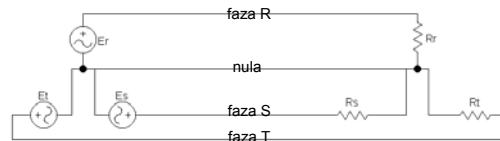
$$R_R = R_S = R_T$$

Trofazni sistem u prenosu električne energije



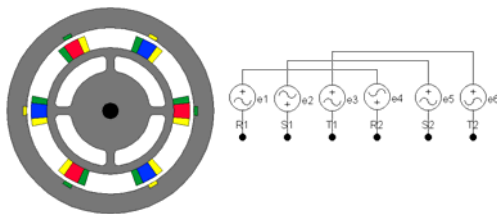
Trofazni sistem u prenosu električne energije

- U realnosti, impedanse otpornosti nijesu uravnotežene, pa zbir struja nije jednak nuli
- Dovoljan je samo jedan povratni vod za sve tri faze, koji se naziva **nulti** provodnik (nula)
- Prenos trostruko veće energije omogućen je sa ukupno četiri provodnika



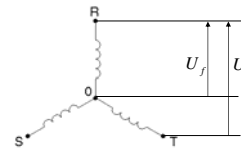
Generator trofazne naizmjenične struje

- Osnova alternator monofazne naizmjenične struje
- Alternator sa 3 grupe po 2p namotaja indukta pod međusobnim uglom od 120°
- 3 grupe namotaja indukta se vezuju svaka za sebe (Tesla)



Vezivanja trofaznih sistema

Vezivanje u zvijezdu



Fazni napon

Linijski napon

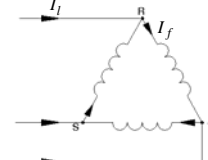
$$U_i = U_f \sqrt{3}$$

$$I_i = I_f$$

$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U_i \cdot I_i \cdot \cos \varphi$$

Vezivanje u trougao



Fazna struja

Linijaska struja


$$U_i = U_f$$

$$I_i = I_f \sqrt{3}$$

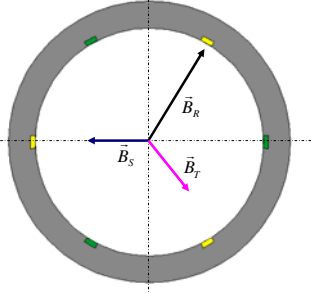
$$P = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U_i \cdot I_i \cdot \cos \varphi$$


Motori trofazne naizmjenične struje



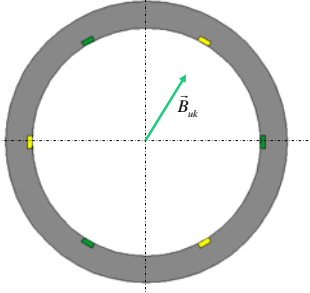
- Princip: obrtno magnetno polje (ponovo Tesla)




Motori trofazne naizmjenične struje



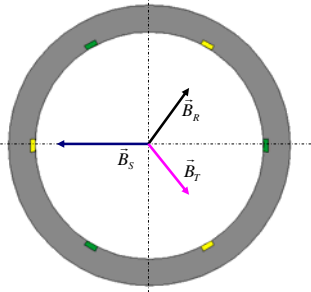
- Princip: obrtno magnetno polje (ponovo Tesla)




Motori trofazne naizmjenične struje



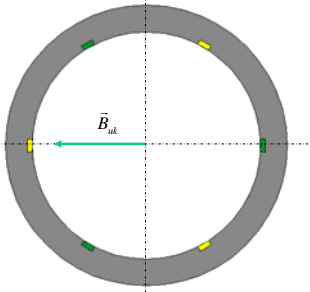
- Princip: obrtno magnetno polje (ponovo Tesla)



Motori trofazne naizmjenične struje



- Princip: obrtno magnetno polje (ponovo Tesla)



Motori trofazne naizmjenične struje

■ Princip: obrtno magnetno polje (ponovo Tesla)

The diagram shows a circular stator with six poles. Three poles are shaded yellow and three are shaded green. A vector \vec{B}_R (black) points towards the top-right. A vector \vec{B}_S (blue) points towards the left. A vector \vec{B}_T (magenta) points towards the bottom-right.

Motori trofazne naizmjenične struje

■ Princip: obrtno magnetno polje (ponovo Tesla)

The diagram shows a circular stator with six poles. Three poles are shaded yellow and three are shaded green. A vector \vec{B}_{ok} (green) points towards the bottom-right.

Motori trofazne naizmjenične struje

■ Princip: obrtno magnetno polje (ponovo Tesla)


The diagram shows a rotor with six poles, each with a coil. A blue arrow indicates the direction of rotation. A blue vector \vec{B}_R points towards the top-right.

Motori trofazne naizmjenične struje

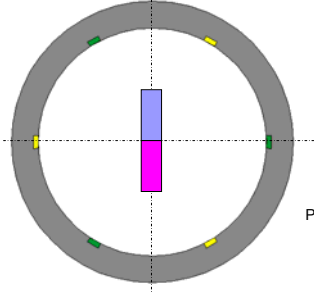
■ Princip: obrtno magnetno polje (ponovo Tesla)

The diagram shows a circular stator with six poles labeled A, B, and C. Each pole has a coil. A red vector \vec{B}_R points towards the left. The poles are labeled with N (North) and S (South) poles.

Motori trofazne naizmjenične struje



- Princip: obrtno magnetno polje (ponovo Tesla)




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

$$P - \text{ broj pari polova po fazi}$$

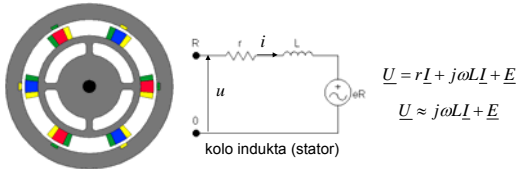
$$n = \frac{f}{3p'}$$

$$P' - \text{ ukupan broj pari polova}$$

Sinhroni motor



- Elektromagnet napajan jednosmernom strujom na rotoru (Tesla), danas elektronski bez kontakata
- Rotor mora da se okreće potpuno istom brzinom kao i magnetno polje
- Ustvari, alternator koji radi kao motor
- Složeno puštanje u rad, i obrtanje isključivo potuno konstantnom brzinom



$$\underline{U} = r\underline{I} + j\omega L\underline{I} + \underline{E}$$

$$\underline{U} \approx j\omega L\underline{I} + \underline{E}$$

$$R$$

$$r$$

$$i$$

$$L$$

$$0$$

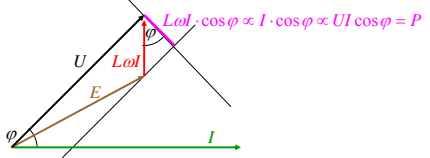
$$u$$

$$0$$

$$R$$



kolo indukta (stator)

Sinhroni motor



- Napon napajanja motora U je konstantan
- Opterećenje motora konstantno, moment sprega konstantan, snaga konstantna, ljubičasta duž konstantna
- Ako menjamo jačinu jednosmerne struje u induktoru (rotoru), menja se E
- kraj E mora da se kreće po paraleli napona napajanja
- Menja se jačina struje motora i fazni ugao motora φ
- fazni ugao motora φ može da bude pozitivan (motor se ponaša kao kalem)
- fazni ugao motora φ može da bude negativan (motor se ponaša kao veliki kondenzator)

Sinhroni motor

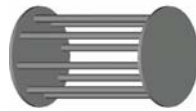



- Visok stepen korisnog dejstva
- Složeno puštanje u rad
- Konstantna brzina obrtanja
- Promjenljiv karakter impedanse
- Primena
 - sinhroni kompenzator (džinovski kondenzator)
 - posebne svrhe (mašine velike snage sa konstantnim brojem obrtaja)
 - pumpe
 - kompresori
 - tkačke mašine

Asinhroni motor



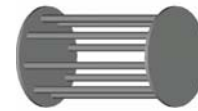
- Obrtno magnetsko polje, uprkos konstantnom intenzitetu, je *promjenljivo magnetsko polje* (po pravcu) (naravno, Tesla)
- Kao promjenljivo magnetsko polje, ono indukuje struju u provodnicima koji se nalaze u polju
- Nije potrebno napajanje provodnika rotora



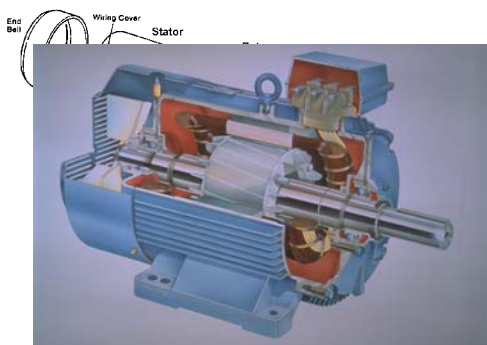
Asinhroni motor



- **KOLEKTORSKI SKLOP NEPOTREBAN !!!**
- Stator isti kao kod sinhronog motora, sa zadatkom da stvara obrtno magnetsko polje
- Rotor
 - namotaj kao kod sinhronog motora, sa spojenim krajevima (motori velike snage)
 - kavez (uobičajeno)



Asinhroni motor

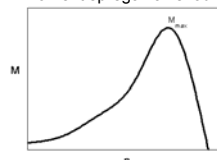


Asinhroni motor

- Obrtno polje mora da se okreće u odnosu na rotor da bi se u rotoru indukovala struja
- Rotor asinhronog motora **ne smije** da se okreće istom brzinom kao obrtno polje da bi obrtno polje "vuklo" rotor
- Relativna razlika ugaonih brzina naziva se **klizanje** asinhronog motora, i uobičajeno iznosi 3 do 5 procenata

$$g = \frac{n_B - n_{rot}}{n_B}$$

- Moment sprega zavisi od klizanja



- Postoji nulti moment
- Maksimalni moment proporcionalan kvadratu naponu napajanja U^2
- Maksimalni moment značajno veći
- Brzina obrtanja može da se menja uvođenjem redno vezanog promenljivog otpornika

Asinhroni motor

- Jednostavna konstrukcija (jeftin)
- Robustan (malo kvarova)
- Lako puštanje u rad (mada je početna struja velika)
- Uglavnom radi sa konstantnom brzinom rada
- Može da se upravlja promjenom frekvencije (elektronika)
- Primjene
 - svuda gdje je dostupna trofazna struja
 - snage od nekoliko stotina vati do nekoliko kilovata



Linearni motor

- Stator razvijen duž pravca stvara magnetno polje koje nije obrtno nego se kreće duž pravca



- Koristi se za pokretanje električnih vozova koji lebde nad šinama (Japan)

Linearni motor



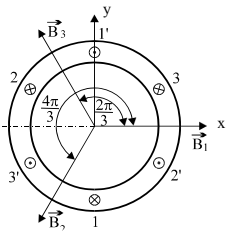
Asinhronne mašine

Asinhronne mašine su električni energetski, reverzibilni uređaji naizmjenične struje, koji vrše konverziju električne energije u mehaničku - asinhroni motori, ili konverziju mehaničke energije u električnu - asinhroni generatori. Asinhroni motori, posebno trofazni asinhroni motor, zbog svoje jednostavnosti i pouzdanosti, danas je najčešće korišćeni motor u industriji.

