

ASINHRONE MAŠINE

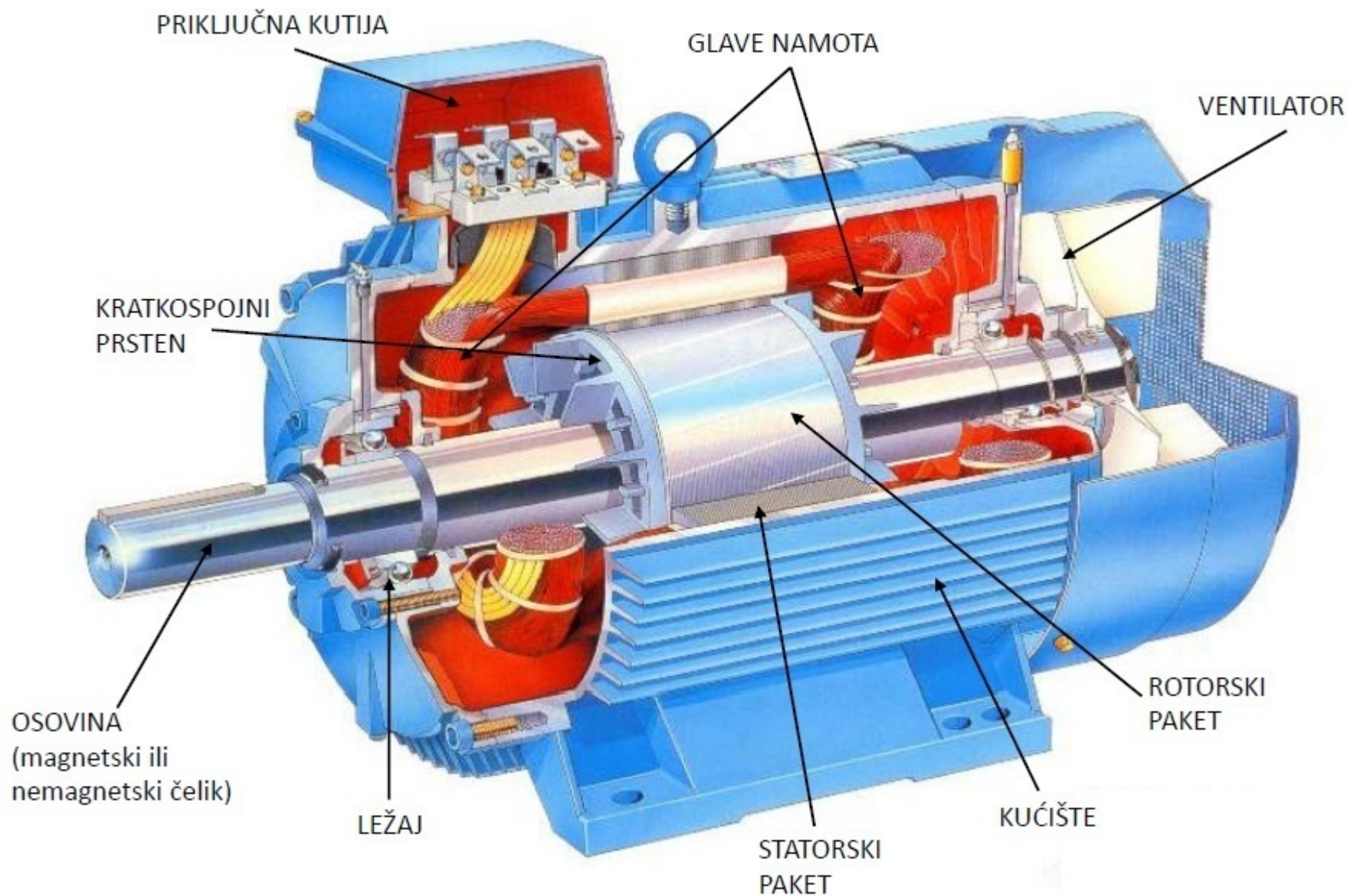
Prema obliku kretanja: rotacione (*rotating machines*), linearne (*linear machines*) asinhronne mašine (*induction machines*).

