

## Osnove elektromehaničke pretvorbe

### 1. Objasnite pojmove pretvorbe energije, transformacije energije, gubitaka energije, veznog polja i korisnosti na primjeru motora, generatora, transformatora i općenito električnog stroja.

Pretvorba energije je proces promjene energije iz jednog oblika u drugi, npr meh. u elek. ili obrnuto(motor/generator)

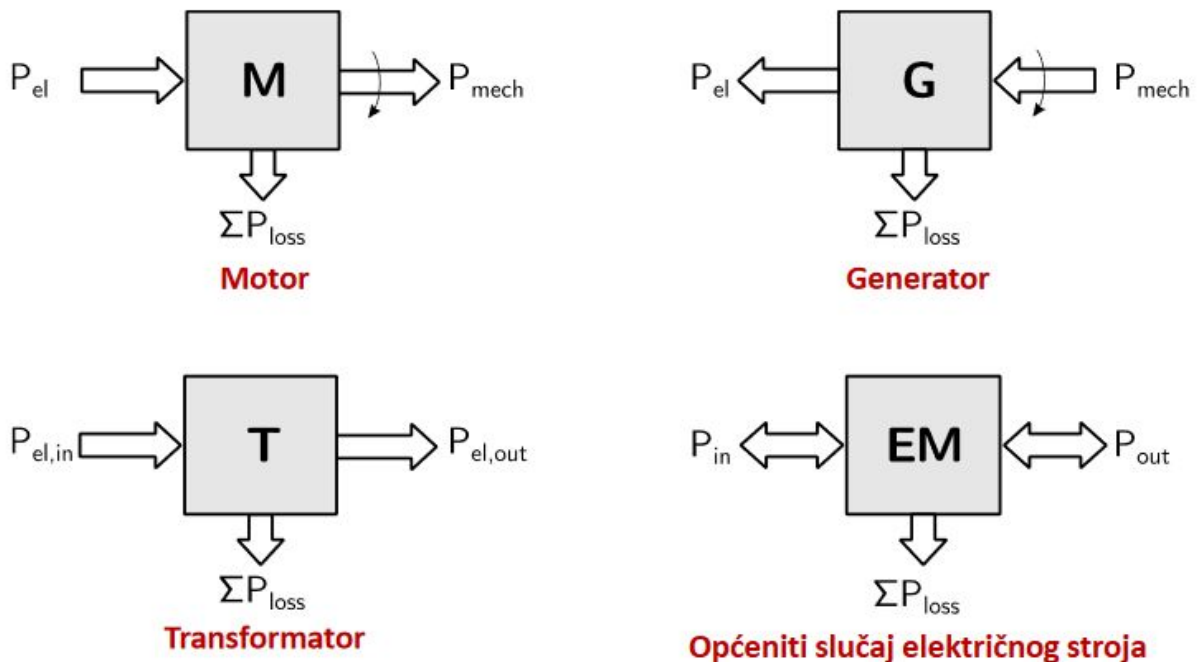
Transformacija energije je kada nam energija ostaje električna, no mijenja se naponska i strujna razina.(transformator)

Gubici energije su iznosi energije koji u procesu nisu korisni, tj kod el. strojeva je to uvijek toplinska energija.

Veznim poljem nazivamo prijenos električne energije jednog kruga na drugi, posredstvom magnetskog polja, tj u motorima ili generatorima, vezno polje je magnetsko polje.

Korisnost el. strojeva je omjer korisne snage(izlazne) i potrošene(ulazne) snage

### 2. Definirajte blok shemom proces pretvorbe energije u električnom stroju iz električne do mehaničke i obratno. Posredstvom koje pojave (vezno polje) se odvija pretvorba energije? U kojim dijelovima stroja i na koje sve načine nastaju toplinski gubici?



Pretvorba energije se u el. strojevima odvija posredstvom magnetskog polja.

Toplinski gubici nastaju u svitcima zbog otpora vodiča, ležajevima zbog trenja, feromagnetskim materijalima zbog gubitaka histereze.

**3. Definirajte korisnost električnih strojeva. Zašto su gubici u električnim strojevima nepoželjni? Kako korisnost općenito ovisi o veličini stroja?**

Korisnost el strojeva je omjer korisne i potrošene snage, tj izlazne i ulazne.

Nepoželjni su zbog energetske gubitaka (npr kapacitet baterije), financijskih razloga i toplinske energije koju treba odvoditi da ne dođe do uništenja.

Mali strojevi imaju manju korisnost (65-85%), a veći veću (cca 90), dok motori imaju manju nego transformatori.

**4. Nabrojite 3 osnovna fizikalna elektromagnetska principa na kojima se temelji elektromehanička pretvorba. Ukratko objasnite svakoga od njih. Koji su još fizikalni zakoni potrebni da se upotpuni fizikalna slika elektromehaničke pretvorbe? Nabrojite 3 osnovna principa djelovanja magnetskog polja u elektromehaničkoj pretvorbi.**

Amperov zakon-magnetsko polje nastaje kao posljedica gibanja električnih naboja, tj oko vodiča kojim teče struja se stvara magnetsko polje

Faradejev zakon-promjena magnetskog polja oko vodiča inducira napon u njemu.

Lorentzova sila-na vodič protjecan strujom, koji se guba u magnetskom polju djeluje sila

Osnovni mehanički principi, tj Newtonovi zakoni gibanja.  $P=M*\omega$

3 osnovna principa: vodič protjecan strujom stvara magnetsko polje; na vodič protjecan strujom, koji se nalazi u magnetskom polju djeluje sila; vremenski promjenjiv magnetsko polje kroz zatvorenu petlju (ili svitak) inducira napon u tom svitku

**5. Matematički definirajte, objasnite i slikom prikažite pojmove magnetskog toka i ulančenog magnetskog toka. Poslužite se primjerom svitka.**

Magnetski tok je fizikalna veličina koja se dobije skalarnim umnoškom gustoće magnetskog toka i površine plohe kroz koju prolazi.

Ulančani magnetski tok je ukupan magnetski tok obuhvaćen zavojnicom kojom teče struja, a jednak je umnošku broja zavoja i toka kroz pojedini zavoj.

- Tri su osnovne fizikalne veličine vezane za magnetsko polje:

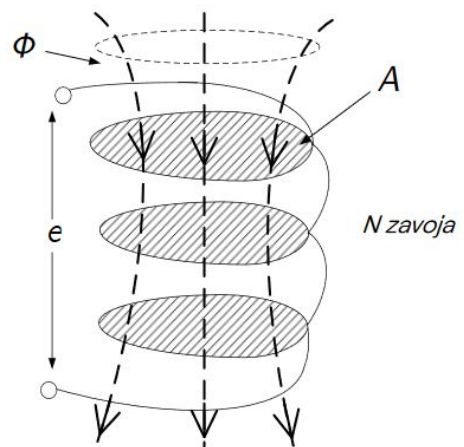
- gustoća magnetskog toka  $B$  [Wb/m<sup>2</sup> or T]
- magnetski tok  $\Phi$  [Wb or Vs]
- ulančeni magnetski tok  $\Psi$  [Wb or Vs]

- Magnetski tok definiran je površinskim integralom

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} d\mathbf{A}$$

- Ulančeni magnetski tok definira se kao:

$$\Psi = N\Phi$$



**6. Objasnite Ampereov zakon te na primjeru toroidalnog svitka objasnite vezu između polja B i polja H. Što je permeabilnost, kako se definira te koja je uloga permeabilnosti u osnovnim definicijama elektromagnetizma?**

Vodič protječan strujom stvara magnetsko polje u prostoru oko sebe.

Jakost magnetskog polja(H) je napor kojeg struja ulaže da bi proizvela magnetsko polje(B), a ono ovisi o materijalu kroz koji se polje zatvara. Odnosno gustoća magnetskog toka u jezgri toro. svitka je nastojanje struje da stvori magnetsko polje u njoj i relativne težine nastanka magnetskog polja u njoj( $\mu$ ).

ili

Broj silnica B u jezgri ovisi o polju H koje stvorimo i težini stvaranja polja u toj jezgri.

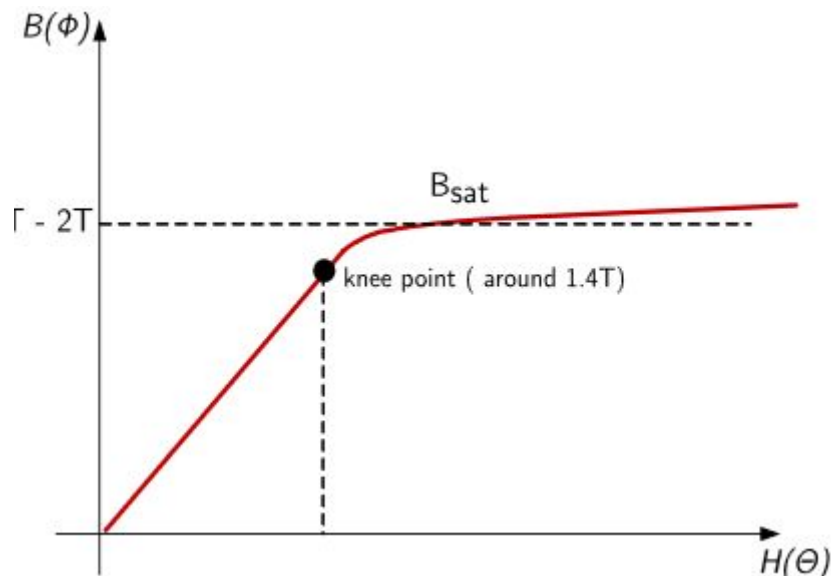
Permeabilnost je osobina materijala koja pokazuje intenzitet magnetizacije tjela kada je izloženo vanjskom magnetskom polju. ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H/m}$ -vakuum)

Permeabilnost nam pokazuje koliko se materijal bolje magnetizira od vakuuma, tako da biramo materijale koji imaju veliku permeabilnost kako bi se magnetski krug zatvarao kroz stroj, a ne zrak.

**7. Što je to krivulja magnetiziranja materijala (krivulja prvog magnetiziranja), nacrtajte tipičan izgled te krivulje te objasnite pojam zasićenja.**

Krivulja magnetiziranja nam pokazuje odnos magnetske indukcije B i magnetskog polja H

Krivulja prvog magnetiziranja je odnos  $B-H$ , ali za materijal koji nije bio podvrgnut mag polju i nema zaostale magnetiziranosti.



Nakon nekog iznosa magnetskog polja, nećemo dobivati povećanje magnetskog toka, i taj događaj se naziva zasićenjem.

**8. Objasnite pojam histereze feromagnetskih materijala, fenomen gubitaka histereze te pojmove remanencije i koercitivnosti. Koja je razlika između tvrdih i mekih magnetskih materijala?**

Histereza prikazuje proces magnetiziranja i demagnetiziranja feromagnetskog materijala za jedan električni ciklus.

Površina unutar histereze jednaka je gubitcima.

Nakon smanjenja polja  $H$  na nulu, ostat će neki iznos magnetske indukcije, taj iznos se naziva remanencija.

Koercitivna sila je jakost magnetskog polja potrebna za poništenje remanencije, a suprotnog je smjera od polja magnetiziranja.

Meki magnetski materijali imaju usku petlju histereze i lako se razmagnetiziraju, dok tvrdi magnetski materijali imaju veliku površinu histereze i teško ih je razmagnetizirati (permanentni magneti)

**9. Na primjeru toroidalne zavojnice izvedite Ohmov zakon za magnetski krug te izraz za induktivitet svitka.**

- Jednostavni svitak s  $N$  zavoja na toroidalnoj jezgri ima gustoću toka:

$$B = \mu H = \mu \frac{Ni}{l_{Fe}}$$

- Ukupni tok u jezgri:

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} d\mathbf{A}$$

- Ako su  $\mathbf{B}$  i  $d\mathbf{A}$  okomiti:

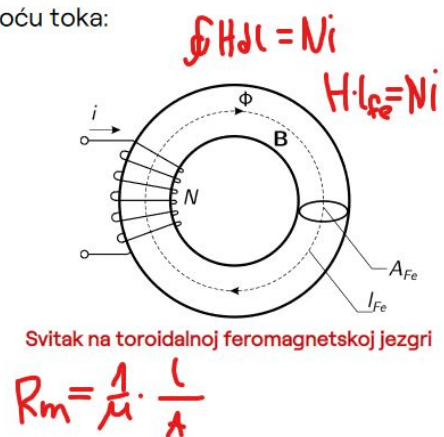
$$\Phi = BA_{Fe} = \frac{\mu Ni}{l_{Fe}} A_{Fe}$$

- ...a to je ustvari Ohmov zakon za magnetski krug:

$$\Phi = \frac{Ni}{\frac{l_{Fe}}{\mu A_{Fe}}} = \frac{\Theta}{R_m}$$

- Induktivitet** (samoinduktivitet) zavojnice računa se:

$$L = \frac{\Psi}{i} = \frac{N\Phi}{i} = \frac{N}{i} \frac{\Theta}{R_m} = \frac{N}{i} \frac{Ni}{R_m} = \frac{N^2}{R_m} = \frac{N^2}{l_{Fe}} \mu A_{Fe}$$

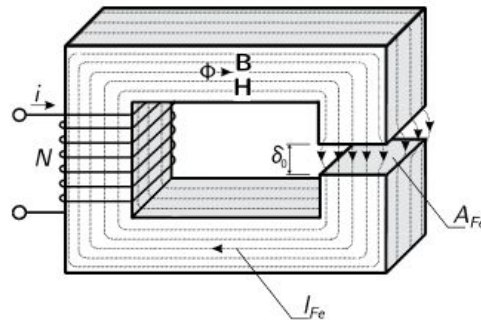


**10. Skicirajte zavojnicu s feromagnetskom jezgrom i zračnim rasporom napajanu iz izvora istosmjerne struje. Nacrtajte ekvivalentni električni i ekvivalentni magnetski krug. Objasnite odnos između jakosti magnetskog polja u zračnom rasporu i u jezgri te odnos između vrijednosti magnetske indukcije u zračnom rasporu i u jezgri.**

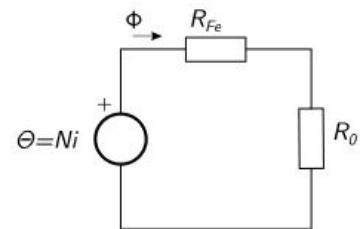
Jakost magnetskog polja u zračnom rasporu je puno veća od jakosti magnetskog polja u jezgri.