Konverzija električne energije u mehaničku ostvaruje se zahvaljujući tzv. transformatorskom dejstvu; električna energija sa nepokretnog dijela - statora, prenosi se na pokretni dio - rotor, bez konduktivne veze između njih, zahvaljujući međusobnoj indukciji.

Mi ćemo se ukratko upoznati sa načinom rada i osnovnim svojstvima asinhronog motora, misleći prevashodno na trofazni asinhroni motor.

Obrtno magnetno polje



Jedna od osnovnih osobina Teslinih polifaznih sistema, je to, što se pomoću njih može ostvariti obrtno magnetno polje, koje je u stanju da obrće provodno tijelo, ako se ono nalazi u ovom polju.

Kako ostvariti obrtno magnetno polje?

Stator motora predstavlja šuplji valjak od livenog gvožđa. Po unutrašnjem obodu statora su žljebovi (utori). U žljebove se postavljaju namotaji izolovane bakarne žice. Postavimo namotaje na sledeći način: prvi namotaj, čiji su krajevi 1-1' (slika), postavimo tako da se njegova osa poklapa sa y-osom, drugi namotaj, čiji su krajevi 2-2', postavimo tako da je njegova osa pomjerena unazad za 120°, osu trećeg namotaja 3-3', pomjerimo unazad za 120° u odnosu na drugi namotaj. Presjek statora sa ovako postavljenim namotajima predstavljen je na slici.

Priključimo li sada namotaje na mrežu trofaznog simetričnog sistema, kroz namotaje će teći odgovarajuće struje:

$$1-1' \rightarrow i_1 = I_m \cos \omega \cdot t$$

$$2-2' \rightarrow i_2 = I_m \cos(\omega \cdot t - 2\pi/3)$$

$$3-3' \rightarrow i_3 = I_m \cos(\omega \cdot t - 4\pi/3)$$

Ove tri struje stvaraju tri magnetna polja, čije su indukcije srazmjerne strujama, i u fazi sa njima:

$$i_1 \rightarrow B_1(t) = B_m \cos \omega \cdot t$$

$$i_2 \rightarrow B_2(t) = B_m \cos(\omega \cdot t - 2\pi/3)$$

$$i_3 \rightarrow B_3(t) = B_m \cos(\omega \cdot t - 4\pi/3)$$

Dakle, u središtu statora imamo tri pulsirajuća magnetna polja. Da bismo odredili rezultantno polje, razložićemo pojedine indukcije na x-y komponente:

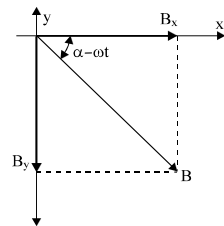
$$B_x = B_1(t) + B_2(t) \cos(4\pi/3) + B_3(t) \cos(2\pi/3) = B_m \left\{ \cos \omega \cdot t - \frac{1}{2} [\cos(\omega \cdot t - 2\pi/3) + \cos(4\pi/3)] \right\}$$

$$B_x = \frac{3}{2} B_m \cos \omega \cdot t$$

$$B_y = B_1(t) \cdot \sin(2\pi/3) + B_2(t) \cdot \sin(4\pi/3) = B_m \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} [\cos(\omega \cdot t - 4\pi/3) - \cos(\omega \cdot t - 2\pi/3)] \right\}$$

$$B_y = -\frac{3}{2} B_m \sin \omega \cdot t$$

Dakle, komponente rezultantne indukcije B_x i B_y su prostoperiodične funkcije vremena, sa istim amplitudama B_m , a fazama u kvadraturi, što je predstavljeno na slici.



Intenzitet indukcije rezultantnog polja je:

$$B(t) = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \frac{3}{2} B_m$$

Pogledajmo kakav je nagib vektora indukcije prema koordinatnim osama:

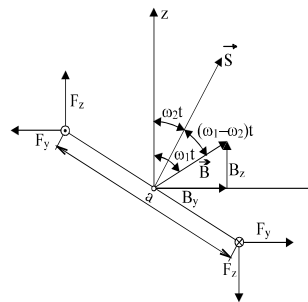
$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_y}{B_x} = -\operatorname{tg} \omega \cdot t = \operatorname{tg}(-\omega \cdot t)$$

$$\alpha = -\omega \cdot t$$

To znači, da se, unutar statora, magnetno polje indukcije B obrće ugaonom brzinom ω , koja je jednaka kružnoj frekvenciji struje kroz namotaje. Zbog toga se ovo polje naziva **obrotno magnetno polje**. Brzina obrtanja magnetnog polja često se naziva **sinhronom brzinom** i ona se određuje:

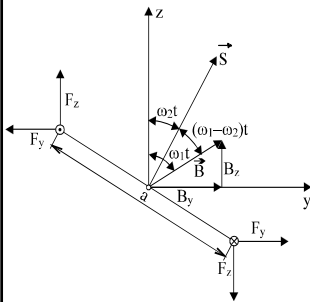
$$\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot n / 60; \quad n = 60f \text{ (ob/min)}$$

Elementarna teorija rada asinhronog motora



Obrtno magnetno polje indukcije B obrće se sinhronom brzinom ω_1 i u posmatranom trenutku zauzima položaj sa uglom $\omega_1 t$ u odnosu na Z-osu. Ram formiran od N_2 namotaja izolovane žice, čiji su krajevi kratko spojeni, u pravcu x-ose ima dužinu b, a širina mu je a. Orjentisana površina rama, normalna na ravan namotaja, zauzima položaj sa uglom $\omega_2 t$ u odnosu na z-osu.

Elementarna teorija rada asinhronog motora



Namotaj je okarakterisan svojom termogenom otpornošću R_2 i sopstvenom induktivnošću L_2 . Magnetni fluks, kroz površinu namotaja, je:

$$\Phi = \vec{B} \vec{S} = BS \cos(\omega_1 t - \omega_2 t) = \Phi_m \cos \omega_s t$$

$$\omega_s = \omega_1 - \omega_2 = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \omega_1 = s \omega_1$$

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

gdje je: s - **klizanje**, relativno zaostajanje namotaja, sa brzinom n_2 , iza obrtnog magnetnog polja, sa sinhronom brzinom n_1 .

Magnetni fluks kroz površinu namotaja, kao što pokazuje jednačina, mijenja se u vremenu sa ugaonom frekvencijom ω_s . Stoga, u namotaju će se indukovati ems-a e_2 :

$$e_2(t) = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 \omega_s \Phi_m \sin \omega_s t = E_{2m} \sin \omega_s t$$

Pod uticajem ems-e e_2 , kroz namotaj će teći struja, data sljedećom simboličnom jednačinom:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{E}_2}{\underline{Z}_2} = I_{2m} \cdot e^{j(\omega_s t - \varphi_2)}$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2 = R_2 + j\omega_s \cdot L_2$$

$$\varphi_2 = \text{arc} \cdot \text{tg} \frac{\omega_s \cdot L_2}{R_2}$$

Napomenimo da, kao što pokazuju jednačine, veličina i učestanost ems-e i struje u rotoru, kao i impedansa i fazni ugao, zavise od ω_s , a, to znači, od brzine obrtanja rotora, jer je:

$$\omega_s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \omega_1 = 2\pi \cdot f_2$$

$$2\pi \cdot f_2 = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} 2\pi \cdot f_1 \rightarrow f_2 = s \cdot f_1$$

Trenutna vrijednost struje u namotaju je:

$$i_2(t) = I_{2m} \sin(\omega_s \cdot t - \varphi_2)$$

$$I_{2m} = \frac{E_{2m}}{Z_2} = \frac{N_2 \omega_s \Phi_m}{\sqrt{R_2^2 + (\omega_s L_2)^2}} = \frac{N_2 \omega_s \Phi_m}{Z_2}$$

Kako se namotaj, svojom dužinom b , nalazi u magnetnom polju, i u njemu teče struja i_2 , na njega će djelovati elektromagnetne mehaničke sile date sa:

$$\vec{F}(t) = N_2 i_2 (\vec{b} \times \vec{B})$$

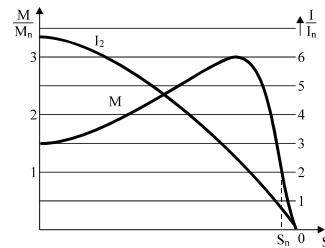
$$M_u(t) = M_a(t) + M_b(t) + M_c(t) = \frac{N_2^2 \omega_s \Phi_m^2}{2Z_2} \cdot 3 \cos \varphi_2$$