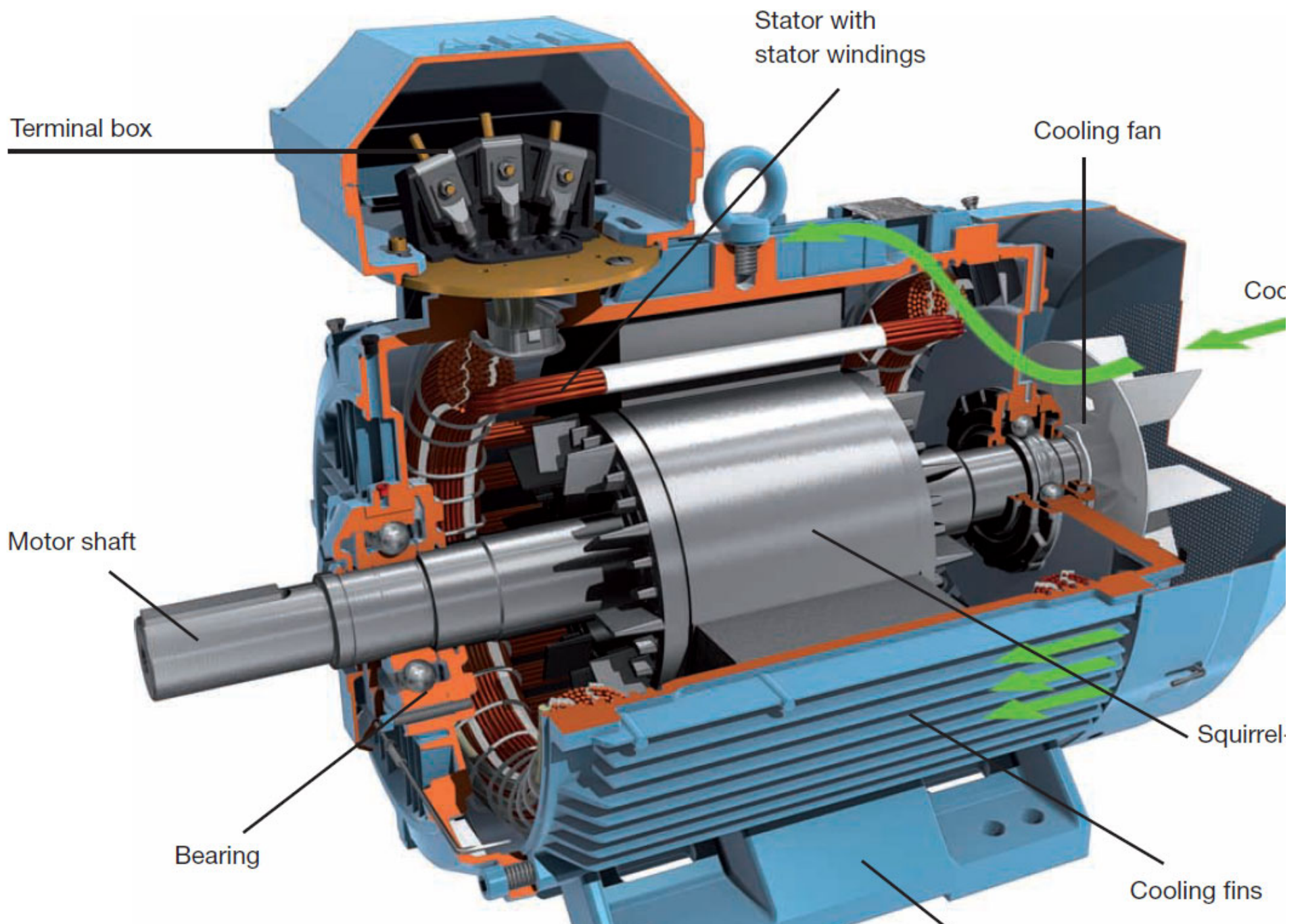
Prema konstrukciji rotora asinhronne mašine sa: kaveznim rotorom (*squirrel-cage rotor induction motors*), kliznokolutnim (namotanim) rotorom (*slip-ring rotor induction motors*).