Magnetska indukcija je jednak u zračnom rasporu i u jezgri (kao struja u serijskom spoju).

$B = \mu_i H \rightarrow \mu_i$  željeza puno veći od  $\mu_i$  zraka



Feromagnetska jezgra sa zračnim rasporom



Ekvivalentni električni krug

- Magnetski otpori su:

$$R_{Fe} = \frac{l_{Fe}}{\mu A_{Fe}}; \quad R_0 = \frac{\delta_0}{\mu_0 A_0}$$

- Ukupni tok u jezgri:

$$\Phi = \frac{\Theta}{R_{eq}} = \frac{\Theta}{R_{Fe} + R_0}$$

Pit  
(tk  
od  
Ko  
od

**11. Definirajte pojmove glavnog magnetskog toka, rasipnog magnetskog toka i rubni efekt (fringing) na primjeru toroidalne jezgre sa zračnim rasporom.**

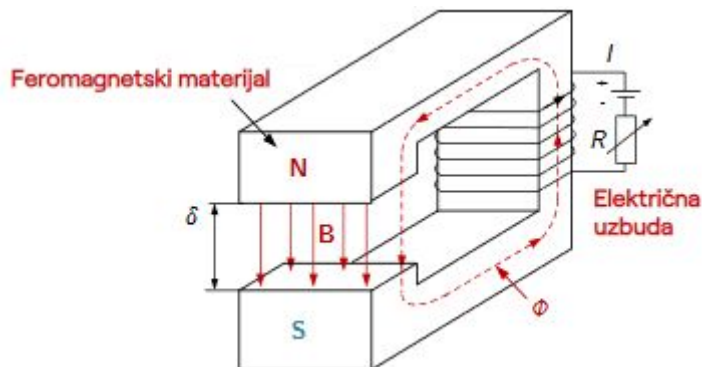
Glavni magnetski tok je onaj koji sudjeluje u elektromagnetskoj pretvorbi ili transformaciji, u slučaju toroidalne jezgre je to onaj koji se zatvara kroz jezgri.

Rasipni magnetski tok je onaj koji ne sudjeluje u el.mag. pretvorbi, u slučaju toro. jezgre je to onaj koji prolazi kroz svitak, no ne i kroz jezgri.

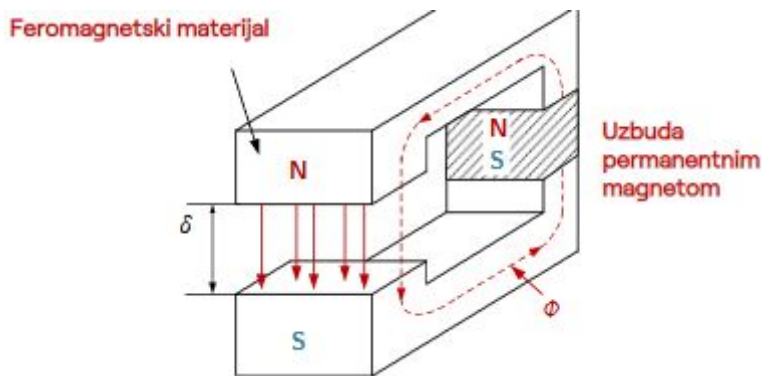
Rubni efekt je kada magnetsko polje prolazi kroz zračni raspor, ne prolazi samo pravocrtno, nego se na rubovima proširi, tj obuhvaća veću površinu nego kroz ostatak jezgre.

**12. Objasnite na koja je dva načina moguće stvoriti magnetskog polje i koje su posebnosti svakoga od njih.**

1. Jezgri sa zračnim rasporom i svitkom, uzbudimo nekim naponom i u zračnom rasporu će nastati magnetsko polje, koje je moguće regulirati pomoću otpora (otpor  $\rightarrow$  struja  $\rightarrow$  magnetski tok)



2. U jezgri sa zračnim rasporom se nalazi stalni magnet, a u zračnom rasporu nastaje magnetsko polje. Ovakvo polje ne možemo regulirati



**13. Objasnite analogiju električnog kruga, magnetskog kruga i hidrauličkog kruga te navedite analogne fizikalne veličine.**

Magnetski tok $\Phi$ [Vs]	Električna struja $I$ [A]	Protok
Magnetski otpor $R_m$ [H <sup>-1</sup> ]	Električni otpor $R$ [Ω]	Hidraulički otpor
Protjecanje (MMF) $\Theta$ [Amperzavoji]	Napon $U$ [V]	Tlak

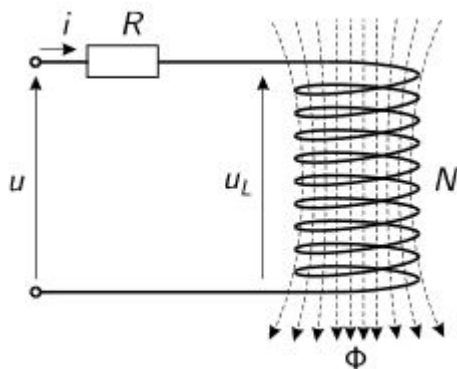
**14. Objasnite razliku između istosmjernog i izmjeničnog magnetiziranja te uzročno-posljedičnu vezu između napona izvora, struje izvora i svitka te magnetskog toka u jezgri.**

Istosmjerna magnetizacija se javlja kad je struja zavojnice konstanta te se magnetski izvor ponaša kao izvor protjecanja.

Izmjenična magnetizacija se javlja kada se zavojnica napaja izmjeničnim naponom odnosno strujom koja uzrokuje konstantan magnetski tok u jezgri pa se izvor u magnetnom krugu ponaša kao izvor konstantnog toka.

**15. Objasnite Faradayev i Lenzov zakon. Objasnite naponsku ravnotežu na primjeru svitka s feromagnetskom jezgrom i to za slučaj da je napon na induktivitetu predstavljen kao inducirani napon ili kao induktivni pad napona.**

Faradey-Napon se inducira u zatvorenoj petlji uslijed vremenski promjenjivog toka  
 Lenz-Smjer struje inducirane u vodiču će biti takav da se protivi uzroku svog nastanka



Inducirani:

$u = i \cdot R + U$ , a kako je  $R$  zanemarivo mal, ispada da je  $u = U$

Pad napona:

$u = i \cdot R - e$ , tj napon izvora je jednak padu napona

**16. Izvedite jednadžbu za inducirani napon 4.44.... Skicirajte valne oblike magnetskog toka i napona te fazore magnetskog toka i napona za idealni slučaj pretpostavljenog sinusnog magnetskog toka u jezgri.**

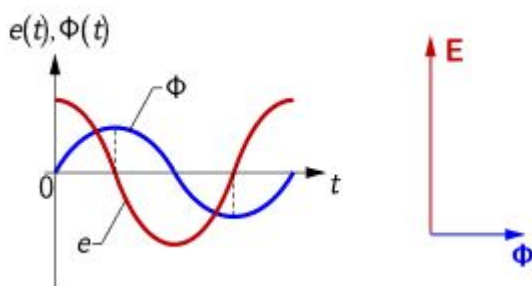
Ako je u jezgri prisutan magnetski tok  $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t)$  tada se na svitku pojavljuje inducirani napon:

$$e = \frac{d\Psi}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} = N \Phi_m \omega \cos \omega t = E_m \sin(\omega t + 90^\circ)$$

Rezultat je fazor inducirano napona, koji prethodi fazoru magnetskog toka za  $90^\circ$ .

Amplituda inducirano napona iznosi  $E_m = 2\pi f N \Phi_m$  a efektivna (RMS) vrijednost:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f N \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4.44 \Phi_m f N$$



**17. Na primjeru realnog svitka (otpor i zavojnica s jezgrom) izvedite izraz za struju zavojnice na dva načina: koristeći fazorski račun te koristeći Ohmov zakon i zakon protjecanja. Skicirajte fazorski dijagram.**



Vršna vrijednost protjecanja dobiva se iz vršne vrijednosti magnetskog toka koristeći Ohmov zakon:

$$\Theta_m = \Phi_m R_{Fe}$$

Vršna vrijednost računa se iz vršne vrijednosti protjecanja:

$$I_m = \frac{\Theta_m}{N}$$

Efektivna vrijednost struje iznosi

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{\Phi_m R_{Fe}}{\sqrt{2}N} \approx \frac{\frac{\sqrt{2}U}{2\pi f N} R_{Fe}}{\sqrt{2}N} = \frac{UR_{Fe}}{2\pi f N^2}$$

Budući da je  $\omega = 2\pi f$  i  $L = \frac{N^2}{R_{Fe}}$  može se zapisati:

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{X_L}$$

Budući da je  $X_L \gg R$ , pretpostavka da je  $U \approx E$  je ispravna.

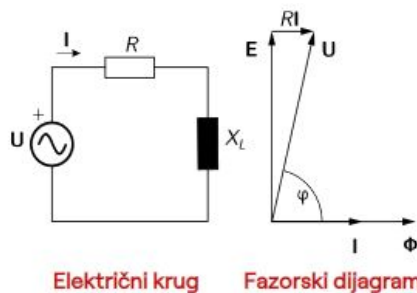
avljeno od izmjeničnog izvora,

ra i induktiviteta:

$$\mathbf{U} = \mathbf{Z}\mathbf{I} = R\mathbf{I} + jX_L\mathbf{I}$$

a se računa kao:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \approx \frac{E}{X_L}$$



### 18. Objasnite fenomen pojave gubitaka u magnetskim jezgrama uslijed izmjeničnog magnetiziranja.

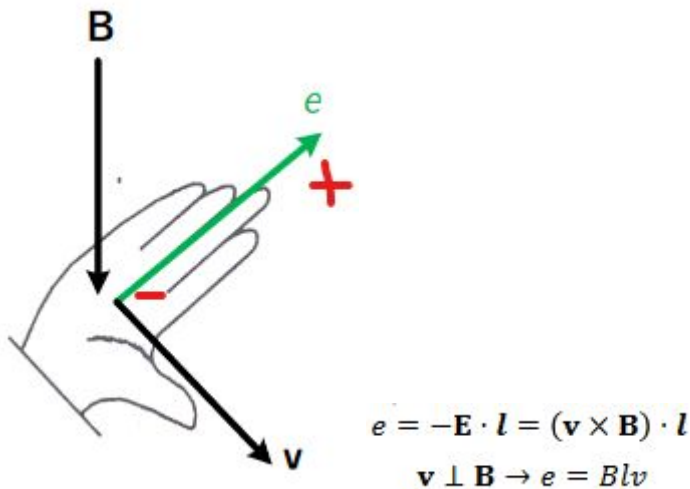
Gubici histereze-gubici u jednom električnom ciklusu su proporcionalni površinom histereze (veća f, veći gubici)

Vrtložne struje-kad dolazi do promjene oko vodljivog materijala, inducirani napon uzrokuje protok induciranih struja

### 19. Objasnite kako se primjenom principa Lorentzove sile može objasniti inducirani napon u vodiču koji se giba u magnetskom polju. Napišite općenite izraze koristeći vektore i skalare te objasnite kako se pravilom lijeve ili desne ruke može odrediti polaritet inducirano napona.



Kako se vodič giba u polju, njegovi pozitivni naboji će biti utjecani nekom silom, po lorentzovom zakonu, tako da će pozitivni naboji biti razdvojeni na jedan kraj vodiča, a negativni na drugi, što uzrokuje razliku potencijala, tj napon među njegovim krajevima.



**20.** Objasnite kako se primjenom principa Lorentzove sile može objasniti sila na vodič protječan strujom u magnetskom polju. Napišite općenite izraze koristeći vektore i skalare te objasnite kako se pravilom lijeve ili desne ruke može odrediti smjer sile.

Struja je definirana kao iznos naboja koji prođe kroz vodič (nekom brzinom) u vremenu. To znači da postoji gibanje naboja čak i ako vodič miruje, a na svaki naboj koji se giba u mag. polju, postoji sila, tako da i na vodič protječan strujom postoji sila.

Struja se definira kao iznos naboja  $Q$  koji prođe kroz vodič u jedinici vremena dok se giba brzinom  $\mathbf{v}$ :

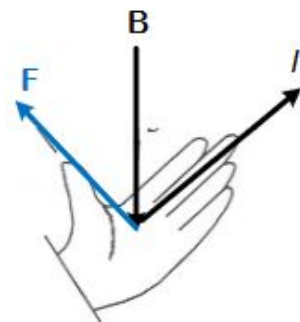
$$I = \frac{dQ}{dt} \quad \mathbf{v} = \frac{d\mathbf{l}}{dt}$$

$$I d\mathbf{l} = I \mathbf{v} dt = dQ \mathbf{v} \rightarrow I \mathbf{l} = Q \mathbf{v}$$

Zamjenom  $Q \mathbf{v}$  s  $I \mathbf{l}$  u izrazu za Lorentzovu silu:

$$\mathbf{F}_{\text{em}} = Q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = I(\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$

$$\mathbf{l} \perp \mathbf{B} \rightarrow F_{\text{em}} = BIl$$



**21.** Na primjeru vodiča koji se giba na vodljivim šinama u magnetskom polju objasnite princip generatora i motora te bilancu energije u elektromehaničkoj pretvorbi.