Posljednja jednačina ukazuje na bitnu osobinu asinhronog motora: ako na rotoru rasporedimo simetrično tri kratkospojena namotaja, tada je trenutna vrijednost ukupnog momenta, koji djeluje na namotaje, stalna pa je to ujedno i srednja vrijednost momenta.

$$M_u(t) = \text{const.},$$

$$M = 3 \frac{N_2^2 \cdot \omega_s \cdot \Phi_m^2}{2 \cdot (R_2^2 + \omega_s^2 \cdot L_2^2)} R_2 = 3 \frac{I_2^2}{\omega_s} R_2$$

Zavisnost momenta motora od brzine obrtanja rotora



$$M_0 = 3 \frac{I_2^2 \cdot R_2}{\omega_1 - \omega_2}$$

$$M_0 \cdot \omega_1 = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 + M_0 \cdot \omega_2$$

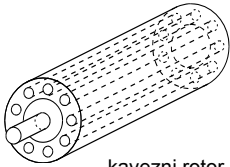
$$\omega_s = \omega_1 - \omega_2 = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1} \omega_1 = s \cdot \omega_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1} n_1$$

$$s = 0, (n_2 = n_1) \rightarrow e_2 = 0 \rightarrow i_2 = 0 \rightarrow F_2 = 0 \rightarrow M = 0$$

$$s = 1, (n_2 = 0), \omega_s = \omega_1, M = M_{pol}$$

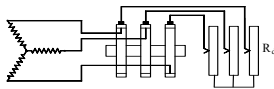
$$s_u = (0,03 - 0,05) \quad R_2 = \omega_s \cdot L_2 = s \cdot \omega_1 L_2$$

Puštanje u rad asinhronog motora



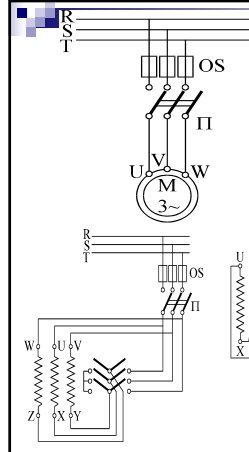
kavezni rotor

Kao što smo rekli, za rad asinhronog motora dovoljno je da se na rotoru nalaze provodnici koji mogu biti u kratkom spoju. S druge strane, rekli smo, da se moment motora može mijenjati promjenom otpora u rotoru. Imajući ovo u vidu, razvijene su dvije osnovne vrste konstrukcije rotora asinhronog motora. Jedna vrsta, gdje su u žljebove gvoždenog jezgra rotora postavljene bakarne ili aluminijumske šipke, koje su na čeonim stranama kratko spojene metalnim prstenovima. Ovo su kratko spojeni ili kavezni rotori..



namotani rotor

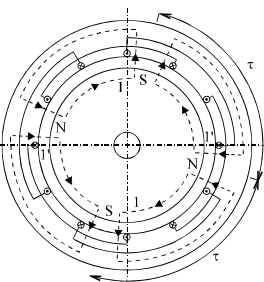
Dругu vrstu čine rotori, gdje su u gvozdene žljebove smješteni namotaji izolovane žice, čiji su jedni krajevi vezani u zvjezdište, a slobodni krajevi su vezani za tri metalna prstena, koji su čvrsto postavljeni na osovinu rotora izolovani od nje i međusobno. Na klizne prstenove postavljaju se ugljene četkice, preko kojih je u kolo rotora moguće uključivati veći ili manji dodatni otpor i tako, mijenjajući vrijednost, podešavati moment motora, odnosno brzinu obrtanja rotora. Ovakvi motori nazivaju se motori sa namotanim rotorom, ili motori sa prstenovima, ili klizno-kolutni motori



Sa kratkospojenim rotorom obično se grade motori manjih snaga. Motori manjih snaga uključuju se direktno na mrežu, a većih snaga pomoću preklopke zvijezda-trougao, ili trofaznog transformatora za smanjenje napona. Pri vezi u zvijezdu, M_{pol} se smanjuje za tri puta, jer je U_f za $\sqrt{3}$ manji od onog pri trouglu, ali je, zato, i struja koju motor povuče iz mreže, tri puta manja.

Kod motora sa kliznim prstenovima, povoljnim izborom početne otpornosti, može se postići povoljan M_{pol} , a da struja polaza ne bude prevelika.

Promjena brzine i smjera obrtanja asinhronog motora



U dosadašnjem posmatranju, obrtno magnetno polje smo dobili pomoću tri namotaja, jedan namotaj po svakoj fazi. Namotaji su ravnomjerno raspoređeni po unutrašnjosti statora, međusobno pomjereni za po 120° . Tada je ugaona brzina polja ω_1 bila jednaka kružnoj učestanosti struje napojne mreže. U tom slučaju, svaki namotaj je stvarao po dva pola po svakoj fazi. Sada posmatrajmo slučaj kada svaki fazni namotaj razdvojimo u dva dijela. Uočimo da prva faza stvara četiri pola. Očigledno je da će i namotaji drugih faza stvoriti po četiri pola, koji su međusobno, i u odnosu na prvu pomjereni, i fazno i prostorno. U središtu statora ćemo opet imati obrtno magnetno polje, čija je brzina obrtanja dvostruko manja.

Neka je T perioda naizmjenične trofazne struje. Tada, kod dvopolnog statora, tokom vremena T, magnetno polje pređe pun ugao 2π . Znači njegova ugaona brzina je

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T} = \omega \quad \omega - \text{kružna učestanost struje napajanja.}$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{pT} = \frac{\omega}{p} \quad \text{kod višepolne mašine.}$$

$$\omega_1 = 2\pi \cdot f_1 = 2\pi \frac{n_1}{60} = \frac{2\pi}{pT} = \frac{2\pi}{p} f$$

$$n_1 = \frac{60f}{p}$$

Kod motora sa namotanim rotorom brzina se može mijenjati promjenom otpora u kolu rotora. Dodavanjem dodatnog otpora u kolo rotora povećavaju se džulovi gubici, smanjuje se stepen korisnog dejstva, pa se ovaj način regulacije brzine rijetko koristi.

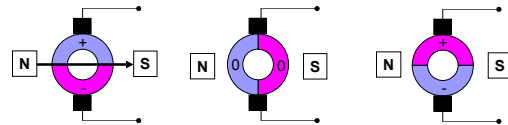
Promjena smjera obrtanja vrši se promjenom redosleda faza.

Električne mašine

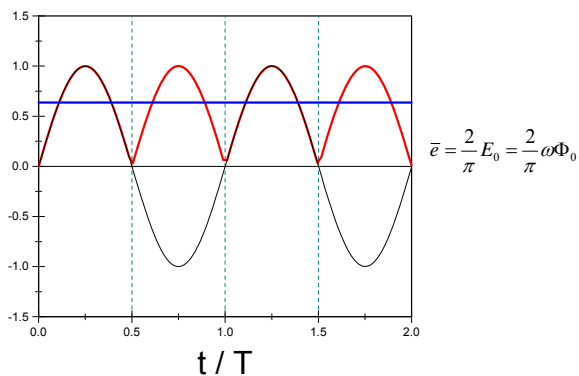
Mašine jednosmjerne struje

Mašine jednosmjerne struje

- Motori jednosmerne struje
- Generatori jednosmerne struje
- Ideja komutacije
 - naizmjeničnu ems (struju) indukovanu u namotajima generatora povezati sa kolom tako da bude jednosmerna



Komutacija



Konstrukcija mašina za JS

- Mehaničke komponente
 - Stator (nepokretni dio)
 - Rotor (pokretni dio)
 - Komutatorski sklop
 - kolektor (mehanički u vezi sa rotorom)
 - četkice (mehanički u vezi sa statorom)

Konstrukcija mašina za JS

Električno

Induktor

- namotaj koji predstavlja stacionarni elektromagnet

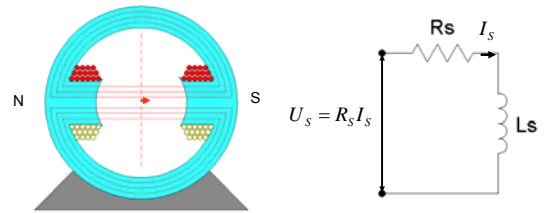
Indukt

- pokretni namotaj u kome se indukuje ems

Konstrukcija mašina za JS

Induktor

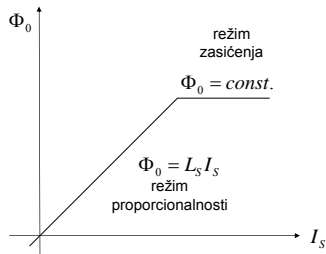
- elektromagnet jednosmjerne struje
- polovi
- neutralna linija
- u električnom smislu, kalem kroz koji protiče JS



Konstrukcija mašina za JS

Zavisnost Φ_0 od struje induktora

- zavisnost indukcije magnetskog polja elektromagneta od pobudne struje
- histerezisna zavisnost

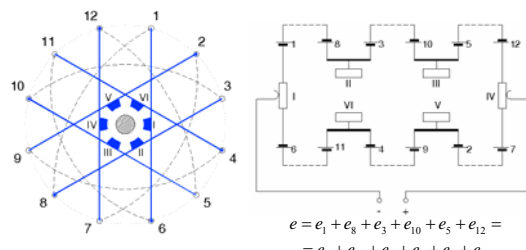


Konstrukcija mašina za JS

Indukt

- N namotaja
- brzina obrtanja n
- vezivanje

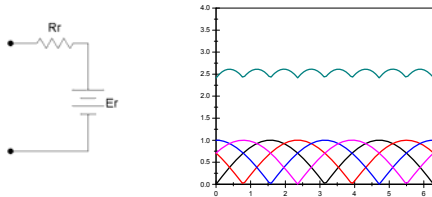
$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$$