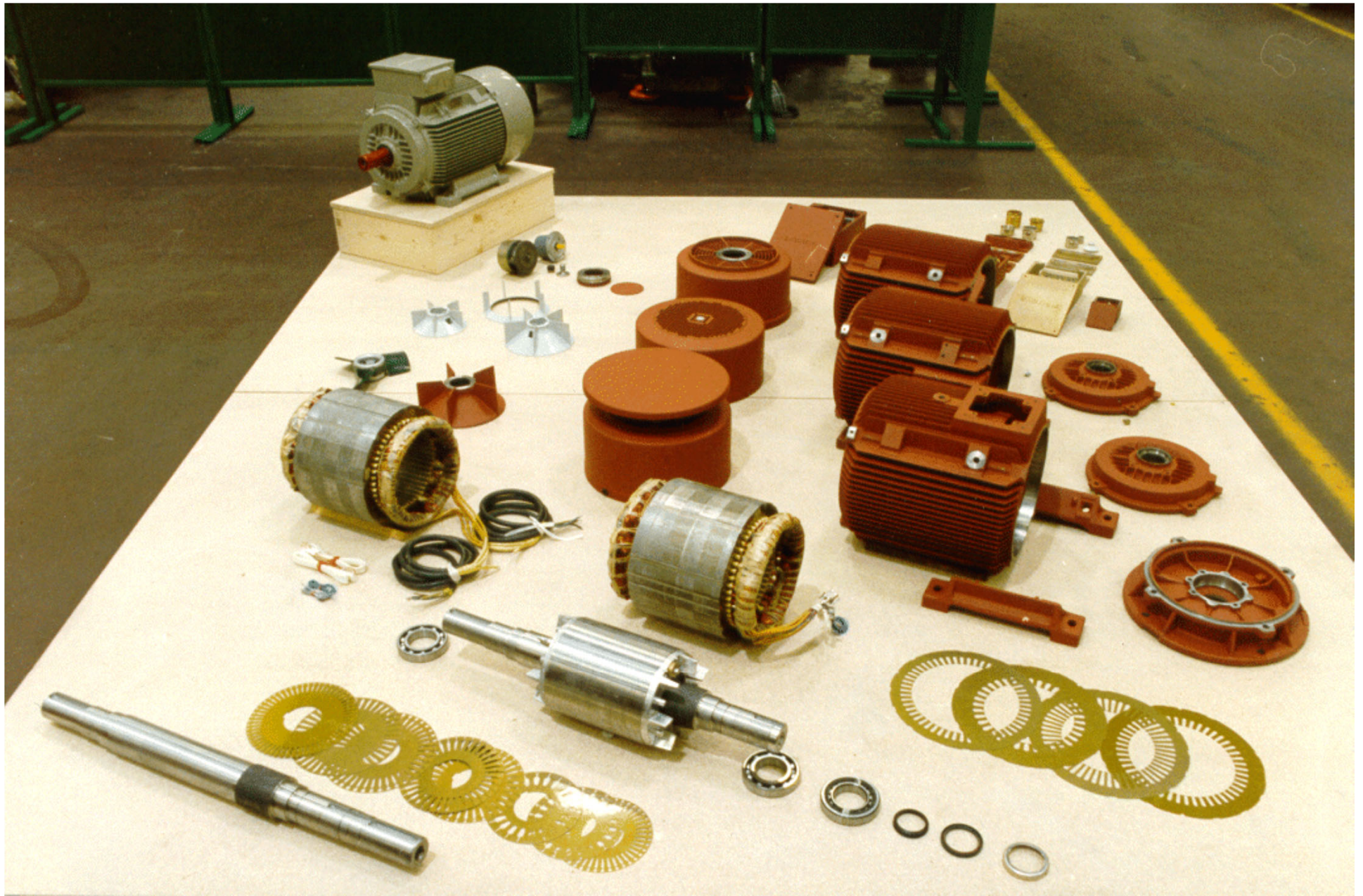
Prema broju faza: trofazne i jednofazne (za male snage) asinhronne mašine.

Prema veličini nazivnog napona: niskonaponske (do 1kV), visokonaponske mašine (iznad 1kV do 15kV).

Prema režimu rada: asinhronni motori, asinhronni generatori.