Generator:

Vodič se giba po šinama (oboje bez otpora) i na njega je spojen otpor. Okomito na brzinu je magnetsko polje  $B$  u kojemu se vodič nalazi. Inducira se napon na njegovim krajevima koji uzrokuje struju kroz otpor(i vodič). Struja u vodiču uzrokuje silu na vodič u smjeru suprotnom od smjera gibanja i drži sustav u ravnoteži.

$$F_{\text{meh}} \cdot v = P, P = e \cdot I$$

Motor:

Vodič se nalazi u mag. polju, na šinama(oboje bez gubitaka) i spojen je na otpornik i naponski izvor. Kroz vodič teče struja koja uzrokuje silu na vodič zbog čega se on počinje gibati.

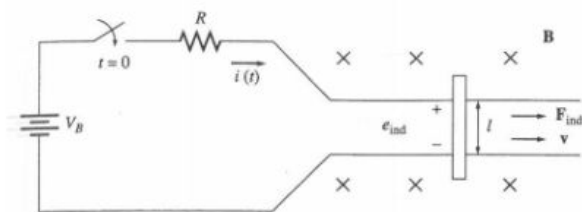
**22. Navedite fizikalna ograničenja u elektromehaničkoj pretvorbi te navedite koje su tri teoretske i dvije praktično-tehnološke pretpostavke potrebne za elektromehaničku pretvorbu energije.**

Magnetska indukcija ograničena je zasićenjem materijala, duljina vodiča ograničena mehaničkom konstrukcijom i brzina vrtnje ograničena mehaničkom čvrstoćom materijala i gubitcima uslijed trenja.

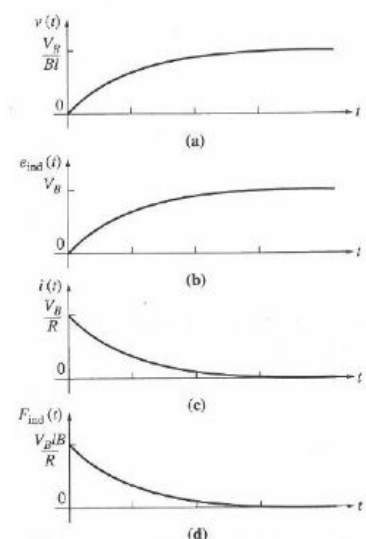
Teoretske: potrebni su magnetsko polje, vodiči smješteni u mag polju i relativno gibanje između silnica vodiča i magnetskog polja

Praktično-tehnološke: potrebni su: priključci vodiča prema vanjskom električnom krugu da omogućimo protok struje i mehanički uređaj za prijenos sile i momenata od vodiča do osovine i obrnuto

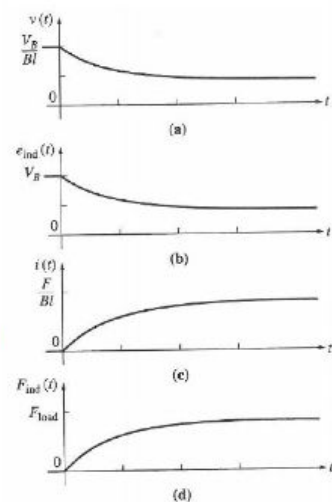
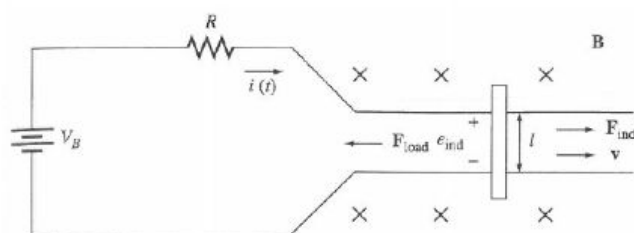
**23. Na primjeru jednostavnog linearnog istosmjernog stroja opišite proces pokretanja (zaleta priključenjem na izvor konstantnog napona) te skicirajte vremenske promjene brzine, struje, induciranog napona i inducirane sile.**



1. Sklopka se zatvara i počinje teći struja:  $i = \frac{V_B - e_{\text{ind}}}{R}$
2. Pojavljuje se elektromagnetska sila:  $F_{\text{ind}} = B i l$
3. Vodič ubrzava i pojavljuje se inducirani napon  $e_{\text{ind}} = B l v$
4. Inducirani napon smanjuje struju  $i = \frac{V_B - e_{\text{ind}}}{R}$
5. Inducirana elektromagnetska sila se smanjuje
6. Brzina praznog hoda (eng. *no-load speed*)  $v_{PH} = \frac{V_B}{B l}$



**24. Na primjeru jednostavnog linearnog istosmjernog stroja opišite i skicirajte vremenske promjene brzine, struje, induciranog napona i inducirane sile nakon što na stroj u praznom hodu počne djelovati konstantna sila suprotna smjeru gibanja (ili u smjeru gibanja).**



1. Počinje djelovati sila tereta suprotno od smjera gibanja.
2. Vodič usporava zbog deceleracije  $a = \frac{F}{m}$ .
3. Inducirani napon  $e_{ind} = Blv$  se smanjuje pa se  $\frac{V_B - e_{ind}}{R}$  povećava.
4. Inducirana sila  $F_{ind} = Bil$  povećava se dok ne dosegne iznos sile tereta.
5. Stroj radi kao motor ( $F_{ind}v = e_{ind}i$ ).

## Osnove električnih strojeva

**25. Pobrojite i objasnite osnovne dijelove električnog stroja.**

Stator-stacionarni dio motora koji prenosi moment na postolje

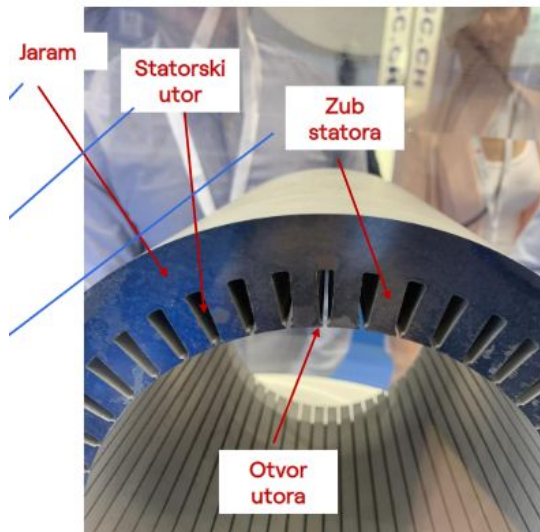
Rotor-dio motora koji rotira, navučen na osovinu, proizvodi moment

Vratilo-rotacijski dio stroja koji je povezan sa radnim mehanizmom

Uzbudni namot-namot koji proizvodi magnetsko polje, može biti na rotoru ili statoru

Armaturni namoti-namot u kojemu se inducira napon

**26. Skicirajte magnetsku jezgru statora asinkronog stroja te označite utore, zube i jaram.**



**27. Objasnite čemu služe klizni kolutovi i četkice. Kod koje vrste strojeva postoje klizni kolutovi i četkice, a kod koje vrste strojeva postoji kolektor i četkice?**

Klizni kolut je metalni prsten izoliran od osovine, a spojen na namot rotora. Četkica je grafitni materijal koji je spojen na klizni kolut i prenosi el. energiju sa rotora na stator. Oni služe kako bi mogli rotirati magnetsko polje, a vodiče postaviti na stator da miruju.

Asinkroni kliznokolutni strojevi, DC

Kolektor i četkice postoje kod DC strojeva, (...)

**28. Objasnite čemu služe i kako se proizvode magnetske jezgre statora i rotora.**

Primarni zadatak im je provođenje magnetskog polja, a služe i za smještaj namota.

Proizvode se od lameliranih limova(paketa) kako bi se spriječile vrtložne struje. Mogu se spajati varenjem ili lijepljenjem.

**29. Objasnite čemu služe namoti u električnim strojevima. Objasnite svrhu uzbudnog i armaturnog namota te definirajte njihov smještaj kod sinkronog stroja i kod istosmjernog stroja.**

Uzbudni namot-namot koji proizvodi magnetsko polje, može biti na rotoru ili statoru

Armaturni namoti- namot kroz koji protječe struja tereta, u njemu se inducira napon i služi za prijenos snage u elektromehaničkoj pretvorbi

Sinkroni stroj - uzbudni namot na rotoru

DC stroj - armaturni namot na rotoru, spojen na kolektore

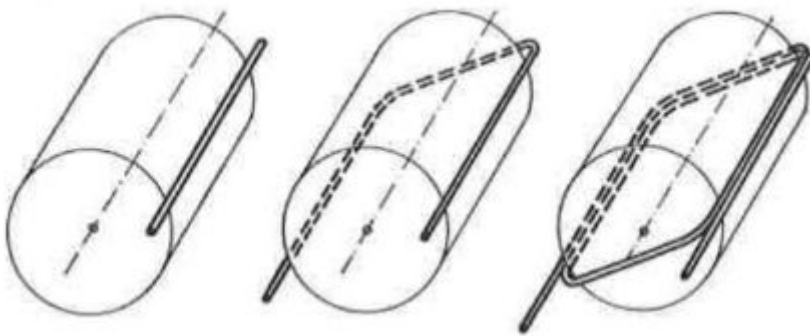
**30. Definirajte i potkrijepite skicom pojmove: vodič, zavoj, svitak, namot.**

Vodič- Pojedinačni komad žice smješten u utor električnog stroja.

Zavoj- petlja vodiča; jedan zavoj sastoji se od dva vodiča spojena u seriju.

Svitak- sastoji se od proizvoljnog broja zavoja spojenih u seriju

Namot je više međusobno povezanih svitaka(u seriju ili paralelu).



**31. Pobrojite skupine materijala koji se koriste pri izradi električnih strojeva te objasnite u kojim dijelovima stroja se primjenjuju koje od tih skupina.**

Magnetski materijali - jezgre i permanentne magnete(željezo, nikal i kobalt)

Vodljivi materijali - za namote

Izolacijski - za namote

Konstrukcijski i drugi - osovina, kućište, ležajevi, ventilatori itd

**32. Koje se dvije vrste materijala koriste za izradu namota električnih strojeva? Koje su njihove prednosti i nedostaci? U kojim vrstama namota se najčešće primjenjuje jedna, a u kojima druga vrsta materijala?**

Bakar i aluminij.

Bakar je bolji vodič, a aluminij ima manju gustoću i veću toplinsku vodljivost

Aluminij se najčešće koristi kao vodič u asinkronim motorima u rotorima(lijevanje na niskim temperaturama).

Bakar se najčešće koristi u namotima statora.

**33. Opišite princip promjene otpora vodljivog materijala s temperaturom. Kako je definirana klasa izolacije F po IEC? Općenito objasnite koji je smisao definiranja najviše dozvoljene temperature okoline, dozvoljenog zagrijanja te rezerve za najtopliju točku.**

Povećanjem temperature raste otpor vodljivog materijala, a ako promjena nije znatna koristimo linearnu aproksimaciju.

Klasa izolacije F znači da temperatura namota ne smije prijeći 155 celzijusa(105 dopušteno i 10 rezerve) i procijenjeni radni vijek iznosi 8500 sati

Najviša dozvoljena temperatura okoline je bitna jer ako je manja razlika temperature stroja i okoline, on će se sporije hladiti.

Dozvoljeno zagrijavanje je bitno zbog svojstava izolacije, a rezerva za najtopliju točku je sigurnost za neko mjesto u stroju koje se zagrijava više od ostatka.

## **Istosmjerni strojevi**

**34. Nabrojite glavne dijelove istosmjernog motora te ukratko opišite osnovnu namjenu svakog dijela. Objasnite glavne prednosti i nedostatke istosmjernih strojeva.**

Vratilo, ležaj, kućište, uzbudni i armaturni namot, kolektor i četkice.

Prednosti su jednostavno upravljanje brzinom i momentom u širokom rasponu, dobar dinamički odziv, nije potreban senzor položaja rotora za kvalitetno upravljanje.

Nedostaci su kolektor i proces komutacije, složeno održavanje, grafitna prašina, složena i skupa izrada

**35. Objasnite fenomen induciranja napona na primjeru rotirajuće petlje na cilindričnom rotoru između dvaju magnetskih polova te objasnite kako inducirani napon ovisi o 3 bitna čimbenika.**

Zamislimo da petlja rotira u matematički pozitivnom smjeru, a da se vodiči nalaze u utorima na rotoru. Ako se petlja vrti u magnetskom polju, inducirat će se napon u dijelovima petlje  $e = v \times B \cdot l$ , a ukupni napon će biti zbroj napona na svakom vodiču. Taj napon će u vremenu biti izmjeničan (kao sinusoidalni)

Inducirani napon se povećava povećanjem brzine i povećanjem magnetskog toka, a konstanta motora je uvijek ista za pojedini motor.

**36. Objasnite fenomen stvaranja okretnog momenta na primjeru petlje protjecane strujom na cilindričnom rotoru između dvaju magnetskih polova te objasnite kako inducirani okretni moment ovisi o 3 bitna čimbenika.**

Na četkice je spojen istosmjerni napon i preko kolektora će poteći struja. Rotor se nalazi u magnetskom polju. Sila na vodič se je jednaka  $i \cdot (l \times B)$ , i stvara moment  $M = r F \sin \theta$

Moment raste povećanjem magnetskog toka i povećanjem struje, dok je konstanta motora uvijek jednaka za pojedini motor.