Konstrukcija mašina za JS

Indukt

- u električnom smislu, indukt je izvor električne struje



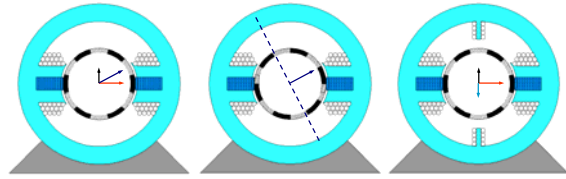
$$E_r = N \frac{\bar{e}}{2} = N \frac{1}{\pi} E_0 = N \frac{1}{\pi} \omega \Phi_0 = 2Nn\Phi_0$$

$$E_r = k_E n \Phi_0$$

Konstrukcija mašina JS

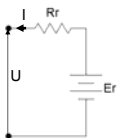
Reakcija indukta

- zbog indukovane struje, i indukt stvara svoje magnetsko polje
- to dovodi do varničenja na četkicama
- uvođenje kompenzacionog namotaja u statoru
- kontakt dvije sekcije sa četkicama dovodi do varničenja zbog promjene smjera struje



polovi komutacije

Generator JS



$$U + R_r I = E_r \quad U < E_r \quad P_{el} = UI \approx -EI < 0$$

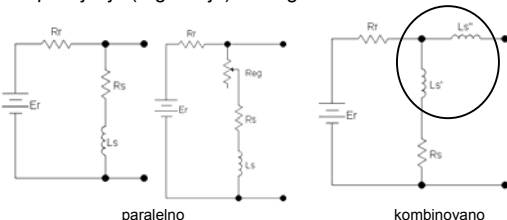
Električna snaga je manja od uložene mehaničke

- Džulov efekat u namotaju indukta
- Džulov efekat indukovanih struja u gvožđu rotora
- histerezis gvožđa rotora
- trenja
- neophodno trošenje energije na pokretanje ventilacije
- KKD od 0,85 kod malih do 0,95 kod velikih mašina

Generator JS

Pobuđivanje

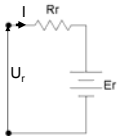
- napajanje namotaja statora
 - spoljašnje
 - paralelno
 - kombinovano
- upravljanje (regulacija) EMS generatora



paralelno

kombinovano

Električni motor JS



$$U_r > E_r \quad U_r - R_r I_r = E_r \quad P_{el} = UI \approx EI > 0$$

$$P_{rot} = E_r I_r = k_E n \Phi_0 I_r$$

$$E_r < U \Rightarrow P_{mech} = P_{rot} < P_{el} \Rightarrow \eta = \frac{P_{mech}}{P_{el}} = \frac{E_r}{U}$$

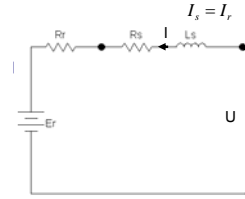
- KKD se umanjuje iz istih razloga kao kada se mašina koristi kao generator
- KKD od 0,85 do 0,95

$$P_{mech} = M\omega = 2\pi M n \rightarrow M = \frac{k_E}{2\pi} \Phi_0 I_r \rightarrow \text{indukt} \quad \boxed{M = k_M \Phi_0 I_r}$$

$$P_{rot} = k_E n \Phi_0 I_r$$

induktor
 $\Phi_0 = L_s I_s$

Električni motor JS



$$M = k_M L_s I^2$$

$$E + (R_r + R_s)I = U$$

$$k_E n L_s I + (R_r + R_s)I = U$$

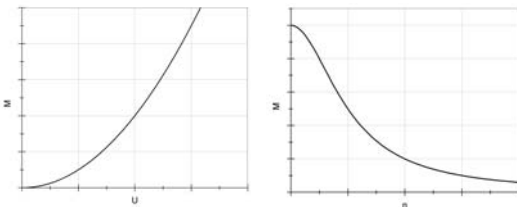
$$I = \frac{U}{R_r + R_s + k_E n L_s}$$

$$M = k_M L_s \frac{U^2}{(R_r + R_s + k_E L_s n)^2}$$

- bez opterećenja $M=0 \Rightarrow n \rightarrow \infty$
- sa opterećenjem, brzina se brzo smanjuje

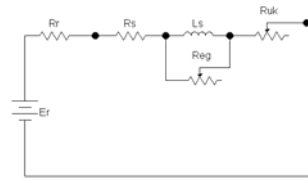
Električni motor JS

- Redna pobuda
- Zavisnost momenta motora od napona i broja obrtaja

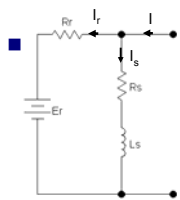


Električni motor JS

- Regulacija brzine kod redne pobude
 - uključni reostat, upravljanje induktom
 - regulacioni reostat, upravljanje induktorom
 - možemo da upravljamo brzinom



Električni motor JS



$$I = I_s + I_r \quad I_s = \frac{U}{R_s} = \text{const.} \Rightarrow \Phi_0 = \text{const.}$$

$$I_r = \frac{U - E}{R_r} = \frac{U - k_E n \Phi_0}{R_r}$$

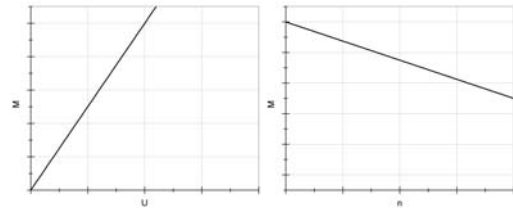
$$R_r I_r \ll E \Rightarrow U \approx E \Rightarrow n \approx \frac{U}{k_E \Phi_0} = \text{const.}$$

$$M = k_M \Phi_0 I_r = k_M \Phi_0 \frac{U - k_E \Phi_0 \cdot n}{R_r}$$

- Motori sa paralelnom pobudom imaju približno konstantnu brzinu rada pri konstantnom naponu napajanja (povećanjem momenta raste struja i snaga motora)
- Pogodni za režime rada sa konstantnom brzinom rada (mašine alatke)

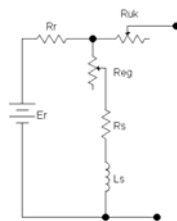
Električni motor JS

- Paralelna pobuda
- Zavisnost momenta motora od napona i broja obrtaja



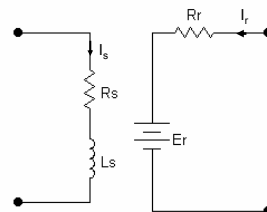
Električni motori JS

- Upravljanje kod paralelne pobude
 - uključni reostat
 - regulacioni reostat



Električni motor JS

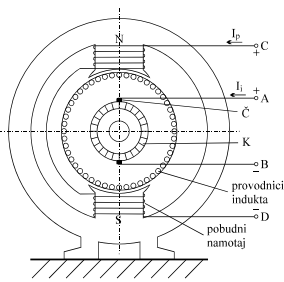
- Nezavisna pobuda
 - kolo indukta i kolo induktora su potpuno nezavisni



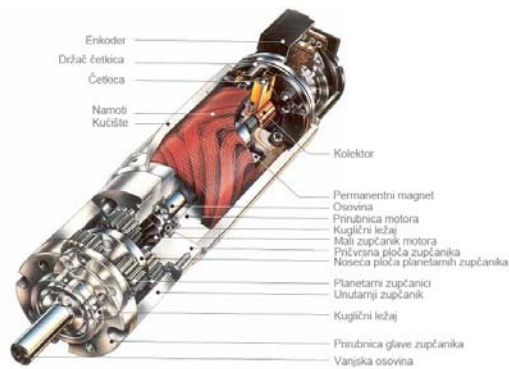
$$I_s = \frac{U_s}{R_s}$$

$$I_r = \frac{U_r - E}{R_r} = \frac{U_r - k_E n \Phi_0}{R_r}$$

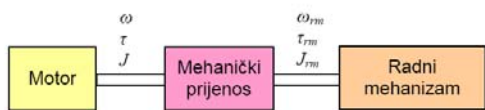
Mašine jednosmjerne struje



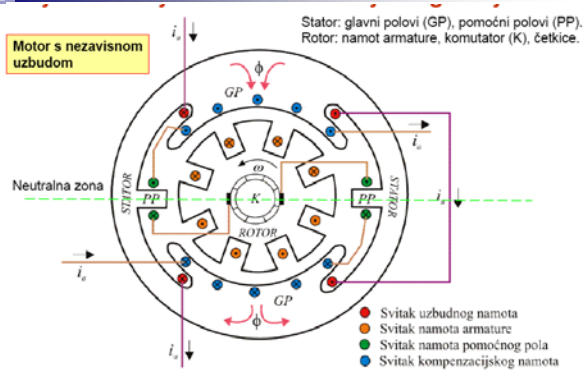
Generatori jednosmjerne struje (dinamo mašine) su najstarije električne mašine. Prva je izrađena još 1870.god. 1873. god. utvrđeno je da je dinamo mašina reverzibilna, tj. da može da radi ne samo kao generator već i kao motor. Pojavom asinhronog motora ove mašine postaju manje aktuelne, međutim, motor jednosmjerne struje ima izvanredne osobine u pogledu regulisanja brzine obrtanja, elastičnosti rada i mogućnosti postizanja velikog početnog momenta.