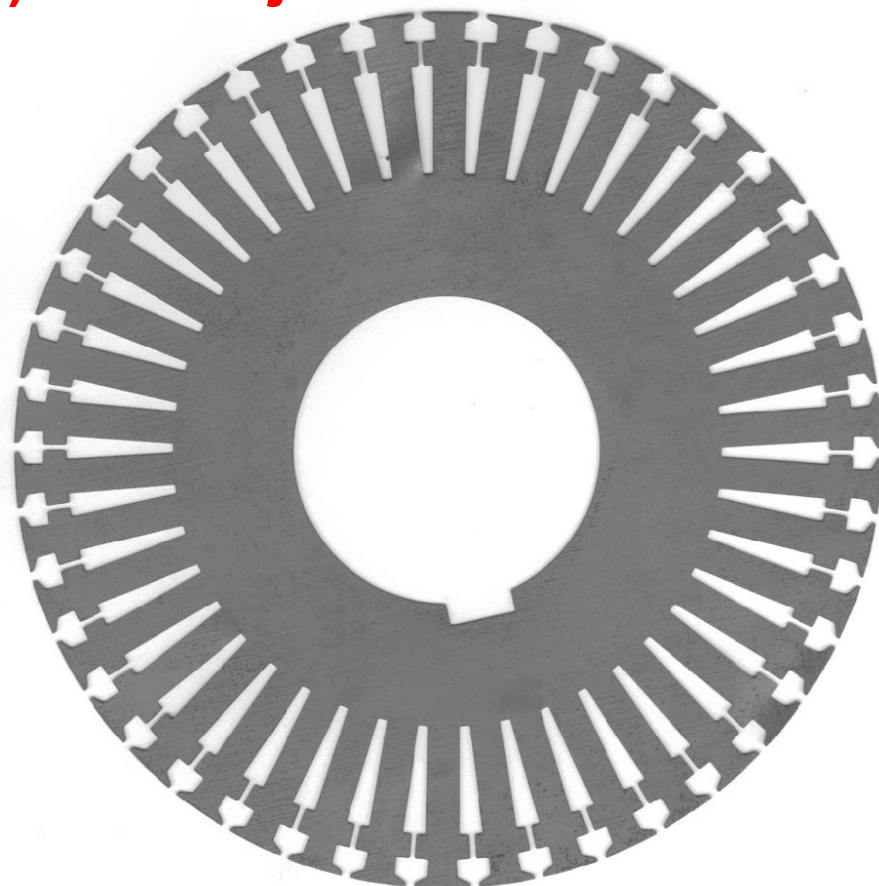
**Statorski paket (magnetnog kola) trofaznog asinhronog motora
pripremljen za ulaganje namota.**



Rotorski lim asinhronog kaveznog motora

a) aluminijumski dvo-kavezni rotor b)