**37. Skicirajte pojednostavljeni poprečni presjek istosmjernog stroja te označite usmjerene silnice glavnog magnetskog toka, uzbudni namot, armaturni namot, kolektor, četkice, jaram i polove. Označite uzdužnu i poprečnu os.**

**Uzbudni namot** – koncentriran oko istaknutih polova na statoru

**Armaturni namot** – ovdje je prikazan jedan zavo, a inače je distribuiran po obodu rotora

N – sjeverni pol

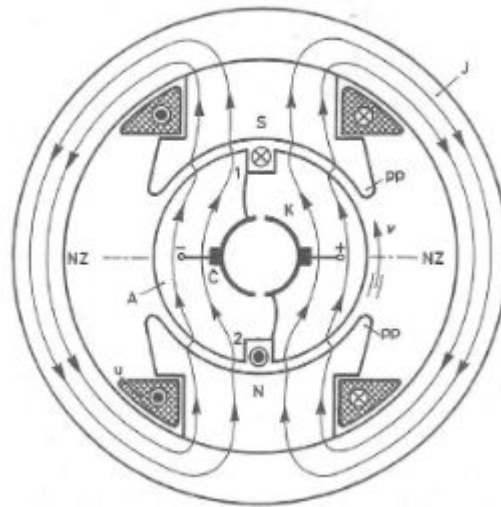
S – južni pol

NZ – neutralna zona

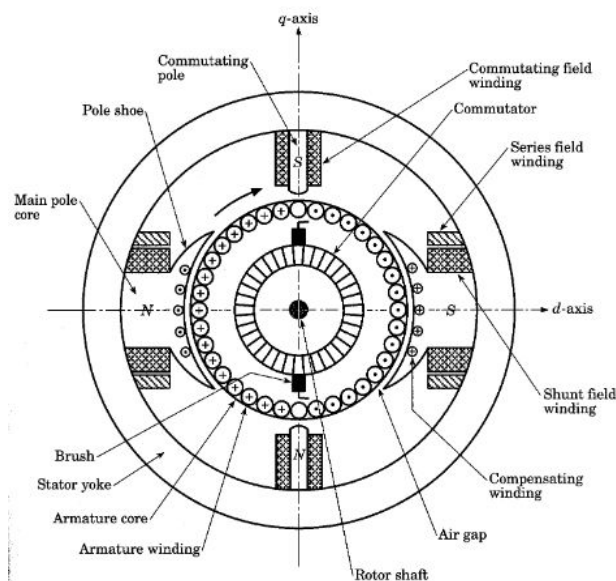
J – jaram

pp – polna papuča

1,2 – armaturni vodiči



**38. Skicirajte poprečni presjek istosmjernog stroja i označite glavne i pomoćne polove te armaturni namot, serijski uzbudni namot, paralelni uzbudni namot, kompenzacijski namot te namot pomoćnih polova.**



- main pole core – jezgra glavnog pola
- stator yoke – jaram statora
- armature core – jezgra rotora
- commutating pole – pomoćni pol
- pole shoe – polna papuča
- rotor shaft – vratilo (rotora)
- air gap – zračni raspor
- commutator – kolektor
- brush – četkica
- armature winding – namot armature
- compensating winding – kompenzacijski namot
- commutating field winding – namot pomoćnih polova
- shunt field winding – paralelni uzbudni namot
- series field winding – serijski uzbudni namot
- d-axis – direktna os
- q-axis – poprečna os

**39. Objasnite ukratko načelnu svrhu sljedećih namota istosmjernog stroja: armaturni namot, serijski uzbudni namot, paralelni uzbudni namot, kompenzacijski namot te namot pomoćnih polova. Napišite IEC oznake za namote istosmjernog stroja.**

Armaturni namot je namot u kojem se inducira napon.

Kompenzacijski namot je serijski spojen na armaturu ali je suprotno namotan tako da poništava djelovanje armature.

Namot pomoćnih polova se nalazi između polova, serijski je spojen s armaturom ali suprotno namotan. Poništava djelovanje armature u području između polova.

Svrha kompenzacijskog i pomoćnih polova je suzbijanje reakcije armature.

Namot	Oznaka
armatura	A1, A2
pomoćni polovi	B1, B2
kompenzacija	C1, C2
serijska uzbuda	D1, D2
paralelna uzbuda	E1, E2
nezavisna uzbuda	F1, F2

**40. Objasnite ovisnost induciranog napona o brzini vrtnje i uzbudnoj struji kod nezavisno uzbuđenog istosmjernog stroja.**

Inducirani napon je proporcionalan s brzinom vrtnje stroja i magnetskim tokom. Magnetski tok je proporcionalan uzbudnoj struji, što znači da je i inducirani napon proporcionalan uzbudnoj struji.

$$E = k \cdot \Phi \cdot \omega$$

**41. Objasnite fenomen reakcije armature kod istosmjernog stroja.**

Kako kroz armaturni namot teče struja, tako se stvara magnetsko polje oko vodiča armature, to polje se na nekim dijelovima poništava, a na nekima zbraja sa glavnim i izobličuje glavno polje, pritom pomičući neutralnu os.

**42. Napišite 5 jednažbi kojima se definira matematički model za ustaljeno stanje nezavisno uzbuđenog istosmjernog stroja. Jednažbu za armaturni krug napišite za motorski i generatorski režim rada. Nacrtajte ekvivalentni električni krug i označite sve bitne fizikalne veličine.**

$$U_a = E + I_a R_{a,uk} + \Delta U_\xi$$

motorski režim rada

$$U_a = E - I_a R_{a,uk} - \Delta U_\xi$$

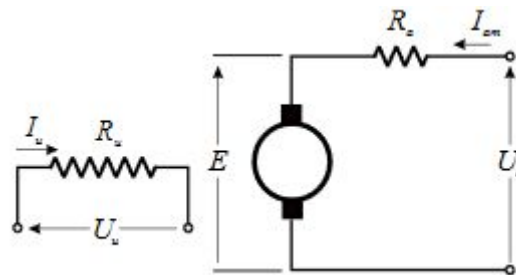
generatorski režim rada

$$E = k_E \Phi \omega$$

$$I_u = \frac{U_u}{R_u}$$

$$\Phi = f(I_u)$$

$$M = k_M \Phi I$$

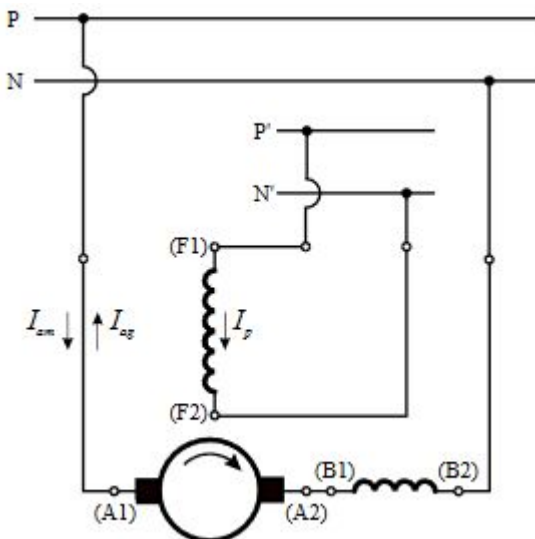


**43. Pobrojite i opišite vrste istosmjernih strojeva s obzirom na razlike u spoju i vrsti uzбудnih namota. Napišite IEC oznake za namote istosmjernog stroja. Grafički prikažite tipične načine crtanja položaja namota.**

S nezavisnom uzbuđom, paralelnom uzbuđom, serijskom uzbuđom i sa kompauđnom uzbuđom.

Namot	Oznaka
armatura	A1, A2
pomoćni polovi	B1, B2
kompenzacija	C1, C2
serijska uzbuđa	D1, D2
paralelna uzbuđa	E1, E2
nezavisna uzbuđa	F1, F2

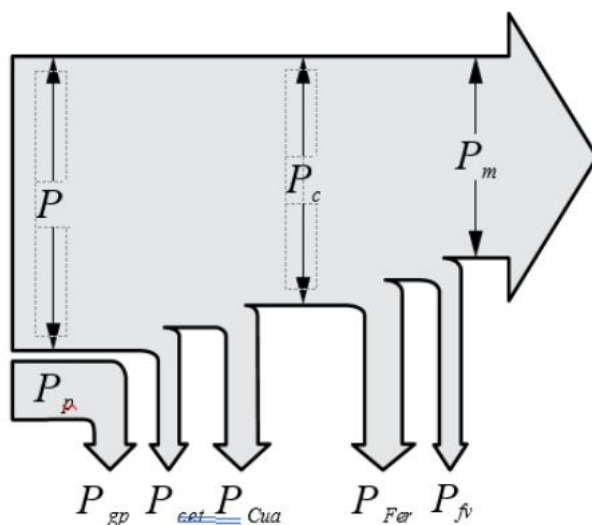
44. Nacrtajte električnu shemu spajanja uzbuđenog i armaturnog kruga nezavisno uzbuđenog stroja na prikladne izvore napajanja.



45. Objasnite strukturu gubitaka istosmjernog stroja s nezavisnom uzbuđenom i nacrtajte bilancu snage.

Gubici se sastoje od:

- mehaničkih gubitaka - trenje u ležajevima, ventilacija, trenje četkica o kolektor
- gubitaka u željezu - zubi i jaram
- gubici u bakru - u namotu armature, pomoćnih polova, električni gubici na kolektoru...



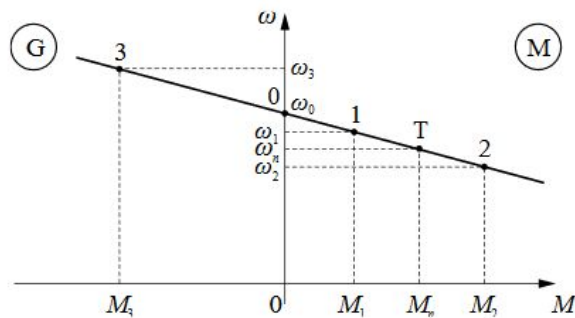
**46. Izvedite izraz za momentu karakteristiku nezavisno uzbuđenog istosmjernog stroja te nacrtajte karakteristiku u n-M dijagramu.**

$$I_a = \frac{U_a - E}{R_a} = \frac{U_a - k_E \Phi \omega}{R_a}$$

Uvrštavanjem izraza za struju u fori

$$M = k_M \Phi \frac{U_a - k_E \Phi \omega}{R_a} \text{ uz } k_E = k_M$$

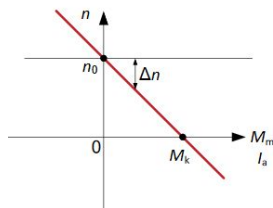
$$\omega = \frac{U_a}{k_M \Phi} - \frac{R_a}{(k_M \Phi)^2} M \rightarrow \text{MOME}$$



**47. Objasnite pojam (idealnog) praznog hoda i pojam kratkog spoja istosmjernog motora. Naznačite te ključne točke na vanjskoj karakteristici motora.**

Idealni prazni hod - stroj je uzbuđen i napajan na strani armature te nije opterećen, nema induciranog momenta (struje) armature

Kratki spoj - stroj je uzbuđen i napajan na strani armature, ali je zakočen

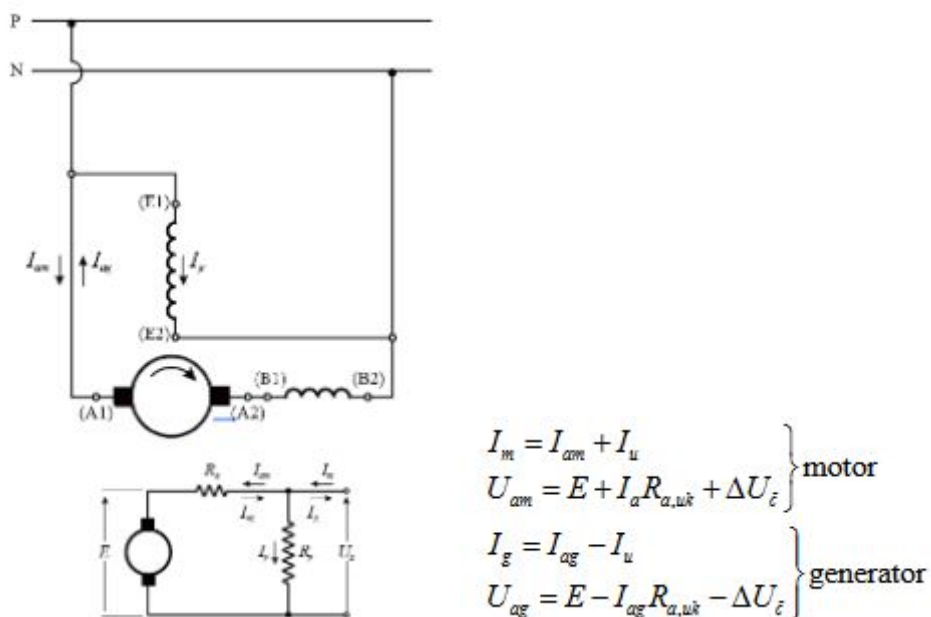


**48. Opišite tri načina promjene brzine vrtnje istosmjernog motora te opišite mogućnosti promjene smjera vrtnje istosmjernog motora (reverziranje).**

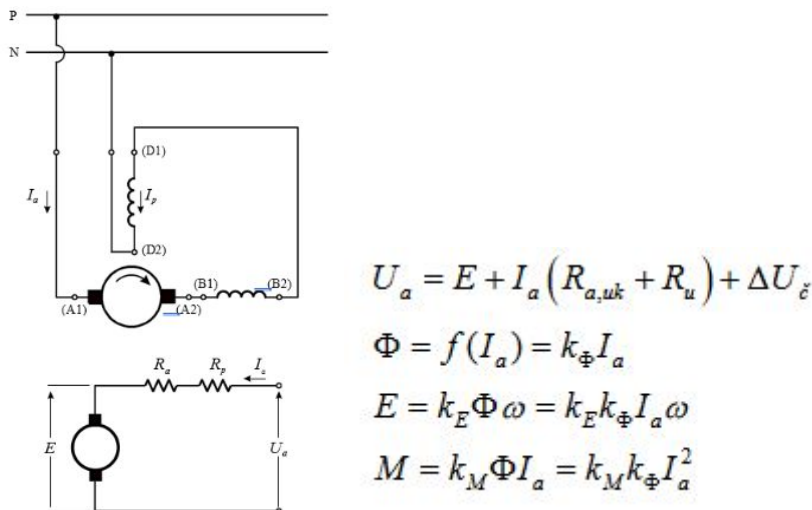
Regulacija brzine promjenom napona na armaturi, promjenom uzbudnog toka(uzbudne struje) i promjenom otpora u krugu armature.

Reverziranje se vrši promjenom predznaka napona armature pri konstantnoj uzbuđi ili promjenom predznaka struje uzbuđe.