Presjek istosmjernog motora s permanentnim magnetima

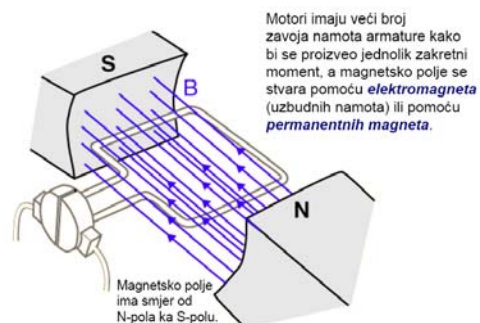
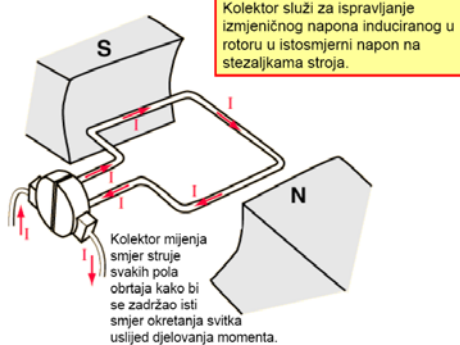
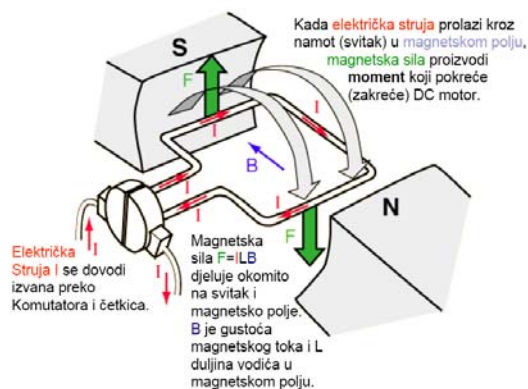


Povezivanje motora i radnog mehanizma preko mehaničkog prijenosa

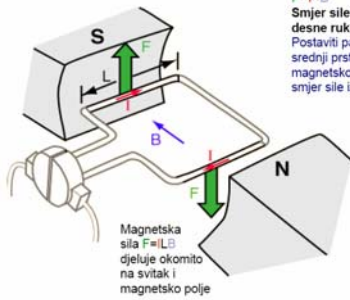


Elementi jednosmjerne mašine

- Jednosmjerna mašina se sastoji od statora (nepokretni dio) na kojem su smješteni glavni polovi (GP) namijenjeni za stvaranje glavnog magnetskog fluksa (Φ), te rotora (pokretni dio) u čijim se utorima nalaze namotaji rotora (armature) spojeni s komutatorom (kolektor).
- Kolektor služi za ispravljanje naizmjeničnog napona indukovanog u rotoru u jednosmjerni napon na stezaljkama mašine
- Osim glavnih polova na statoru se nalaze i pomoćni polovi (PP), koji su smješteni između glavnih polova.
- Namotaj pomoćnih polova spojen je u red s namotajem armature, a služi za poboljšanje komutacije u mašini.



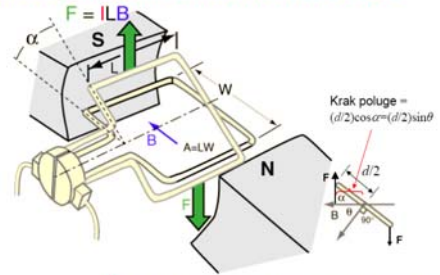
Magnetska sila u istosmjernom stroju



Lorenz-ov zakon sile:
 $F = I \times B$
 Smjer sile se određuje pravilom desne ruke:
 Postaviti palac u smjeru struje, srednji prst u smjeru djelovanja magnetskog polja (indukcije), tada smjer sile izlazi iz diana.

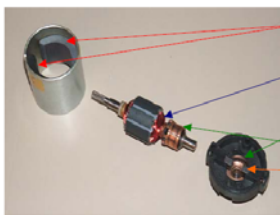
Magnetska sila $F = ILB$ djeluje okomito na svitak i magnetsko polje

Magnetski moment u istosmjernom stroju



Budući da magnetska sila djeluje na krak poluge koji se mijenja po sinusnom zakonu, i zakretni moment se mijenja po istom zakonu.

Istosmjerni motori s četkicama (DC brush motors)



- **Stator** u kućištu
 - > permanentni magneti.
- **Rotor** na osovini
 - > željezna jezgra sa bakrenim namotima.
- **Kolektor** (komutator)
 - > bakrene lamele na kraju osovine,
 - > ugljene četkice na narajevima kućišta.

Elektromagneti N-S, koji se nalaze na statoru, i nazivaju **induktor**, proizvode jednosmjerno magnetno polje indukcije B. Čelični polovi pričvršćeni su na gvozdeni jaram statora.

Indukt, ili rotor, je gvozdeni doboš, u čijim žljebovima su smješteni namotaji. Krajevi namotaja vezani su na **kolektor** K. Na dirkama ili četkicama Č, pri obrtanju rotora generatora, dobijamo uvijek isti polaritet jednosmjerne ems-e.

Prema tome, jednosmjerna mašina se sastoji iz tri osnovna dijela: induktora, indukta i kolektora.

Elektromotorna sila u induktu mašine

Trenutna vrijednost magnetnog fluksa u navojku, data je poznatim skalarnim proizvodom:

$$\Phi(t) = B \cdot S = BS \cos \omega t = \Phi_m \cos \omega t$$

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} = 2\pi f$$

Ems-a u jednom navojku ima vrijednost:

$$e(t) = - \frac{d\Phi}{dt} = \Phi_m \omega \sin \omega t = 2\pi \frac{n}{60} \Phi_m \sin \omega t = E_m \sin \omega t$$

Kao što se vidi, ova ems-a je naizmjenična, sinusna funkcija vremena. Međutim, pomoću kolektora i četkica, dobijamo jednosmjernu ems-u, više ili manje talasastu, ali uvijek istog smjera. Vrijednost ems-e na dirkama izražava se preko srednje vrijednosti, koja postoji tokom jedne poluperiode. Poznato je, da se srednja vrijednost za naizmjeničnu struju određuje samo za jednu poluperiodu te je:

$$E = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} E_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} E_m$$

Prema tome, srednja vrijednost ems-e po navojku je:

$$E = \frac{2}{\pi} \frac{2\pi}{60} n \cdot \Phi_m$$

Ems-a po jednom provodniku je duplo manja

$$\frac{1}{2} E = 2 \frac{n}{60} \Phi_m = E_{po \text{ provodnika}}$$

Ako je mašina dvopolna, onda, od ukupnog broja N provodnika indukta, po N/2 je vezano na red u jednu granu, a obje grane su preko dirki paralelno vezane. Tako, ako je na dirkama struja I, tada kroz svaku granu teče I/2. Srednja vrijednost ems-e za jednu granu od N/2 provodnika je:

$$E = N \frac{n}{60} \Phi_m$$

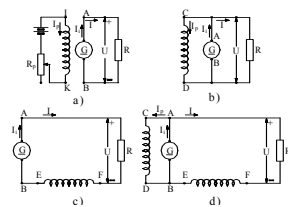
U opštem slučaju, mašina može imati **p** pari polova i **a** paralelnih grana, tada je opšti izraz za ems-u:

$$E = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi_m = k_e \cdot \Phi \cdot n$$

Ems-a mašine je srazmjerna jačini magnetnog fluksa po polu Φ , broju obrtaja rotora n, te zavisi od konstrukcije motora, u prvom redu od načina motanja indukta i povezivanja namotaja indukta, što je sadržano u konstrukcionoj konstanti k_e .

Pobuda mašina jednosmjerne struje

Razmatramo prvo mašinu kao generator. Induktor može da proizvodi fluks na razne načine. Stare mašine imale su stalne magnete, danas se tako izrađuju samo manje magnetomašine. Kako ovaj fluks pobuđuje ems-u u induktu, stvaranje fluksa naziva se magnetna pobuda mašine; otuda nazivi **pobudni namotaj** i **pobudna struja**. Zavisno odakle se uzima pobudna struja, imamo stranu, ili nezavisnu pobudu i sopstvenu pobudu generatora. Kod sopstvene pobude, induktor se veže na indukt: paralelno (otočno), redno (serijski), ili na oba načina - složena pobuda. Sopstvena pobuda je moguća samo ako postoji izvjesni remanentni magnetizam, što je uvijek slučaj kod mašina sa gvozdanim polovima.



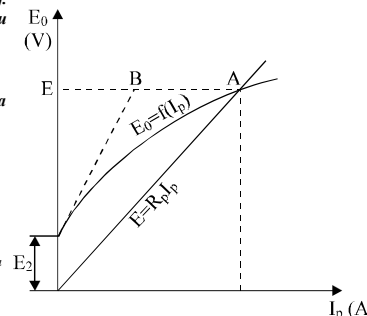
Oznake krajeva namotaja su standardizovane i moramo ih poštovati:
 A-B - krajevi rotora (indukta)
 C-D - krajevi pobudnog paralelno vezanog namotaja
 E-F - krajevi pobudnog redno vezanog namotaja
 G-H - krajevi pomoćnih polova (koji se ugrađuju kod većih mašina u cilju poništavanja reakcije rotora, pri čemu se kroz ove namotaje propušta struja indukta I_a).
 I-K - krajevi nezavisnog pobudnog namotaja generatora.

Naglasimo da se prva slova u parovima oznaka odnose na "+" pol, a druga slova na "-" pol.

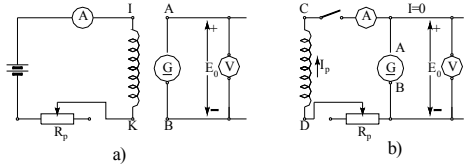
$$E_0 = f(I_p)$$

$$E_0 = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi = k_e \Phi n$$

Karakteristika praznog hoda je u stvari karakteristika magnetčenja indukta $B=f(H)$, jer je srazmjerna sa fluksom, tj. magnetnim poljem indukcije B u međugvožđu: a pobudna struja je srazmjerna sa magnetnim poljem H . Ova karakteristika data je na sl.8.24, a određuje se eksperimentalno na osnovu mjerenja prema sl. 8.25



Slika 8.24 Karakteristika praznog hoda

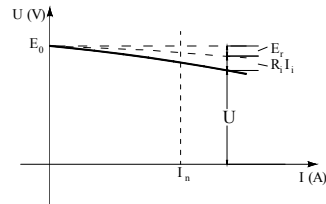


Slika 8.25 Mjerenje karakteristike praznog hoda generatora a) sa nezavisnom, b) sa paralelnom pobudom

karakteristika opterećenja $U=f(I)$ - spoljna karakteristika.