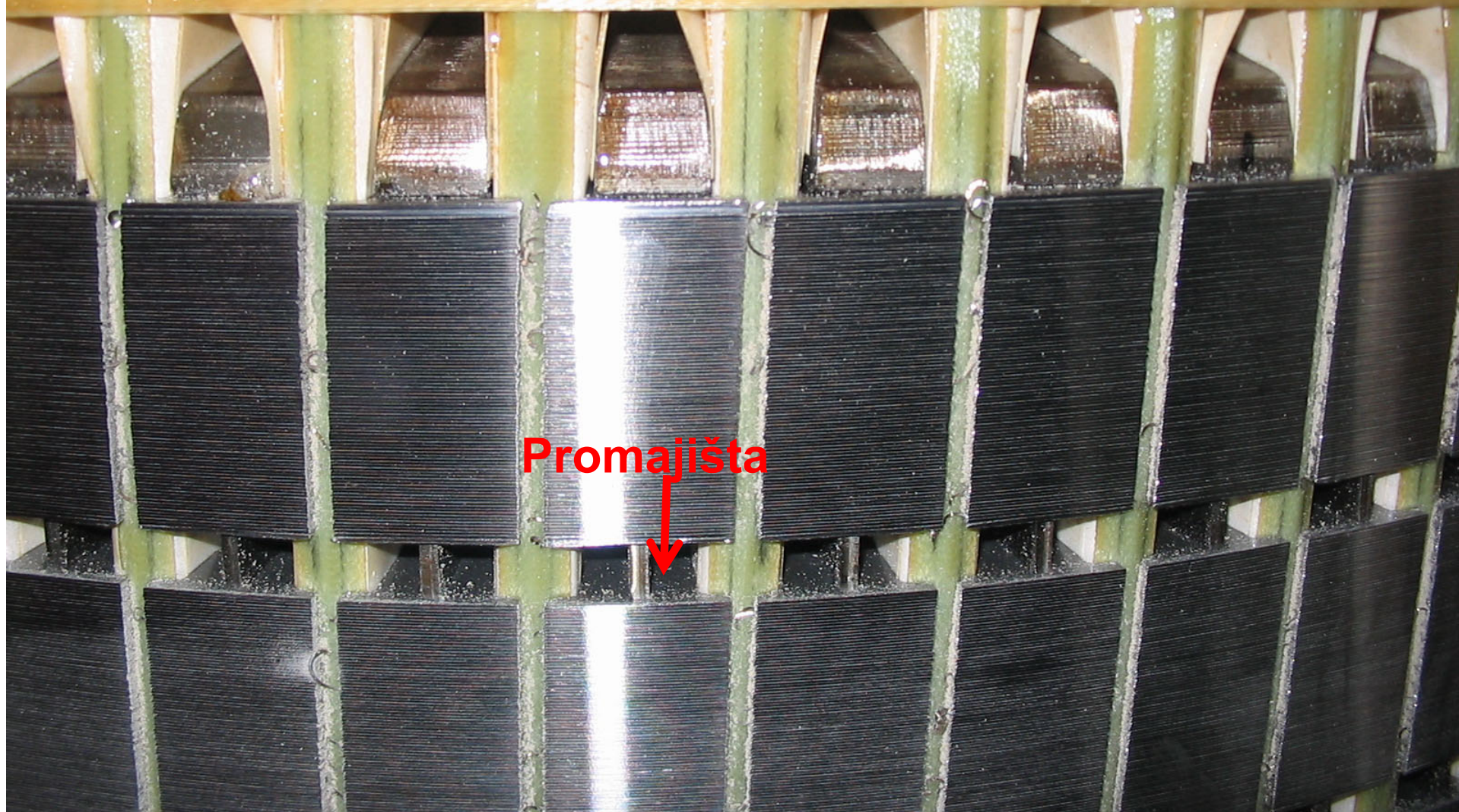
bakarni kavez



Magnetno kolo se izrađuje od neorijentisanog S_i feromagnetnog lim. Za učest. do 300Hz debljina limova je 0,5mm uz gubitke od 2-4W/kg pri 1T i 50Hz. Za veće učestanosti mora se koristiti tanji lim. Za učestanosti iznad 500Hz koriste se feritna jezgra.