49. Nacrtajte električnu shemu spajanja uzbuđenog i armaturnog kruga paralelno uzbuđenog istosmjernog stroja na prikladan izvor napajanja. Navedite jednačbe odgovarajućeg matematičkog modela za slučaj motora i generatora. Skicirajte nadomjesni električni krug.



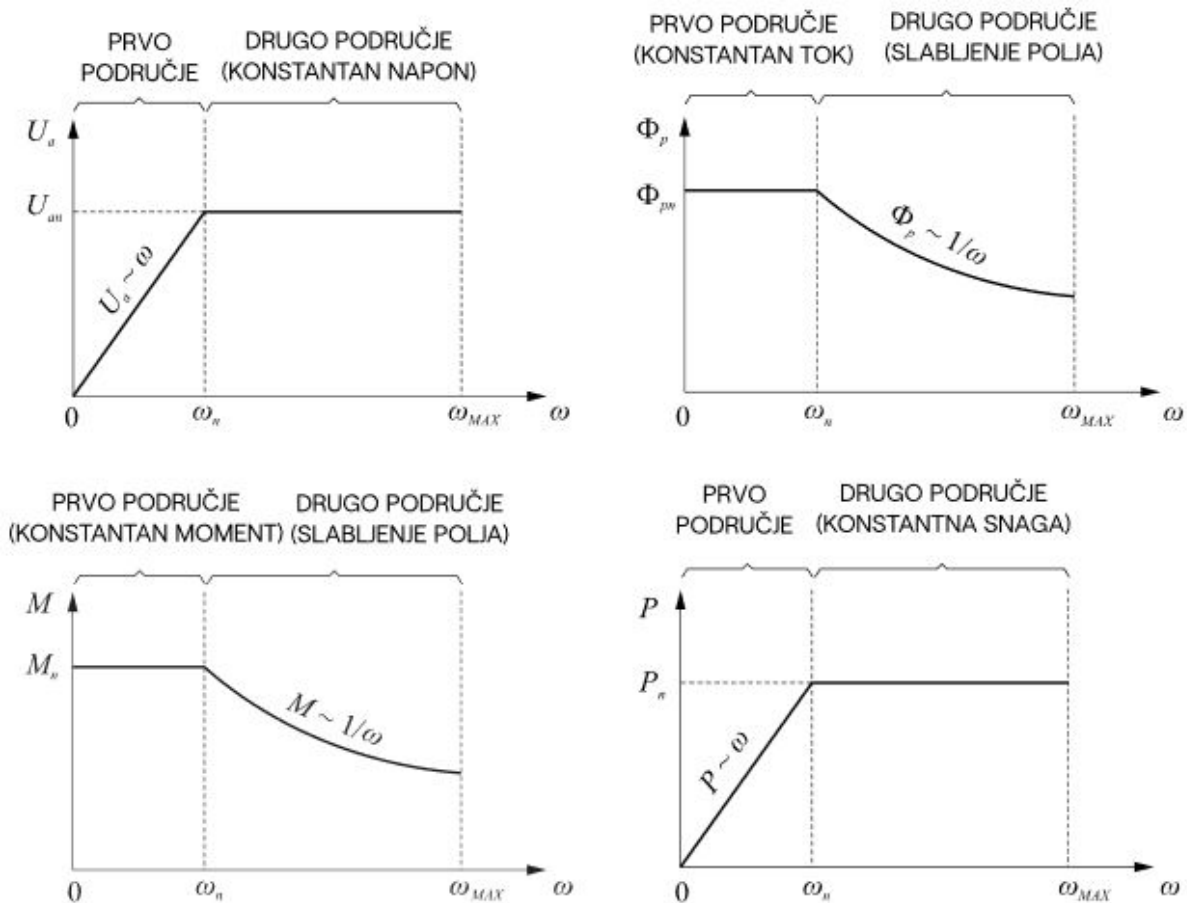
50. Nacrtajte električnu shemu spajanja serijski uzbuđenog istosmjernog stroja na prikladan izvor napajanja. Navedite jednačbe odgovarajućeg matematičkog modela za slučaj motora. Izvedite jednačbu za momentu karakteristiku. Skicirajte nadomjesni električni krug.



$$\omega = \frac{E}{k_E \Phi} = \frac{U_a - I_a \cdot R_s}{k_E k_{\Phi} I_a} = \frac{U_a}{k_E k_{\Phi} \sqrt{\frac{M}{k_M k_{\Phi}}}} - \frac{R_s}{k_E k_{\Phi}} = \frac{U_a}{k_E \sqrt{\frac{k_{\Phi}}{k_M} M}} - \frac{R_s}{k_E k_{\Phi}}$$

**51. Objasnite princip upravljanja brzinom vrtnje u širokom opsegu i nacrtajte ovisnost momenta, snage, napona i magnetskog toka za područje do nazivne i preko nazivne brzine vrtnje. Podrobno objasnite razloge zašto se brzina vrtnje regulira u određenom području regulira naponom ili uzбудnim tokom.**

Moguće je upravljati brzinom pomoću promjene napona armature i pomoću promjene toka uzbuđene. Promjenom napona armature od nule do nazivne, pri konstantnom toku uzbuđene, brzina se mijenja od 0 do nazivne. Za povećanje brzine preko nazivne, moramo smanjivati magnetski tok.



**52. Objasnite ograničenja struje, momenta, brzine vrtnje, momenta motora i magnetskog toka pri upravljanju brzinom vrtnje istosmjernog motora.**

Struja armature može biti nazivnog iznosa pri svim brzinama ako je hlađenje nezavisno.

Moment motora je pri punom nazivnom toku ograničen kao i struja.

Magnetski tok je ograničen zasićenjem.

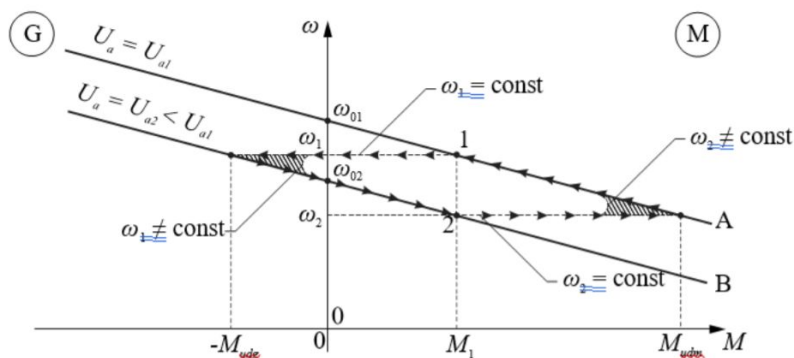
Brzina vrtnje je ograničena mehaničkim svojstvima motora.



**53. Na vanjskoj karakteristici nezavisno uzbuđenog istosmjernog motora objasnite kretanje radne točke prilikom smanjenja armaturnog napona za 10 %, ako je stroj prethodno radio u nazivnoj radnoj točki uz potencijalni moment tereta.**

Cijeli pravac u omega-M ravnini se spusti dolje za 10%, što znači da će brzina praznog hoda biti 10% manja od nazivne, a smanjit će se i moment motora praznog hoda.

Kako je brzina promjene električnih veličina puno brža od brzine promjene mehaničkih veličina, pri smanjenju napona za 10% najprije će se motor pri konstantnoj brzini prebaciti iz motorskog u generatorski režim rada. Onda će po novoj karakteristici postupno smanjivati brzinu, čime se povećava moment motora, dok se ne izjednači s momentom tereta.



**54. Objasnite pojam generatorskog kočenja u elektromotornom pogonu s istosmjernim nezavisno uzbuđenim motorom i potencijalnim teretom.**

Potencijalni teret se spušta (negativna brzina), polaritet napona U armature je promjenjenog predznaka i energija se vraća u mrežu. Pri tome mora vrijediti da je brzina rotiranja veća od nazivne

**55. Objasnite pojam protustrujnog kočenja u elektromotornom pogonu s istosmjernim nezavisno uzbuđenim motorom i potencijalnim teretom.**

Moment tereta veći je od momenta motora, odnosno motor se želi vrtiti u pozitivnu stranu, no vanjski moment ga vrti u negativnu. To se radi dodavanjem otpora u armaturni krug, čime se momentna karakteristika zakreće sve dok brzina ne postane negativna. U takvom režimu rada, sva energija se dissipira na otporu vodiča i dodanom otporu.

**56. Objasnite pojam elektrodinamičkog kočenja u elektromotornom pogonu s istosmjernim nezavisno uzbuđenim motorom i potencijalnim teretom.**

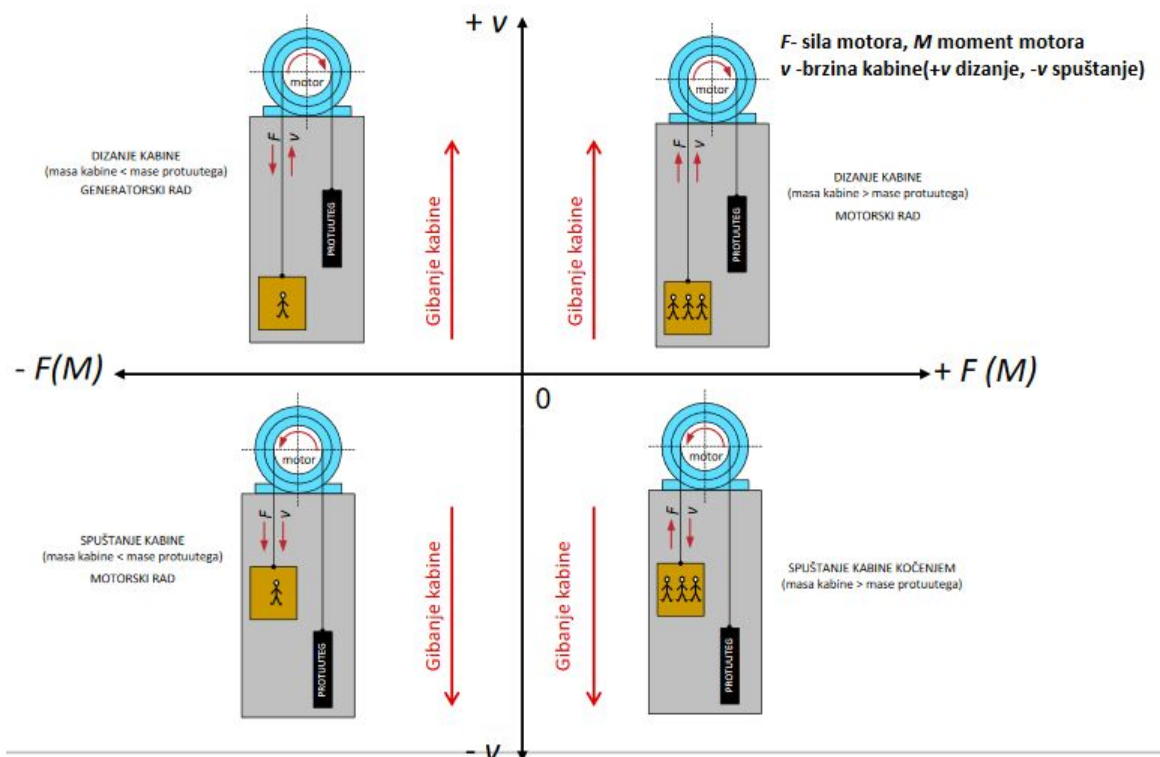
U trenutku kada želimo početi kočiti, odspojimo krug armature sa napajanja i spojimo ga na otpornik. Brzina vrtnje će inducirati napon koji će svoju energiju dissipirati na otporniku, povećanje otpornika će značiti veće kočenje.

**57. Objasnite pojam elektromotornog pogona i njegove tipične dijelove.**

Elektromotorni pogon je elektromehanički sustav namijenjen za dovođenje i održavanje u gibanju radnih mehanizama i upravljanje njihovim mehaničkim gibanjem.

Sastoji se od: elektromotora, radnog mehanizma, prijenosnog uređaja, pretvaračkog uređaja i upravljačkog uređaja

58. Objasnite 4 režima rada elektromotornog pogona na primjeru dizala ili električnog vozila.



59. Napišite osnovne jednačbe dinamičkog modela istosmjernog stroja te ih usporedite s osnovnim jednačbama modela za ustaljeno stanje. izmjeničnin pogona.

Dobro poznat model za ustaljeno stanje

$$U_a = I_a R_{a,uk} + E$$

$$E = k_E \Phi \omega$$

$$U_u = I_u R_u$$

$$\Phi = f(I_u)$$

$$M_m = k_M \Phi I_a$$

$$M_m = M_t$$

Dinamički model

$$u_a = i_a R_{a,uk} + L_a \frac{di_a}{dt} + e$$

$$e = k_E \phi \omega = \psi \omega$$

$$u_u = i_u R_u + \frac{d\psi}{dt} = i_u R_u + L_u \frac{di_u}{dt}$$

$$\psi = L_u I_u$$

$$m_m = k_M \phi i_a = \psi i_a$$

$$m_m - m_t = J \frac{d\omega}{dt}$$

60. Izvedite diferencijalnu jednačbu prvog reda za brzinu vrtnje i napišite njeno rješenje uz definiciju elektromehaničke konstante. Skicirajte promjenu brzine vrtnje u zaletu opterećenog i neopterećenog motora.