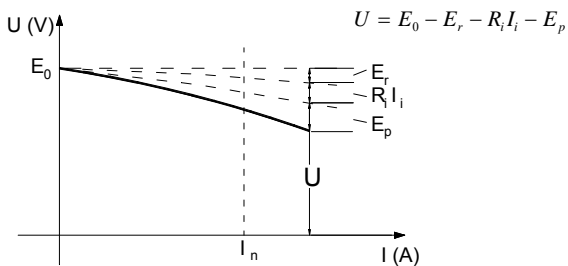
Kada je generator sa nezavisnom pobudom opterećen, tj. kada kroz rotor teče struja, i ona stvara svoj magnetni fluks, koji je poprečan u odnosu na fluks induktora (polova). Pošto mašina radi blizu magnetnog zasićenja, rezultantni magnetni fluks u induktu se smanjuje. Ovaj uticaj se naziva **reakcija rotora** (ili reakcija armature) E_r , te, prema tome, napon opterećenog generatora je manji od ems-e u praznom hodu E_0 .

$$U = E_0 - E_r - R_i I_i$$

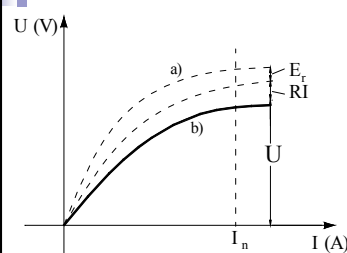


Spoljna karakteristika generatora sa nezavisnom pobudom

Kod generatora sa paralelnom pobudom napon opada još i zbog toga što, zbog pada napona na krajevima indukta, opadne i pobudna struja I_p , a zbog toga napon na krajevima indukta još više opadne; za vrijednost E_p



Spoljna karakteristika paralelnog generatora

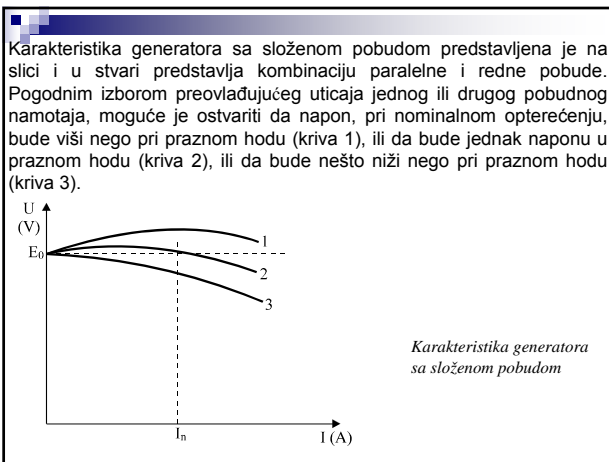


Spoljna karakteristika rednog generatora

Kod generatora sa rednom pobudom, napon postepeno raste, jer postepeno raste i pobudna struja, koja je u ovom slučaju jednaka struji indukta

$$I_p = I_i = I$$

Kriva (a) na slici predstavlja promjenu napona kod neopterećene mašine. Pri opterećenju, napon (kriva b) se smanjuje, zbog uticaja reakcije indukta - E_r i pada napona u kolu RI.



Osnovne jednačine motora jednosmjerne struje

Mašina jednosmjerne struje, kada se koristi kao motor, samo se u nekim tehničkim detaljima razlikuje od mašine koja se koristi kao generator.

Razlike u ponašanju mašine kao generatora i mašine kao motora, najbolje ćemo uočiti posmatranjem ems-e i struje u induktu, i elektromagnetne sile koja djeluje na namotaje rotora. Uzmimo da je smjer struje u provodnicima rotora u oba slučaja, dakle, i kod motora i kod generatora, isti

Osnovne jednačine motora jednosmjerne struje

$U = E - R_i I_i$

uz zanemarenje E_a i E_p

$U = E + R_i I_i$

$$\vec{F} = I_i (\vec{l} \times \vec{B})$$

$$I_i = \frac{U - E}{R_i}$$

$(R_i < 1 \Omega)$

$$E = K_e \cdot \Phi \cdot n$$

$$M = K_m \Phi \cdot I_i$$

$$n = \frac{U - R_i \cdot I_i}{K_e \Phi}$$

Jednačina momenta motora

- Na svaki provodnik indukta, kojim teče struja, djeluje sila:

$$\vec{F} = I_i (\vec{l} \times \vec{B}) \longrightarrow F = I_i l B$$

- Struja je ista kroz sve provodnike; B se mijenja po obimu. Uzmimo B neku srednju indukciju radijalnog polja, po obima indukta srednjeg poluprečnika r, po čijim se izvodnicima nalazi N provodnika u žljebovima. Elektromagnetni moment motora tada je:

$$M_m = N \cdot F \cdot r = N \cdot I \cdot l \cdot B \cdot r$$

Uobičajeno je, da se moment motora izražava, ne preko struje kroz provodnik l , već preko ukupne struje indukta:

$$I_i = I \cdot 2a$$

i da se koristi, ne magnetna indukcija, već srednja vrijednost fluksa po polu mašine:

$$\Phi = BS_p = B \cdot \frac{2\pi \cdot r \cdot l}{2p}$$

gdje je: p - broj pari polova
 l - dužina provodnika u induktu.

Sada je izraz za moment motora:

$$M_m = N \cdot \frac{I_i}{2a} l \cdot r \cdot \frac{\Phi \cdot 2p}{2\pi \cdot r \cdot l} = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi} \cdot I_i \Phi$$

$$M = K_m \Phi \cdot I_i$$

Jednačina broja obrtaja motora

Iz jednačine napona motora jednosmjerne struje:

$$U = E + R_i I_i$$

možemo naći brzinu, imajući u vidu da je:

$$E = \frac{p}{a} \cdot N \cdot \frac{n}{60} \cdot \Phi$$

$$E = n \cdot \frac{p}{a} \cdot \frac{N\Phi}{60} = U - R_i \cdot I_i$$

$$n = \frac{U - R_i \cdot I_i}{\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} \Phi} = \frac{U - R_i \cdot I_i}{K_e \Phi}$$

Kako je napon napajanja U konstantan, a promjena pada napona mala, vidimo da n zavisi uglavnom od fluksa Φ .

Fluks je moguće, relativno jednostavno, mijenjati, pa je lako mijenjati i brzinu n . U ovome je praktični značaj motora jednosmjerne struje.

8.3.4 Osobine rada motora jednosmjerne struje

Osobine rada motora se procjenjuju na osnovu karakteristika:

$$M = f_1(I_i), \quad n = f_2(I_i), \quad M = f_3(n).$$

Analiza rada motora vrši se na bazi tri osnovne jednačine motora:

$$I_i = \frac{U - E}{R_i} \tag{8.68}$$

$$M_m = K_m \Phi \cdot I_i \tag{8.69}$$

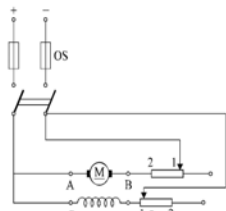
$$n = \frac{U - R_i \cdot I_i}{K_e \Phi} \tag{8.70}$$

Motor sa otočnom pobudom

Imajmo u vidu da je indukovana kems-a u induktu:

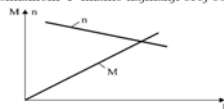
$$E = k_e \cdot \Phi \cdot n \quad (8.71)$$

Pri puštanju motora u rad $n=0$, pa je indukovana kontraelektromotorna sila u namotajima $E = 0$. To znači da je, u trenutku polaska, struja indukta ograničena samo sa (malom) otpornošću indukta, tj. $I_{\text{pot}} = U/R_i$. Zato se, na red sa induktom, vezuje otpornik za puštanje R_p , takav, da struja indukta I_i ne bude veća od $1,5 \cdot I_n$. Sa povećanjem brzine, vrijednost otpora R_p treba smanjivati. Kada rotor postigne nominalnu brzinu, $n=n_n$, R_p se isključuje.



Slika 8.31 Šema veza motora sa otočnom pobudom

Pri puštanju u rad R_p je isključen da bi se dobio veći Φ i time veći moment pri polasku. Za vrijeme rada motora, $U = \text{const.}$ kao i Φ , te je M_n linearno srazmjeran struji opterećenja. Prema (8.70), brzina se mijenja promjenom fluksa, odnosno promjenom vrijednosti R_p , u pobudnom kolu (sl.8.31). Pri maksimalnom Φ imamo najmanji broj obrtaja koji se zove osnovni.



Slika 8.32 Zavisnost brzine i momenta od opterećenja

Pri nominalnom radu $U = \text{const.}$, $\Phi = \text{const.}$, pa se brzina n malo mijenja sa promjenom opterećenja I_i . Stoga se ovaj motor naziva motor sa stalnom brzinom. Kada otporni moment opterećenja poraste, magnetni moment motora ga ne može slijediti; brzina rotora n opada, kems-a E opada, pa struja rotora I_r raste, moment motora M_n raste, dok se ponovo ne uspostavi ravnoteža sa otpornim momentom $M_o = M_n$. Dakle, motor se sam podešava prema opterećenju.

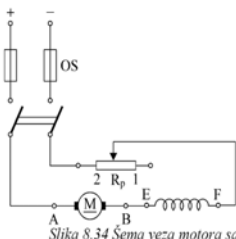
Iz jednačine (8.69) i (8.70), možemo dobiti mehaničku karakteristiku, $M_n = f(n)$, koja je data na sl.8.33.



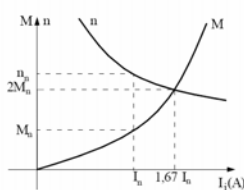
Slika 8.33 Mehanička karakteristika otočnih motora

Motor sa rednom pobudom

Šematski prikaz ovog motora dat je na sl.8.34. R_p štiti motor od prevelike struje pri polasku. Kod ovog motora pobudna struja, struja indukta i struja opterećenja je jedna te ista: $I_p = I_i = I$



Slika 8.34 Šema veza motora sa rednom pobudom



Slika 8.35 Karakteristike motora sa rednom pobudom

Smatraćemo da magnetno kolo motora nije u magnetnom zasićenju, pa uzimamo da je fluks $\Phi = kI$, pa je:

$$M_n = K_m K \cdot I^2 = k' I^2 \quad (8.72)$$

Pogodnost rednog motora je u tome što mu moment raste sa kvadratom struje. Stoga se ove mašine i koriste kao snažni motori, koji treba da razviju veliki moment, jer će ga oni razviti, pri manjim strujama nego otočni, tj. sa manjim opterećenjem mreže.