Vazdušni zazor iznosi 0,2÷3mm i njegova minim. veličina je određena potrebnim mehaničkim tolerancijama. Veća vrednost odgovara AM od 1MW.

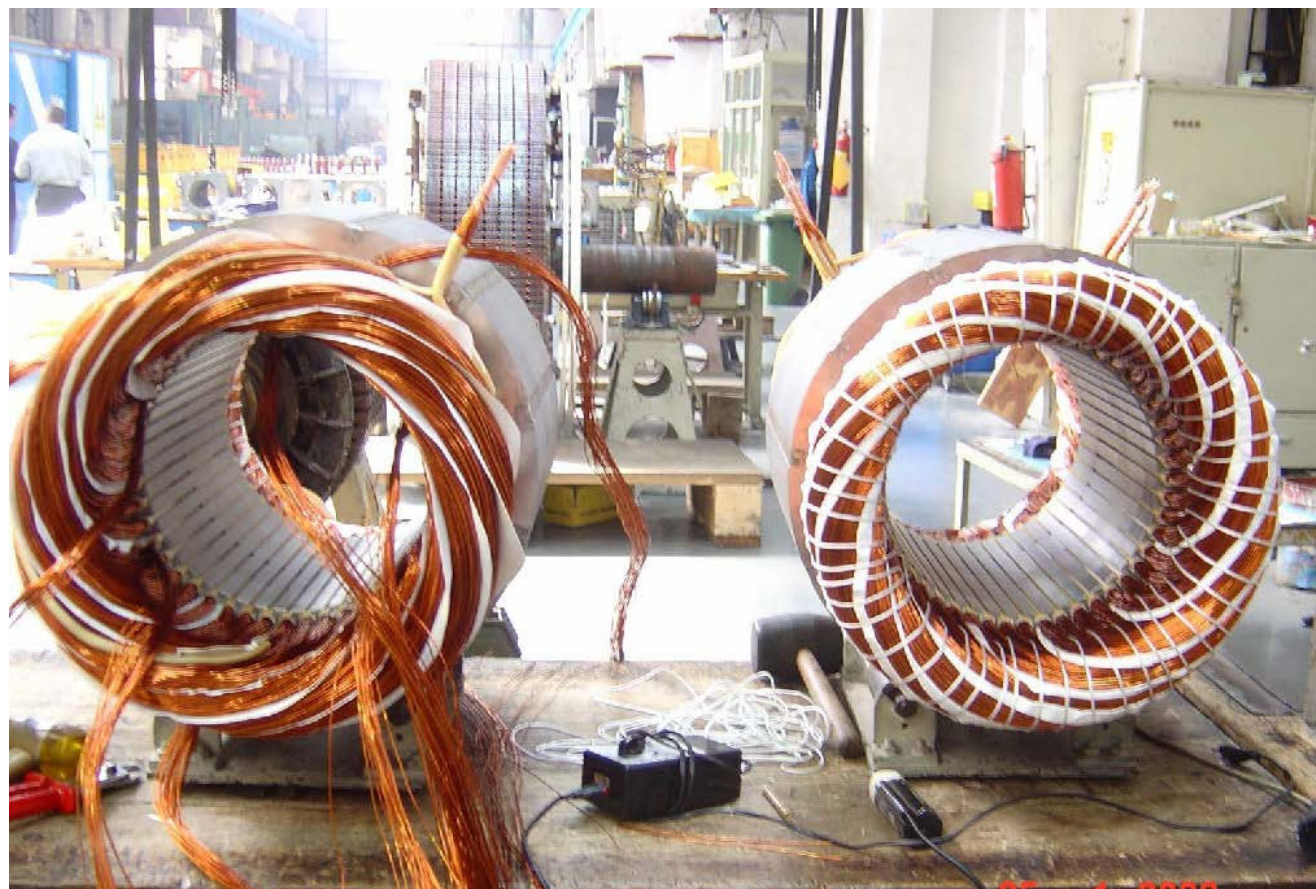
Da bi se magnetno kolo hladilo postavljaju se promajišta.