61. Objasnite načelni princip rada elektronički komutiranog motora.

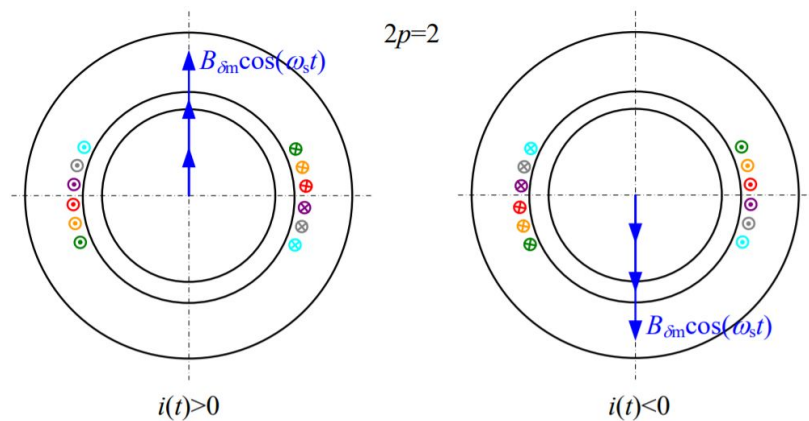
Uzbuda se nalazi na rotoru i ostvarena je permanentnim magnetima, a na statoru je armaturni namot koji se elektroničkim pretvaračem upravlja komutacijom po fazama kako bi ostvario željeno kretanje.

## Teorija izmjeničnih strojeva

**62. Objasnite te potkrijepite matematičkim izrazima i skicama pojam pulsirajućeg vektora magnetske indukcije u zračnom rasporu stroja i njegov rastav na dva rotirajuća vala magnetskog polja.**

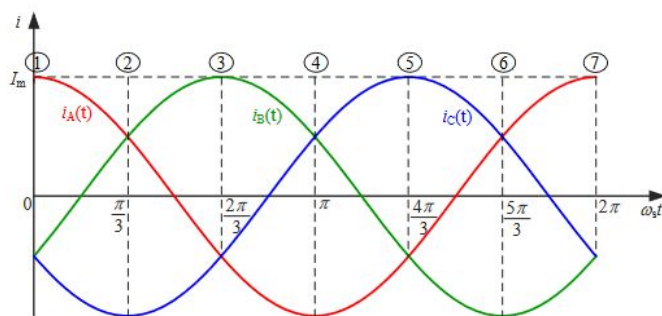
Ako promatramo magnetsku indukciju na jednom mjestu (fiksiran kut alfa), magnetska indukcija će se mijenjati od iznosa  $-B_m$  do iznosa  $+B_m$ . To se naziva pulsiranje vektora magnetske indukcije.

$$i(t) = I_m \cos(\omega_s t) \quad B(\alpha, t) = B_{\delta m} \cos(\omega_s t) \sin(p\alpha)$$



**63. Objasnite te potkrijepite matematičkim izrazima i skicama nastanak rotirajućeg magnetskog polja u trofaznom stroju.**

Kada se zbroje doprinosi vektora magnetskih polja od svake faze inverzni dijelovi svake faze se ponište, a direktni zbroje pa se dobije sinusni val s amplitudom  $3/2$  puta većom od amplitude direktnog vala svake faze. Tako dobivena magnetska indukcija je sinusna funkcija vremena i položaja, odnosno sinusni val koji se giba po obodu stroja. Tako gibanje magnetske indukcije se naziva rotirajuće magnetsko polje.



Slika 7: Rotirajuće magnetsko polje u 2-polnom stroju i vektor rezultirajuće magnetske indukcije dobiven zbrajanjem vektora magnetske indukcije faznih namota za  $\omega_s t$  od 0 do  $2\pi$

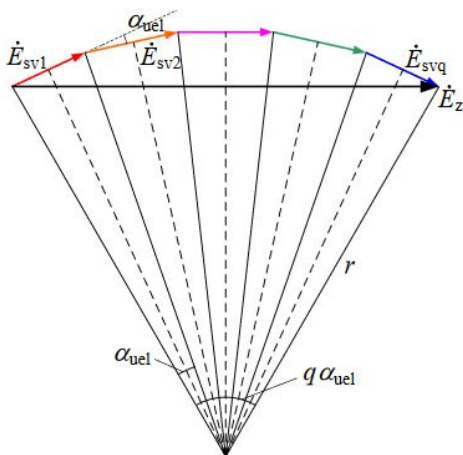
Ako se na sustav jednažbi (10) primijene adicijski teoremi, dobiva se

$$\begin{aligned}
 B_{\delta A}(\alpha, t) &= \frac{1}{2} B_{\delta m} \sin(p\alpha - \omega_s t) + \frac{1}{2} B_{\delta m} \sin(p\alpha + \omega_s t), \\
 B_{\delta B}(\alpha, t) &= \frac{1}{2} B_{\delta m} \sin(p\alpha - \omega_s t) + \frac{1}{2} B_{\delta m} \sin\left(p\alpha + \omega_s t - \frac{4\pi}{3}\right), \\
 B_{\delta C}(\alpha, t) &= \underbrace{\frac{1}{2} B_{\delta m} \sin(p\alpha - \omega_s t)}_{\text{direktna komponenta}} + \underbrace{\frac{1}{2} B_{\delta m} \sin\left(p\alpha + \omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right)}_{\text{inverzna komponenta}},
 \end{aligned}$$

**64. Objasnite te potkrijepite matematičkim izrazima i skicama pojam zonskog i tetivnog faktora namota na primjeru induciranog napona.**

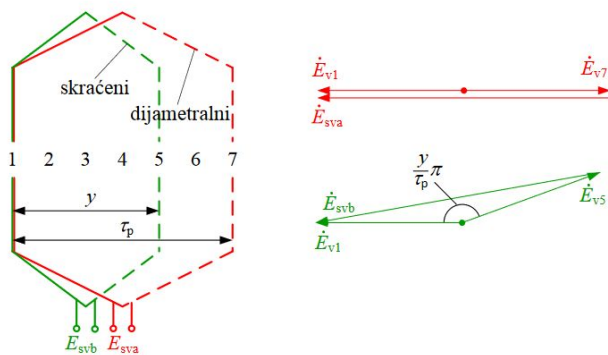
Zonski: Ako je jedan svitak raspoređen u više utora, a oni su spojeni u seriju, val polja će do njih doći sa nekom vremenskom razlikom, što znači da će postojati neki kut između njih. Rezultantna vrijednost se računa kao

$$f_z = \frac{\sin\left(q \frac{\alpha_{\text{uel}}}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{\alpha_{\text{uel}}}{2}\right)}$$

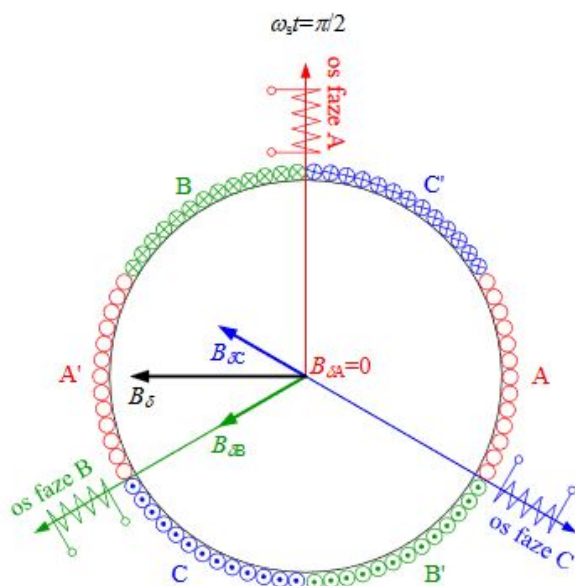


Tetivni: u svrhu smanjenja harmonika, korak može biti skraćen, tj udaljenost između početnog i krajnjeg vodiča može biti manja od  $\tau_p$ . U tom slučaju različite strane vodiča neće biti fazno pomaknute za 180 stupnjeva, nego za manji iznos. Tetivni faktor uzima u obzir razliku induciranog napona u dijametralnom i skraćenom svitku, formulom:

$$f_t = \sin \left( \frac{y}{\tau_p} \frac{\pi}{2} \right)$$



**65.** Skicirajte presjek dvopolnog stroja s 12 (24) utora i označite pomoću simbola  $\bullet$  i  $\circ$  referentne smjerove struja faznih namota i položaje osi namota. Skicirajte taj isti presjek i označite trenutne smjerove struja u faznim namotima za slučaj kada je struja u fazi A (B ili C) maksimalne pozitivne (negativne) vrijednosti te skicirajte silnice magnetskog polja i označite strelicama na silnicama smjerove polja. (U zagradama su označene moguće inačice istog pitanja.)



**66.** Skicirajte presjek 4-polnog stroja s 24 utora i označite pomoću simbola  $i$  i  $\bullet$  referentne smjerove struja namota faze A te skicirajte silnice magnetskog polja koju stvara faza A i označite strelicama na silnicama smjerove polja.

**67.** Skicirajte presjek 6-polnog stroja s 18 utora i označite pomoću simbola  $i$  i  $\bullet$  referentne smjerove struja namota faze A te skicirajte silnice magnetskog polja koju stvara faza A i označite strelicama na silnicama smjerove polja.

**68.** Izvedite općeniti izraz za inducirani napon statorskog namota (4.44...) počevši od inducirano napona jednog vodiča  $E_v$ .

$$E_v = \frac{1}{\sqrt{2}} B_{\delta r} l v_s, \quad \phi_m = \frac{2}{\pi} B_{\delta r} \tau_p l = B_{\delta r} \frac{Dl}{p} \quad B_{\delta r} = \frac{\phi_m p}{Dl} \quad v_s = \frac{D}{2} \omega_{sm} = \frac{D}{2} \frac{n_{sm} \pi}{30}$$

$$E_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\phi_m p}{Dl} l \frac{D}{2} \frac{n_{sm} \pi}{30} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \phi_m \frac{p n_{sm}}{60} = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \phi_m f_s \quad E_{pp} = 2 E_v \frac{w_s}{p} f_n$$

$$E_s = p E_{pp} = p 2 E_v \frac{w_s}{p} f_n = 2 E_v w_s f_n \quad E_s = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} w_s \phi_m f_s f_n = 4,44 w_s \phi_m f_s f_n$$

**69.** Izvedite općeniti izraz za inducirani napon rotorskog namota (4.44...) koji se giba nekom brzinom različitom od sinkrone počevši od inducirano napona jednog vodiča  $E_v$ .

$$v = \frac{D}{2} \omega_m \quad B(x_r, t) = B_{\delta r} \sin[p\alpha_r - (\omega_s - \omega)t] = B_{\delta r} \sin\left[\frac{\pi}{\tau_p} x_r - (\omega_s - \omega)t\right]$$

$$\begin{aligned} \phi_{svr}(t) &= l \int_0^{\tau_p} B_{\delta r} \sin\left[\frac{\pi}{\tau_p} x_r - (\omega_s - \omega)t\right] dx_r \\ &= \frac{2}{\pi} B_{\delta r} \tau_p l \cos[(\omega_s - \omega)t] = \phi_m \cos[(\omega_s - \omega)t] = \phi_m \cos(\omega_r t) \end{aligned}$$

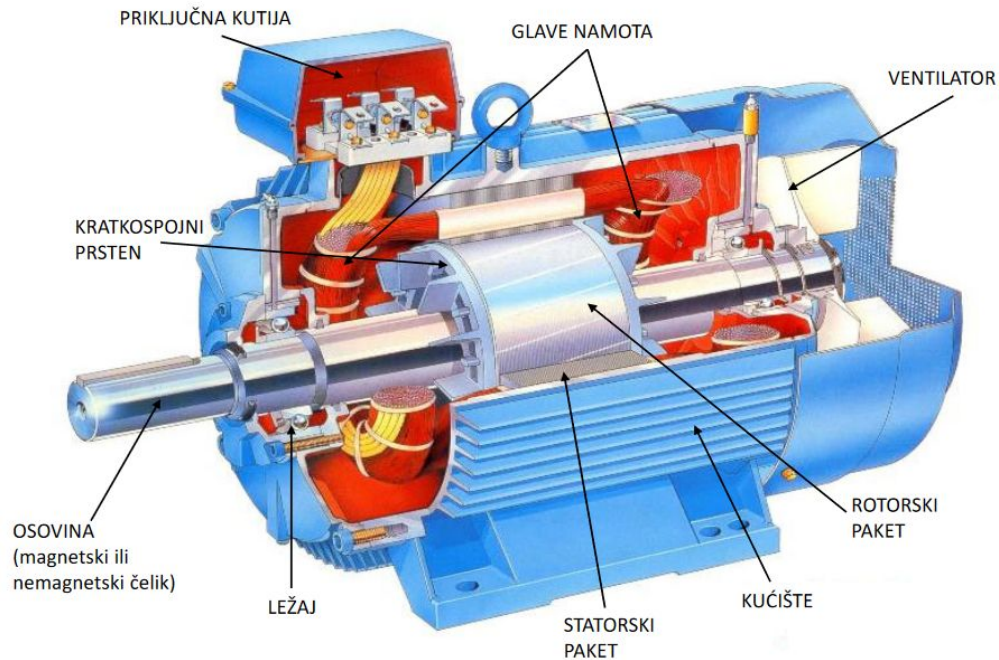
**70.** Objasnite zašto se namot izmjeničnog stroja ponekad spaja u paralelne grane te utječu li paralelne grane na ukupnu snagu stroja.

Paralelne grane se primjenjuju kada je potrebno prilagoditi iznos inducirano napona u stroju naponskoj razini izmjeničnog izvora (mreža ili energetski pretvarač) iz kojega se stroj napaja.



## Asinkroni strojevi

**71. Nabrojite glavne dijelove trofaznog asinkronog motora s aluminijским kavezним rotorom te ukratko opišite osnovnu namjenu svakog dijela.**



Statorski namot-proizvodnja uzbuđnog polja

Rotorski paket-induciranje struje i proizvodnja momenta

**72. Objasnite koje uvjete moraju zadovoljiti okretna polja statora i rotora asinkronog stroja da bi mogla nastati trajna elektromehanička pretvorba energije te na koji način su ti uvjeti zadovoljeni u motorskom, generatorskom i kočnom režimu rada neovisno o brzini vrtnje.**

Da bi se stvorilo bilo kakvo okretno magnetsko polje moraju na statoru postojati barem dva namota, pomaknuta međusobno prostorno za neki kut, a struje koje u njima teku moraju međusobno biti fazno pomaknute za neki kut.

Mora postojati klizanje.