Zavisnost brzine obrtanja nalazimo iz izraza:

$$n = \frac{U - R_i I_i}{k_e \Phi} = \frac{U - R_i I_i}{k_e K I_i} = \frac{U}{K' I_i} - \frac{R_i}{K'} \quad (8.73)$$

Uočavamo da je brzina hiperbolička funkcija struje I , sl.8.35.

Mehanička karakteristika

Da bismo vidjeli kakva je zavisnost brzine od momenta, podimo od izraza za struju:

$$I_f = I = \frac{U - n \cdot k_f \cdot \Phi}{R}$$

odakle je brzina:

$$n = \frac{U}{k_f \Phi} - \frac{R \cdot I}{k_f \Phi} = \frac{U}{K' \Phi} - \frac{R}{K' \Phi} \cdot I$$

Izraz za struju možemo napisati u obliku:

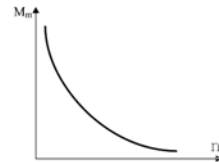
$$I = \frac{U}{K' \left(n + \frac{R}{K'} \right)} = \frac{U}{K' n + R}$$

pa je izraz za moment:

$$M_m = k_m \Phi I = K_m^- I^2 = K_m^- \frac{U^2}{(K' n + R)^2} \quad (8.74)$$

M_m - opada sa kvadratom brzine.

Kada se otporni moment (opterećenje) smanjuje, brzina motora se povećava (sl.8.36). Ako se moment mnogo smanji, zbog vrlo velike brzine, motor može da se razleti. Zato se motor direktno vezuje sa osovinom opterećenja, a ne preko kaišnika.



Slika 8.36 Mehanička karakteristika rednog motora

Redni motor se koristi u vuči (tramvaji, trolejbusi, lokomotive) i za dizalice, baš zbog velikog početnog momenta.

8.3.5 Regulacija brzine obrtanja motora jednosmjerne struje

Promjena smjera obrtanja

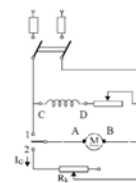
Iz vektorskog izraza za silu koja djeluje na provodnik indukta $\vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B})$, očigledno je da se promjena smjera obrtanja rotora, može postići promjenom smjera struje kroz indukt (tada se mijenja smjer vektora \vec{l}) ili kroz induktor (tada se mijenja smjer vektora \vec{B}). Pri ovome, treba voditi računa o vezama između indukta i induktora.

Kočenje

Često je potrebno, naročito kod motora za vozila, da se vrši kočenje motora. Ovo se može vršiti: mehanički (za male motore) i električno. Postoje dvije osnovne vrste električnog kočenja: dinamičko, ili reostatsko i regenerativno.

Dinamičko ili reostatsko kočenje

Kod ovog kočenja, kolo indukta se prekine od linije napajanja na jednom kraju i taj kraj se poveže sa otpornikom R_k (sl.8.37).



Slika 8.37 Dinamičko ili reostatsko kočenje

Kada je prekidač u položaju 1 (sl.8.37), mašina radi kao motor. Kada se prekidač prebaci u položaj 2, mašina nastavi da se obrće usljed inercije, postaje generator, koji napaja promjenljiv otpornik R_k . Jasno, da bi mašina bila generator, pobuda mora ostati povezana na mrežu, inače ne bi bilo kočenja. Kočenje je intenzivnije, što je veća struja I_a , dakle, pri većem obrtnju usljed inercije. Usporavanjem mašine, opada I_a , pa i efikasnost kočenja. Zaustavljanje mašine vrši se trenjem mehaničkom kočnicom.

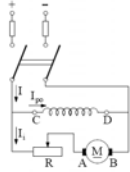
Podešavanje (regulacija) brzine

Iz jednačine broja obrtaja motora jednosmjerne struje

$$n = \frac{U - R_a I_a}{K \Phi}$$

vidi se da se brzina može podešavati djelujući na struju indukta I_a , na magnetni fluks Φ (tj. mijenjanjem pobudne struje I_p) i na napon napajanja U . Sve ove veličine mogu se kontinualno i dovoljno mijenjati, što znači da su motori jednosmjerne struje veoma pogodni za promjenu brzine. Kako ovu osobinu motori naizmjenične struje nemaju, motori jednosmjerne struje, u slučajevima kada je potrebna regulacija brzine, su pogodniji, i pored nekih svojih nedostataka.

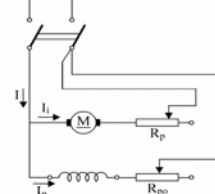
Reostatsko podešavanje brzine (sl.8.38)



Slika 8.38 Reostatska regulacija brzine

Promjena brzine promjenom pobude (sl.8.39)

Ovom metodom moguće je samo povećati broj obrtaja. Najmanji n je kada je R_{po} isključen, jer je tada pobudna struja (i fluks) maksimalna.



Slika 8.39 Regulacija brzine promjenom pobude

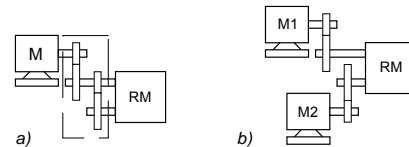
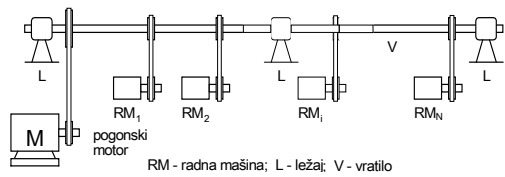
Elektromotorni pogoni

Opšte o elektromotornim pogonima

Elektromotornim pogonom nazivamo skup funkcionalno vezanih elemenata, koji se sastoji od: elektromotora, radne mašine, mehanizma za prenos snage između elektromotora i radne mašine, i uređaja za napajanje i upravljanje, koji čine jedinstvenu tehničko-tehnološku cjelinu.

Pri projektovanju elektromotornog pogona, u većini slučajeva, elektromotor određene snage, ili gabarita, bira se iz niza tipskih motora koje fabrike proizvode. Postoje tipski motori za pojedine djelatnosti, npr., valjaonički motori, dizalički motori, motori za tekstilne mašine i sl. Rijetko kada se projektuju specijalni motori za neku radnu mašinu. Da bismo mogli izvršiti pravilan izbor elektromotora, potrebno je da se upoznamo sa osnovnim svojstvima elektromotornih pogona.

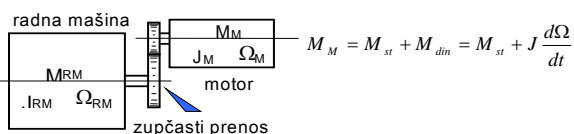
Sve elektromotorne pogone moguće je klasifikovati u: grupne, pojedinačne i višemotorne pogone.



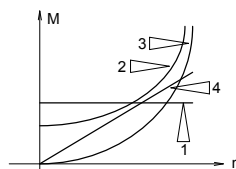
Osnovi dinamike elektromotornog pogona

Osnovne veličine koje karakterišu radnu mašinu su njen otporni moment i moment inercije.

Otporni moment se uvijek sastoji od dvije komponente -statičkog M_{st} i dinamičkog M_{din} momenta. Prva komponenta je posljedica otpora koji se javljaju pri obavljanju rada radnog mehanizma (otpori trenja svih vrsta, otpor rezanja, otpor koji pruža teret pri podizanju, itd.), a druga je posljedica ubrzavanja pojedinih pokretnih dijelova elektromotornog pogona. Da bi mogao da pokreće radnu mašinu, motor, dakle, treba da razvija moment:



Za izbor pogonskog motora važnu ulogu ima statička karakteristika $M=f(n)$ radne mašine. Razni radni mehanizmi mogu imati vrlo različite statičke karakteristike. Tipični oblici statičkih karakteristika raznih mehanizama prikazani su na slici



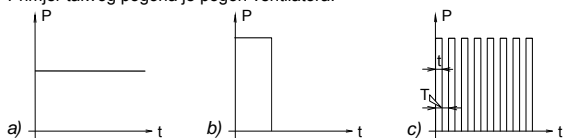
Karakteristika 1 odnosi se na radne mehanizme kod kojih otporni moment ne zavisi od brzine (npr. alatne mašine tipa struga). Karakteristika 2 je tipična za centrifugalne pumpe, kod kojih se otporni moment sastoji od komponente nezavisne od n i komponente proporcionalne sa n^2 . Karakteristika 3 je tipična za ventilatore i očigledno je nelinearna. Neki radni mehanizmi imaju karakteristiku pravca (karakteristika 4) i odražavaju linearnu zavisnost M od n .

Poželjno je da motor bude vezan sa radnim mehanizmom radne mašine neposredno, pomoću spojnice bez ikakvih zupčastih ili kaišnih prenosnika. Međutim, to često nije slučaj, jer radni mehanizmi obično zahtijevaju brzine obrtanja (50 - 300)min⁻¹, a izrada tako sporohodnih elektromotora nije ekonomična. Pokazuje se racionalnim da se niže brzine obrtanja dobijaju pomoću zupčastih ili kaišnih prenosila, uz korišćenje motora uobičajene izvedbe za brzine (750 - 3000)min⁻¹.

Osnovni režimi rada elektromotornih pogona

U elektromotornim pogonima definisano je osam karakterističnih režima rada. Tri osnovna režima rada elektromotornih pogona su: trajni (S1), kratkotrajni (S2) i intermitentni režim rada (S3).

Trajni režim rada karakteriše trajanje opterećenja toliko dugo da temperature svih dijelova elektromotora dostignu stacionarna stanja. Primjer takvog pogona je pogon ventilatora.