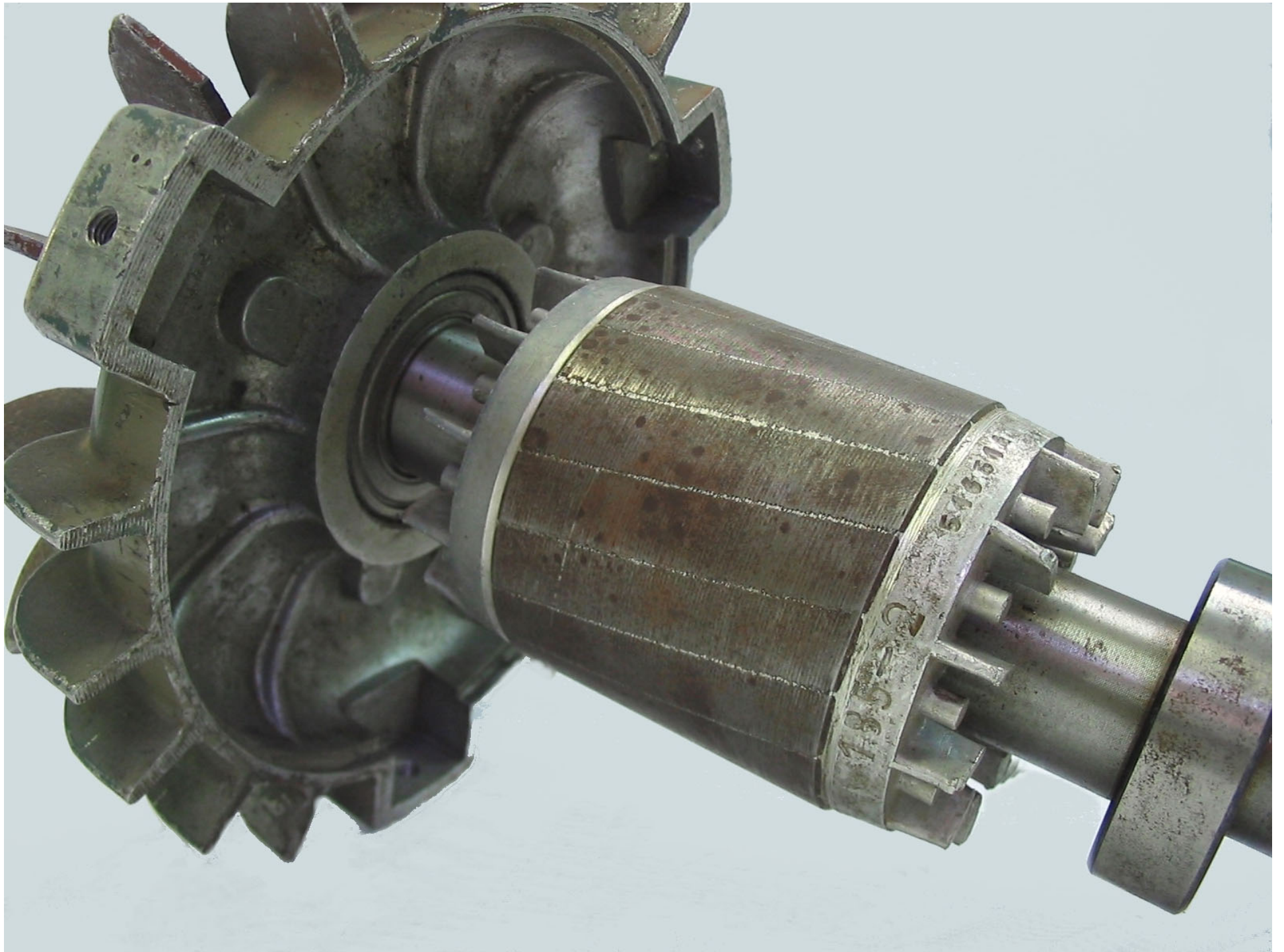




← Stator novog asinhronog motora za visoki napon (6 -10 kV, 50 Hz). VISOKONAPONSKI

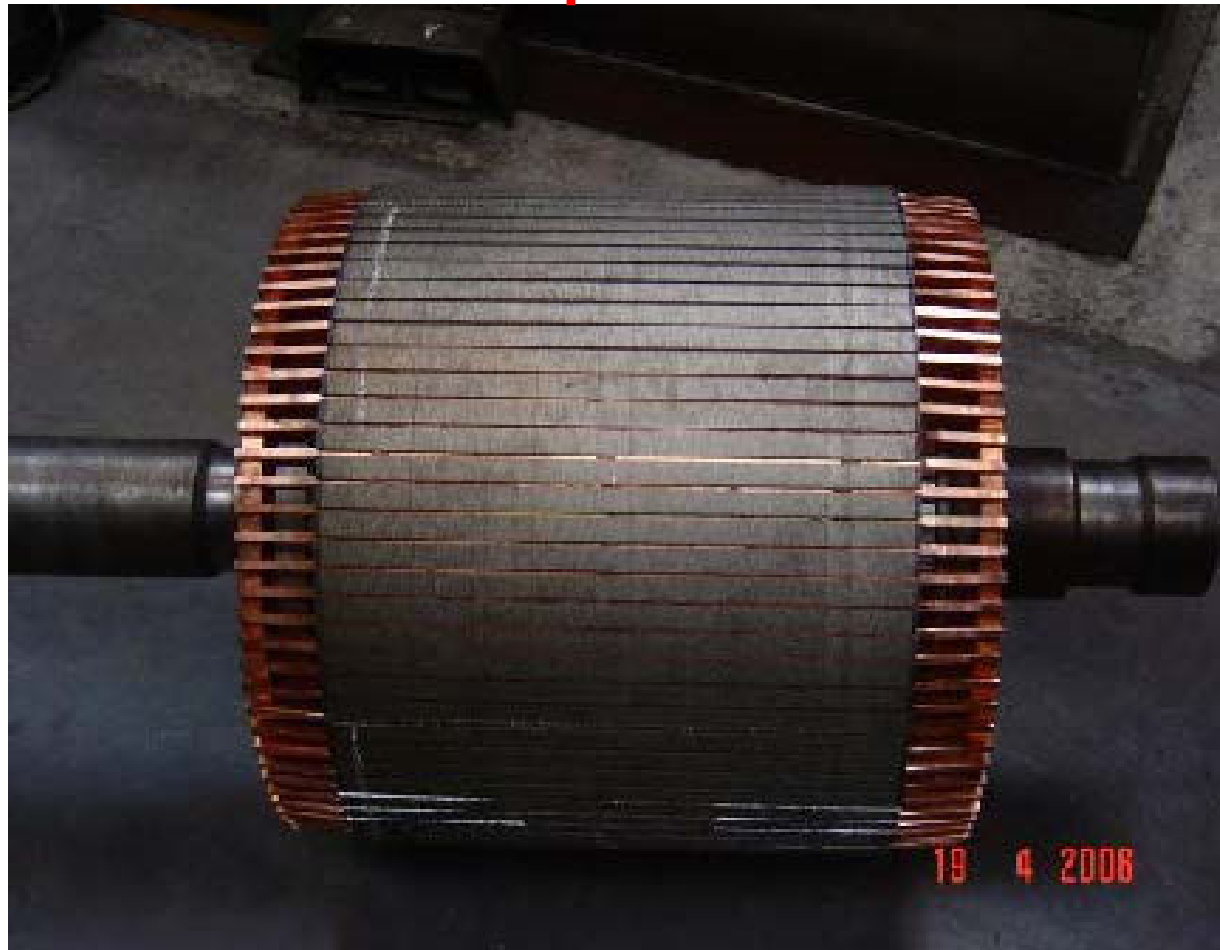
Ulaganje namota u statorski paket trofaznog asinhronog motora (400 V, 50 Hz). NISKONAPONSKI ↓