Preduvjet za nastanak trajne elektromehaničke pretvorbe je neovisnost kutova u vremenu. To će biti postignuto ako vektori magnetskih indukcija rotora i statora rotiraju istom sinkronom brzinom vrtnje.



**73. Izvedite općeniti izraz za inducirani napon kaveznog rotora asinkronog stroja (4.44...) koji se giba nekom brzinom različitom od sinkrone te objasnite na koji način kavezni rotor čini simetrični višefazni sustav.**

Efektivna vrijednost inducirano napona jednog štapa rotora

$$E_r = sE_{r0} = \frac{1}{\sqrt{2}} sE_{r0m} = \frac{1}{\sqrt{2}} sB_{\delta r} l \frac{D}{2} \frac{\omega_s}{p} = \frac{1}{\sqrt{2}} sB_{\delta r} \underbrace{\frac{Dl}{p}}_{\phi_s} \frac{1}{2} 2\pi f_s$$

$$= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} s\phi_m \frac{1}{2} f_s = 4,44\phi_m \frac{1}{2} s f_s = 4,44\phi_m \frac{1}{2} f_r$$

Općeniti izraz za inducirani napon rotorskog namota

$$E_r = 4,44\phi_m \frac{w_r}{a_r} f_r f_{nr}$$

Odatle slijedi da za kavezni rotor vrijedi

$$\text{broj zavoja: } w_r = \frac{1}{2}$$

$$\text{broj paralelnih grana: } a_r = 1$$

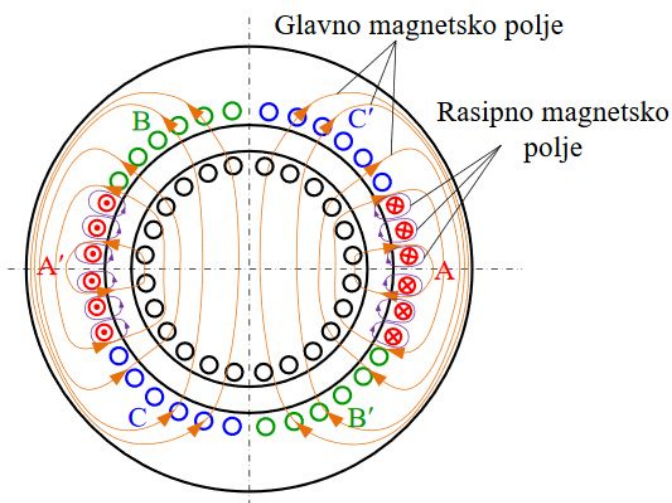
$$\text{faktor namota: } f_{nr} = 1$$

Kavezni rotor je višefazni sustav čiji broj faza je jednak broju vodiča u kavezu. On ispunjava sve uvjete za stvaranje simetričnog okretnog polja jer vrijedi

- električni kut između dva susjedna vodiča jednak je električnom kutu između struja koje njima teku,
- vodiči kaveza su simetrično raspoređeni po obodu rotora,
- amplitude struja jednake su u svim vodičima.

**74. Objasnite kakva je veza između glavnog induktiviteta u poprečnoj grani nadomjesne sheme asinkronog stroja  $L_m$  i induktiviteta pojedinačnog faznog namota statora  $L_{ms}$ .**

**75. Objasnite skicom presjeka stroja gdje nastaje rasipno magnetsko polje u stroju te kako općenito definiramo rasipne induktivitete namota statora i rotora.**



Glavno polje prolazi kroz zračni raspor i ulančuje vodiče statorskog i rotorskog namota dok rasipno polje ulančuje samo vodiče statorskog namota koji ga stvara svojom strujom.

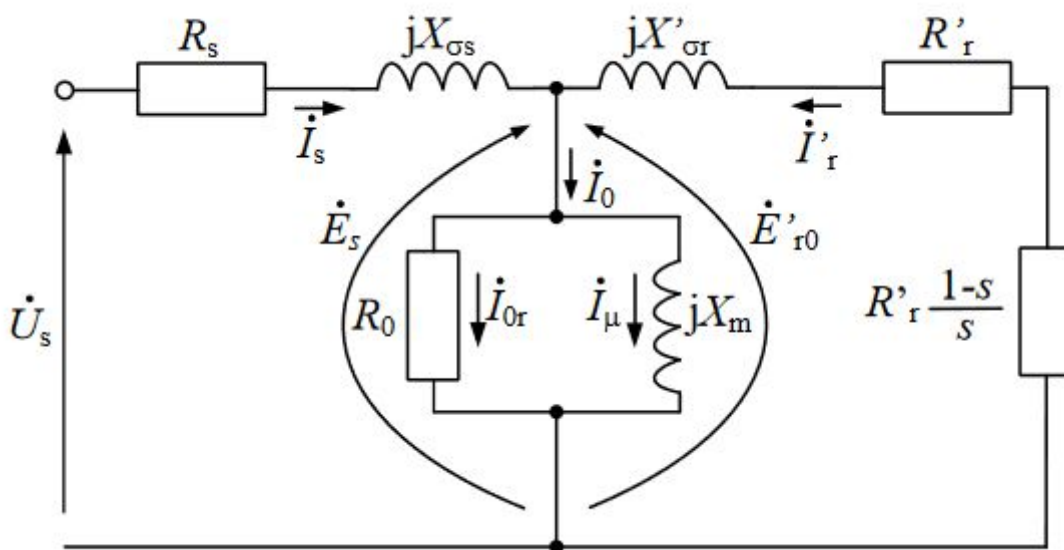
**76. Objasnite pojam svođenja rotorskih veličina na statorsku stranu te zašto ga uvodimo prilikom izvođenja nadomjesne sheme asinkronog stroja.**

Svođenje veličina na statorsku stranu znači da na strani statora uključujemo komponente koje su na rotoru, ali utječu na stator. To radimo da bi stator i rotor mogli prikazati jednom shemom u jedan el. krug.

**77. Objasnite fizikalno značenje struje magnetiziranja  $I_\mu$  te njenu ulogu u stvaranju glavnog magnetskog toka u zračnom rasporu  $m$ .**

Struja  $I_\mu$  je komponenta struje statora koja će u statorskom namotu stvoriti rezultirajuće protjecanje identično zbroju protjecanja statora i rotora. To rezultirajuće protjecanje je proporcionalno ukupnom magnetskom toku  $\Phi_m$ . Struja  $I_\mu$  predstavlja struju rotora reduciranu na statorsku stranu. Drugim riječima, to je struja koja bi morala teći statorskim namotom da stvori protjecanje identično protjecanju koje stvara struja rotora u rotorskom namotu.

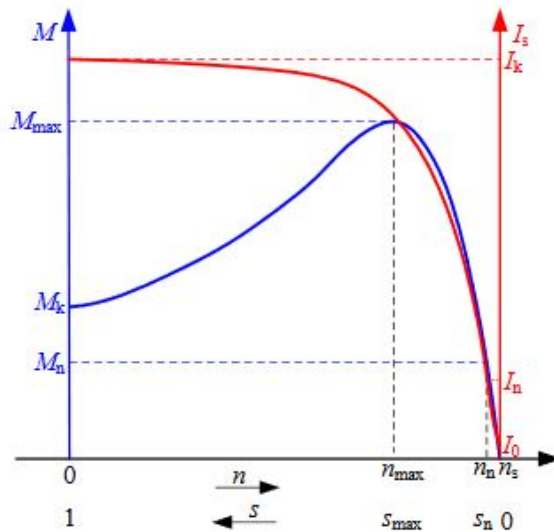
**78. Skicirajte nadomjesnu shemu asinkronog stroja, označite sve elemente, napone i struje te objasnite zašto se u rotorskom krugu pojavljuje klizanje  $s$ .**



**79. Objasnite ulogu otpora  $R_0$  u poprečnoj grani nadomjesne sheme te objasnite zašto se taj otpor nalazi upravo na tom mjestu u nadomjesnoj shemi.**

Da bi se uzeli u obzir gubici u željezu statora, u shemu se dodaje član  $R_0$  koji predstavlja nadomjesni otpor zbog gubitaka u željezu. Ti gubici se moraju pokriti iz izvora napajanja stroja, tj na statorskoj strani

80. Skicirajte momentnu karakteristiku i karakteristiku struje statora u motorskom režimu rada u ovisnosti o klizanju, označite ključne radne točke te navedite tipične vrijednosti momenta i struje u tim radnim točkama (relativno u odnosu na nazivne vrijednosti).

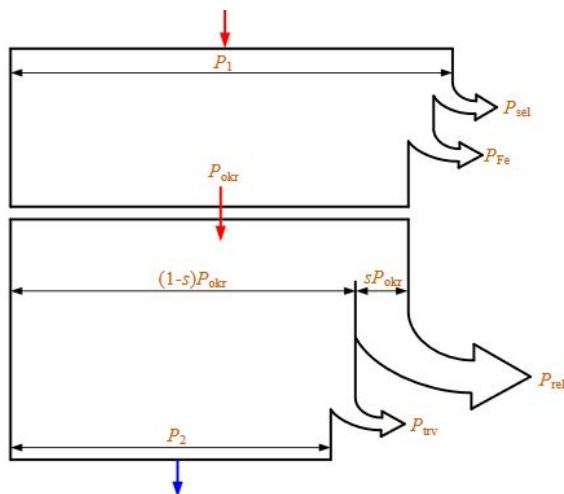


Tipično vrijedi:

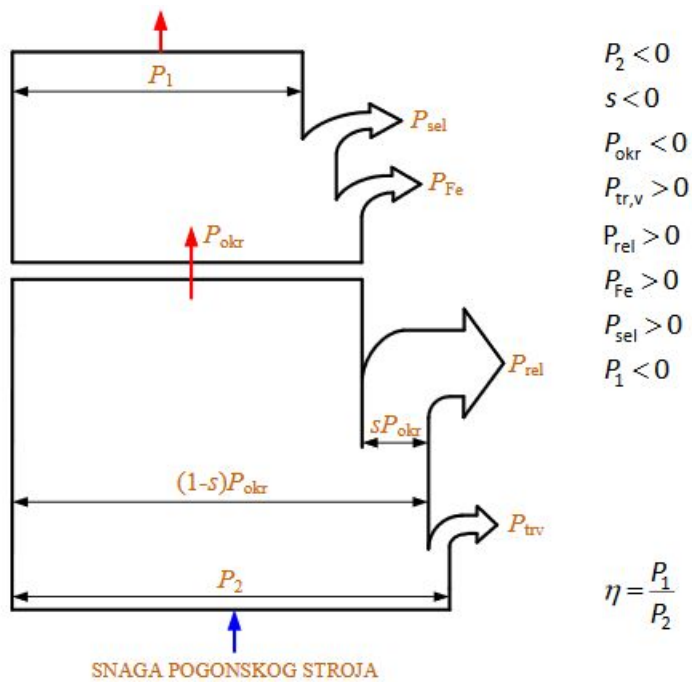
- $I_k/I_n = 5$  do  $8$
- $M_{max}/M_n = 2$  do  $3$
- $I_0/I_n = 0,1$  do  $0,25$
- $s_n = 0,5$  do  $5\%$

- $s=1, n=0 \Rightarrow M_k$  - potezni moment ili moment kratkog spoja,  $I_k$  - potezna struja ili struja kratkog spoja
- $s=s_n, n=n_n \Rightarrow M_n$  - nazivni moment,  $I_n$  - nazivna struja
- $s=s_{max}, n=n_{max} \Rightarrow M_{max}$  - maksimalni ili prekretni moment
- $s \approx 0, n \approx n_s \Rightarrow I_0$  - struja praznog hoda

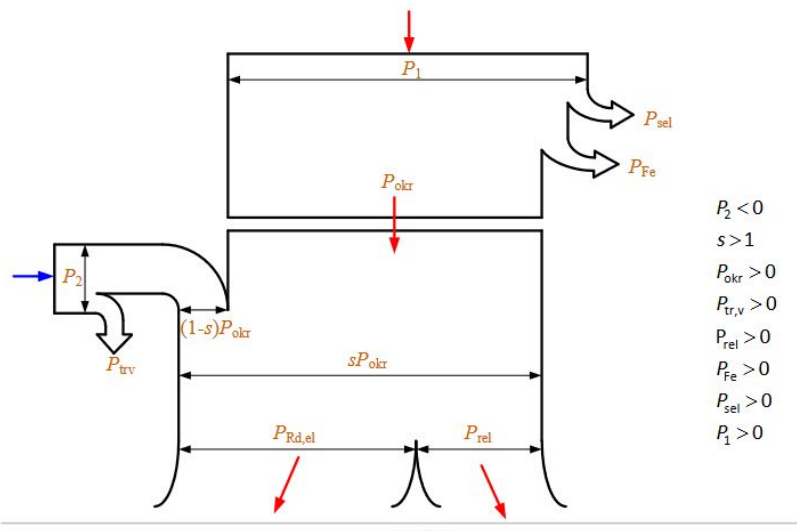
81. Skicirajte tokove snage i gubitaka asinkronog stroja u motorskom režimu rada.