Pri kratkotrajno povratnom (intermitentnom) režimu (slika c) period rada i pauza se smjenjuju, pri čemu ni u jednom periodu rada temperatura motora ne dostigne stacionarno stanje. Primjer za ovakav režim rada može biti pogon automatskog struga koji, pri serijskoj proizvodnji, obavlja jednu operaciju. Karakteristična veličina za ovaj režim je $i=(t/T)$ i naziva se koeficijent intermitencije. Ovaj koeficijent se najčešće izražava u procentima $i=100(t/T)$ (%).

Izbor snage elektromotora

Nominalni podaci, dati na natpisnoj pločici elektromotora, odnose se na dati režim, na određenu vrijednost temperature ambijenta (okolne sredine), kao i nadmorsku visinu, za koju je predviđen motor. Uslovi u kojima treba da radi motor često odstupaju od nominalnih pa je potrebno date podatke preračunati na realne uslove.

Trenutno preopterećenje motora naziva se ono opterećenje, koje motor može savladati tokom vrlo kratkog intervala vremena, a da ne dođe do oštećenja na njemu. Kod asinhronih motora, to preopterećenje određeno je prevalnim momentom, a kod motora za JSS maksimalno dozvoljenom strujom, pri kojoj još nisu narušeni uslovi dobre komutacije (rad kolektorskog uređaja bez negativnih posljedica - pretjerano iskrenje i slično). Sposobnost preopterećenja definiše se koeficijentom preopterećenja λ_{pr} , odnosom kratkotrajnog dopuštenog momenta M_m i momenta M_n koji odgovara nominalnom opterećenju $\lambda_{pr} = M_m/M_n$. Za motore uobičajene konstrukcije $\lambda_{pr}=2$. U posebnim slučajevima, ova vrijednost može biti $\lambda_{pr}=3 - 4$.

Često je, zbog uslova rada motora, važna njegova sposobnost da podnese neko preopterećenje, ne trenutno već kratkotrajno. U vezi sa ovim, definiše se kratkotrajna snaga preopterećenja, tj. snaga koju motor može odavati na svojoj osovini, za neko ograničeno vrijeme (5, 10, 15, 30 min, itd.), poslije kojeg se motor mora isključiti, da bi se ohladio do temperature ambijenta.

Pravilan izbor elektromotora, prema snazi za konkretni pogon, mora obezbijediti ekonomičan, produktivan i pouzdan rad radne mašine. Izbor motora veće snage, nego što je neophodno za uslove pogona, izaziva suvišne gubitke energije, kao i veća ulaganja u motor, uz povećane gabarite motora i pogona kao cjeline. Izbor motora nedovoljne snage snižava produktivnost i pouzdanost, a sam motor je, u takvim uslovima, izložen opasnosti od prijevremenog otkaza.

Motor mora biti odabran tako da se njegova snaga što bolje koristi. Za vrijeme rada motor treba da se grije približno do dopuštene temperature, ali ne iznad nje. Pored toga, motor mora raditi normalno pri mogućim preopterećenjima, i mora razvijati polazni momenat dovoljan za pokretanje radnog mehanizma, sa kojim se mehanički spreže. U saglasnosti sa ovim, snaga motora se bira, u najvećem broju slučajeva, na osnovu kriterijuma zagrijavanja, a zatim se kontroliše u odnosu na uslove puštanja i preopterećivanja. Nekada, (pri zahtjevima za veća kratkotrajna preopterećenja) se prilazi izboru motora polazeći od zahtijevane maksimalne snage. U takvim slučajevima, snaga motora se nedovoljno koristi.

Najjednostavnije je odabrati motor za trajni režim rada, pri konstantnom ili malo promjenljivom opterećenju. U takvim slučajevima, nominalna snaga motora mora biti jednaka, ili veća, u odnosu na snagu opterećenja, te provjera motora na zagrijavanje i preopterećivanje nije nužna. Nužno je samo izvršiti provjeru tako izabranog motora u odnosu na potrebni polazni moment.

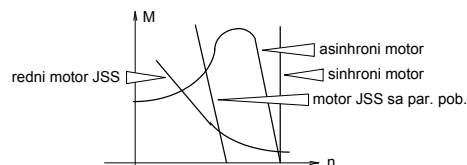
Ostali aspekti izbora elektromotora

Pri trajnom opterećenju, kad se zahtijeva stalna brzina obrtanja, zadatak izbora elektromotora je dosta jednostavan. U ovakvom slučaju, najbolje se opredijeliti za sinhroni motor. Ovaj motor, za ovakve uslove pogona, pokazuje se ekonomičnim.

Sinhroni motor nije bio predmet ovog kursa, pa je ovdje nužno iznijeti osnovna njegova svojstva. Ovaj motor predstavlja električnu mašinu sa induktorom, sličnom induktoru motora za JSS, kod kojeg se namotaj induktora napaja jednosmjernom strujom. Indukat ovog motora je sličan induktoru (statoru) trofaznog asinhronog motora i napaja se sistemom trofaznih simetričnih napona konstantne učestanosti f . Njegova brzina obrtanja jednaka je sinhronoj brzini, koja odgovara učestanosti napajanja, i nezavisna je od momenta opterećenja. Osnovni problem ovog tipa motora je puštanje u rad, jer je njegov polazni momenat, pri uobičajenoj konstrukciji, vrlo mali. Da bi se taj moment povećao, obično se, uz pobudni namotaj, na strani induktora postavlja kavez. Taj kavez omogućava asinhroni režim rada pri zalijetanju motora do sinhronne brzine. Drugi načine da se prevlada problem puštanja sinhronog motora je njegovo sprezanje sa motorom za JSS, koji u tom slučaju ima zadatak da rotor sinhronog motora dovede do sinhronne brzine.

Ako radna mašina zahtijeva da motor radi u uslovima regulisanja brzine obrtanja, sa puštanjima i isključenjima, ili sa promjenljivim opterećenjem, onda je pri izboru motora neophodno uporediti karakteristike raznih motora sa potrebnom karakteristikom radne mašine.

Treba razlikovati prirodne i vještačke karakteristike motora. Prirodne karakteristike odgovaraju nominalnim uslovima napajanja, nominalnoj sprezi motora i bez primjene bilo kakvih dodatnih elemenata (kao što su otpori u kolu rotora asinhronog motora sa namotanim rotorom, ili dodatni otpori u kolu indukta motora za JSS) u kolima motora. Vještačke karakteristike dobijaju se promjenom napona napajanja, ili dodavanjem elemenata u kolima motora, ili promjenom načina vezivanja u pojedinim kolima motora (npr. promjena broja pari polova, ili slično).



Kao važna veličina kojom se karakterišu mehaničke karakteristike elektromotora koristi se krutost (tvrdoća).

$$\alpha = \frac{\Delta M}{\Delta n}$$

Krutost može imati različite vrijednosti na različitim djelovima iste mehaničke karakteristike.

U zavisnosti od krutosti, usvojena je podjela mehaničkih karakteristika na: apsolutno krute ($\alpha = \infty$, sinhroni motor), krute ($\alpha = (10 - 40)\%$), asinhroni motor na linearnom dijelu karakteristike i motor za JSS sa paralelnom pobudom) i meke ($\alpha \leq 10\%$, vještačke karakteristike asinhronog motora i vještačke karakteristike motora za JSS sa rednom pobudom).

Zahitjevi u pogledu krutosti mehaničke karakteristike najčešće su presudni za opredjeljivanje za vrstu motora. Npr., za kranske pogone i pogone transportnih uređaja, poželjni su motori sa mekom karakteristikom, a za valjačke stanove za hladno valjanje, poželjni su motori sa apsolutno krutom karakteristikom.

Za česta puštanja u rad i promjenljiva opterećenja, kada se ne zahtijeva regulacija brzine obrtanja, najpouzdaniji i najjednostavniji, a ujedno i najjeftiniji, je asinhroni motor sa kaveznim rotorom. Motor sa namotanim rotorom je od njega skuplji i složeniji za održavanje, pa se primjenjuje kao alternativa ovom motoru, kada se zahtijeva regulisanje brzine obrtanja ili kad je potreban veliki polazni momenat.

Za regulisanje brzine obrtanja asinhronog motora u nedavnoj prošlosti su primjenjivana praktično samo dva metoda - regulisanje dodavanjem otpora u kolo rotora i regulisanje promjenom broja pari polova. Prvi metod je ekonomski opravdan samo kad se želi regulisati brzina obrtanja u ne širem intervalu od 20%, a drugi metod obezbjeđuje samo diskretnu (skokovitu) regulaciju i dosta se često primjenjuje kod mašina za obradu rezanjem (strug, glodalica, i sl.). Sada je situacija, u pogledu regulacije asinhronog motora, nešto drugačija. Naime, u posljednje vrijeme dosta je pala cijena poluprovodničkih pretvarača, pa se često srijeću pogoni sa asinhronim motorom sa kaveznim rotorom napajanim preko pretvarača učestanosti, koji omogućavaju praktično kontinualnu promjenu brzine obrtanja.

U mnogim slučajevima, srijeću se pogoni sa motorima za JSS, koji omogućavaju promjene brzine obrtanja u širokim granicama, pomoću relativno jednostavnih sredstava. Cijena ovakvih motora je znatno veća od cijene odgovarajućih asinhronih motora (naročito od motora sa kaveznim rotorom). Uz to, njihova pouzdanost je relativno mala, a njihov vijek trajanja kraći, nego vijek trajanja asinhronih motora. Ovi motori su nepogodniji od asinhronih motora kad se zahtijevaju česta puštanja i isključivanja i veće snage.

Elektromotori se razlikuju i u pogledu konstrukcione realizacije. U ovom smislu, izbor motora treba da odgovara uslovima u kojima treba da radi na mjestu ugradnje (otvoreni prostor, prisustvo vlage, prisustvo prašine, prisustvo zapaljivih smješa ili prisustvo eksplozivnih smješa u sredini, i slično). Svim ovim, i nekim drugim, uslovima odgovaraju pojedine konstrukcione specifičnosti koje treba uvažiti pri izboru.