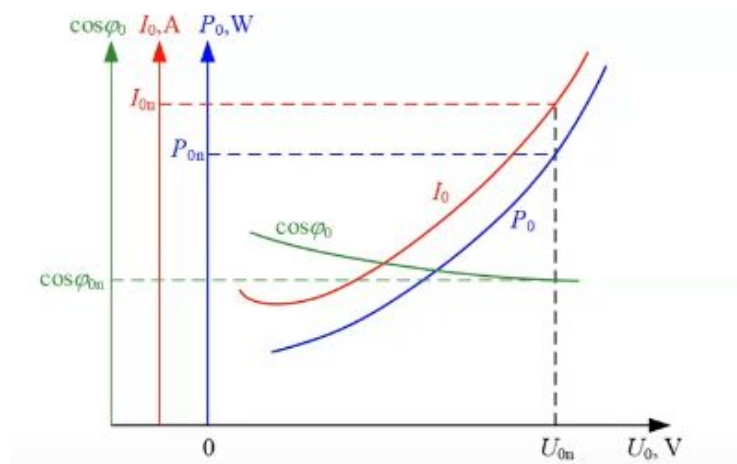
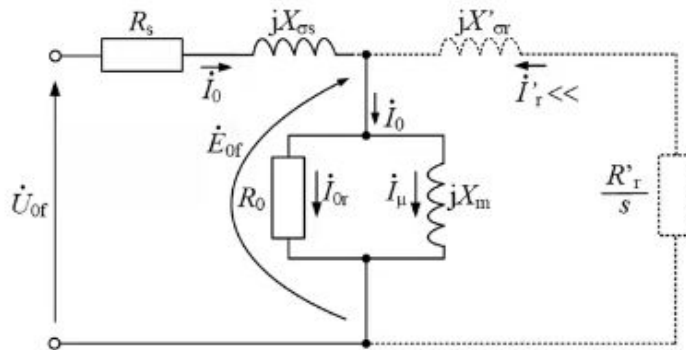
82. Skicirajte tokove snage i gubitaka asinkronog stroja u generatorskom režimu rada.



83. Skicirajte tokove snage i gubitaka asinkronog stroja u kočnom režimu rada.



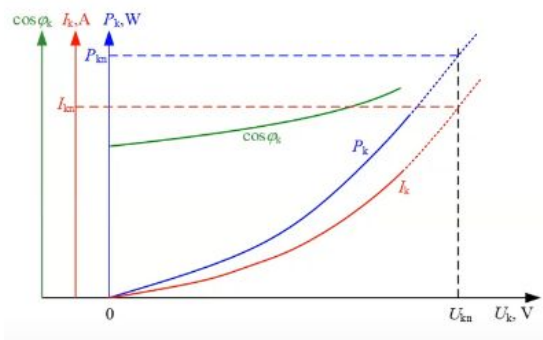
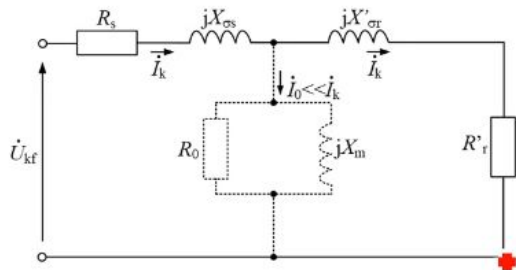
**84. Skicirajte nadomjesnu shemu asinkronog stroja za pokus praznog hoda. Prikažite na dijagramu kako ovise struja, snaga i faktor snage o naponu u pokusu praznog hoda.**



**85. Kako se određuju gubici u željezu i gubici trenja i ventilacije iz pokusa praznog hoda?**

Od gubitaka praznog hoda, oduzmemo gubitke u namotu. Preostali iznos su gubici u željezu i trenja, ventilacije. Iz grafa aproksimiramo gdje će graf sjeći os gubitaka, kada je napon jednak nuli. Iznos snage u toj točki predstavlja gubitke trenja i ventilacije, a ostatak gubitke u željezu.

**86. Skicirajte nadomjesnu shemu asinkronog stroja za pokus kratkog spoja. Prikažite na dijagramu kako ovise struja, snaga i faktor snage o naponu u pokusu kratkog spoja. Kako potezni moment ovisi o naponu?**



$$M_{kn} = M_k \left( \frac{U_{kn}}{U_{k,mj}} \right)^2$$

Moment je proporcionalan kvadratu struje.

**87. Objasnite postupak pokretanja asinkronog motora preklopom zvijezda-trokut.**

U spoju zvijezda će struja biti za 3 puta manja nego u spoju trokut, tako da će udar na mrežu biti manji, a moment će biti isto 3 puta manji, tako da će i sporije ubrzavati. U zvijezdi ga držimo da prekretnog momenta, a onda uklopimo u spoj trokut.

**88. Objasnite postupak pokretanja asinkronog motora soft-start uređajem.**

To je uređaj koji se sastoji od tiristora i njime se elektronički regulira napon statora motora i tako možemo regulirati struju pokretanja. Uključivanjem i isključivanjem reguliramo srednju vrijednost napona i struje motora.

**89. Objasnite postupak pokretanja asinkronog motora preko autotransformatora.**

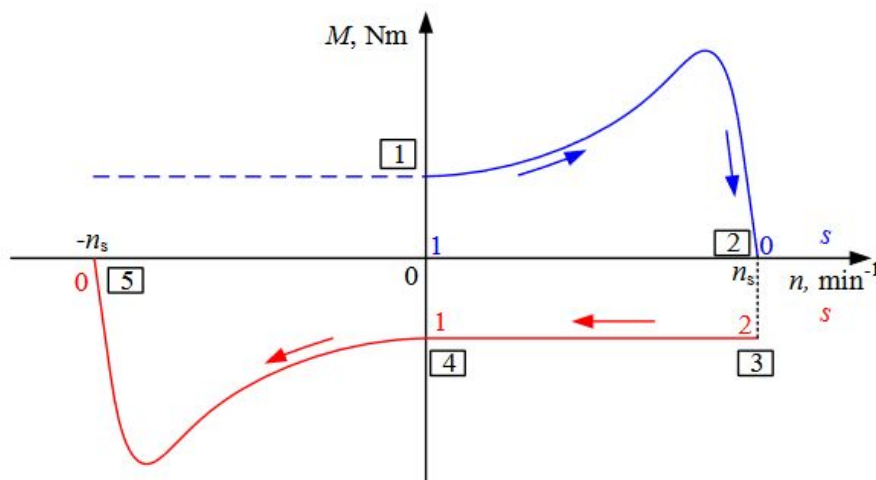
Pomoću klizača reguliramo koliki će biti napon na motoru, tako da možemo održavati struju unutar željenih granica, a nakon što dostignemo napon mreže, uklapamo ga direktno a isklapamo autotransformator.

**90. Objasnite postupak pokretanja kolutnog asinkronog motora dodavanjem otpora u rotorski krug.**

Uključivanjem dodatnih otpora u krug armature, raste nam potezni moment, a početna struja se smanjuje. Prekretni moment ostaje isti (do nekih vrijednosti otpora)

**91. Skicirajte momentnu karakteristiku asinkronog stroja tijekom reverziranja i označite vrijednosti klizanja u ključnim točkama. Objasnite na koji način se inicira reverziranje asinkronog stroja.**

1. Motor kreće iz mirovanja ( $s=1$ )
2. Motor se zalijeće do približno sinkrone brzine vrtnje ( $s \ll 1$ )
3. Uz beznaponsku pauzu vrši se zamjena redoslijeda faza, motor prelazi u protustrujno kočenje ( $s=2$ )
4. Motor protustrujno koči do brzine 0 ( $s=1$ )
5. Motor se zalijeće do približno sinkrone brzine vrtnje u suprotnom smjeru ( $s \ll 1$ )



**92. Objasnite princip upravljanja brzinom vrtnje asinkronog stroja promjenom napona.**

Napon možemo mijenjati preko autotransformatora ili soft-start udeđajem.

Promjenom napona uz fiksnu frekvenciju momentna karakteristika se mijenja prema  $M=U^2$ .

**93. Objasnite princip upravljanja brzinom vrtnje asinkronog stroja primjenom više odvojenih namota različitog broja polova.**

U stroj se ugrađuje više namota sa različitim brojem polova. Za takvu konfiguraciju možemo koristiti različiti broj polova i tako grubo regulirati brzinu. Npr za jedan par polova nam je sinkrona brzina 1500, za dva para polova je brzina  $1000 \text{ min}^{-1}$ .

**94. Objasnite princip upravljanja brzinom vrtnje asinkronog stroja primjenom Dahlanderovog spoja. Kako će se odnositi linijske struje i snage za spojeve YY i D za približno konstantni moment na obje brzine vrtnje?**

Stroj ima više namota i ovdje ih možemo imati više uključenih u isto vrijeme. Prespajamo namote tako da dobijemo željene karakteristike, npr dvostruko veći otpor u trokutu ili dvostruko manji u zvijezdi, a omjer brzina će uvijek biti 1:2. Linijske struje  $YY/D=1.333$ , a snage  $YY/D=1.333$

**95. Objasnite princip upravljanja brzinom vrtnje asinkronog stroja primjenom Dahlanderovog spoja. Kako će se odnositi linijske struje i snage za spojeve YY i Y za ventilatorsku karakteristiku momenta?**



Stroj ima više namota i ovdje ih možemo imati više uključenih u isto vrijeme. Prespajamo namote tako da dobijemo željene karakteristike, npr dvostruko veći otpor u trokutu ili dvostruko manji u zvijezdi, a omjer brzina će uvijek biti 1:2. Linijske struje  $YY/Y=4$ , a snage  $YY/Y=4$

**96. Objasnite princip upravljanja brzinom vrtnje kolutnog asinkronog motora dodavanjem otpora u rotorski krug? Kako brzina vrtnje ovisi o vrijednosti dodanog otpora?**

Dodavanjem otpora u rotorski krug mijenjamo klizanje i nagib momentne karakteristike se smanjuje, a prekretni moment ostaje isti, no na drugoj brzini. Vidljivo je da moment motora mora ostati isti, tako da možemo izjednačiti dvije jednačbe momenta, jednu bez i jednu sa dodanim otporom. Iz toga je vidljivo kako se jedino mijenja klizanje, tj povećanjem dodanog otpora se povećava i klizanje, tj smanjuje brzina. Struja rotora, kao ni struja statora se neće promijeniti.

**97. Objasnite zašto se pri upravljanju brzinom vrtnje asinkronog stroja promjenom frekvencije mora istovremeno mijenjati i napon. Što bi se dogodilo kada bi se mijenjala samo frekvencija?**

Smanjimo li frekvenciju  $f_s$  ne mijenjajući napon, povećat će se magnetska indukcija  $B_{\delta r}$ , odnosno magnetski tok  $\phi_m$ . Povećanje  $B_{\delta r}$  nije dozvoljeno zbog zasićenja magnetskog kruga koje rezultira drastičnim povećanjem struje magnetiziranja  $I_\mu$  zbog čega se smanjuje faktor snage te povećavaju gubici u namotu željezu statora.

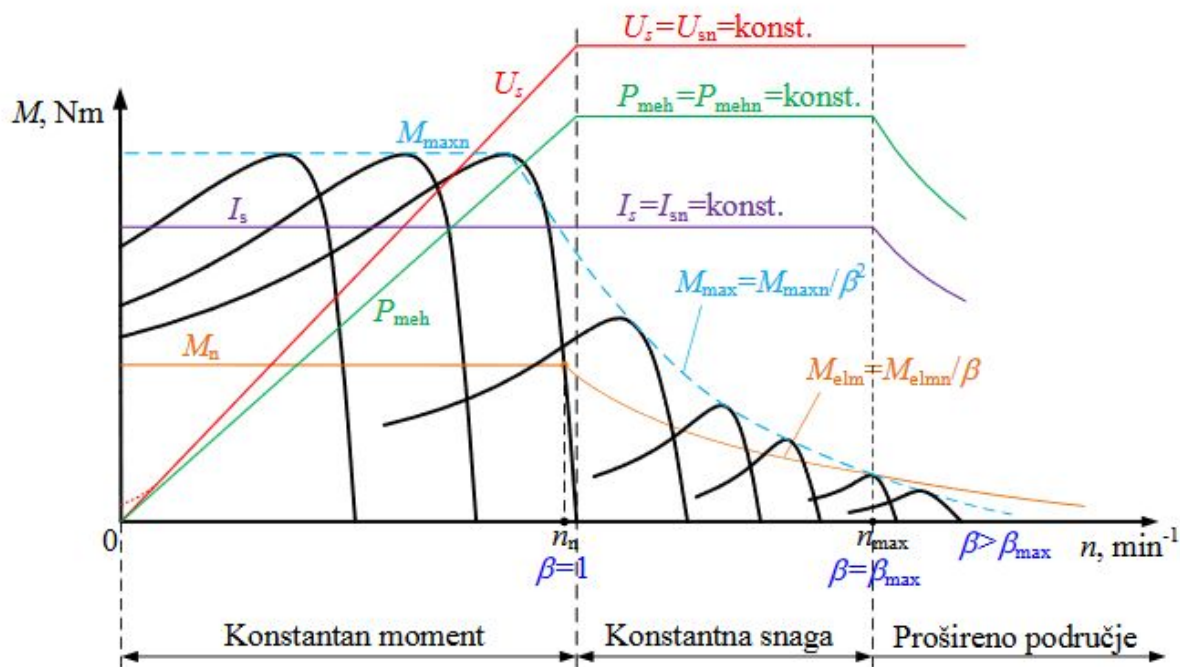
**98. Skicirajte tipičnu momentnu karakteristiku nekog trofaznog asinkronog kaveznog motora priključenog na nazivni napon i frekvenciju i označite na njoj potezni, prekretni (maksimalni) i nazivni moment. Kako će izgledati ta karakteristika ako:**

**a) napon i frekvenciju motora smanjimo na 50% nazivne vrijednosti**

**b) frekvenciju povećamo na dvostruku vrijednost, a napon zadržimo konstantnim?**

**Momentne karakteristike za sve slučajeve skicirajte u istom dijagramu.**

**99. Skicirajte kako se mijenjaju napon, struja, mehanička snaga, maksimalni moment te moment koji stroj razvija pri nazivnoj struji u ovisnosti o brzini vrtnje pri skalarnom upravljanju promjenom napona i frekvencije od brzine nula do maksimalne brzine u tzv. proširenom području.**



**100. Objasnite kako otpor statorskog namota utječe na upravljanje brzinom vrtnje promjenom napona i frekvencije pri niskim brzinama vrtnje.**

Impedancija  $Z_1$  je ovisna o frekvenciji i ako je frekvencija dovoljno mala, onda impedancija postaje zanemarivo mala u odnosu na otpor statora. Ako pokušavamo držati omjer  $U/f$  konstantnim, tj struju armature konstantnu, onda će nam pri malim frekvencijama otpor statora unositi značajnu promjenu i više neće biti moguće održati struju konstantnom.