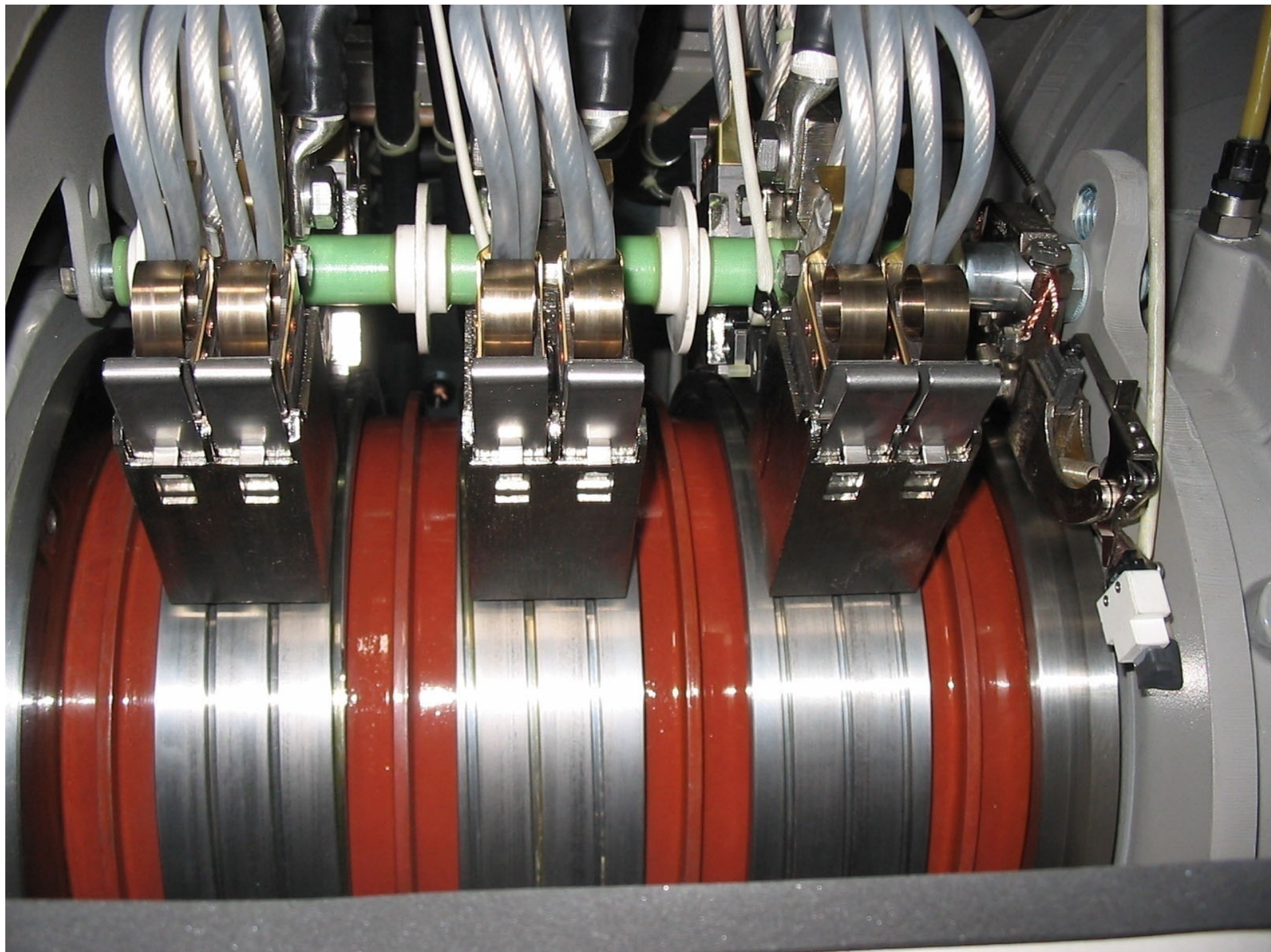
Kavezni rotor asinhronog motora sa ulaganim bakarnim štapovima

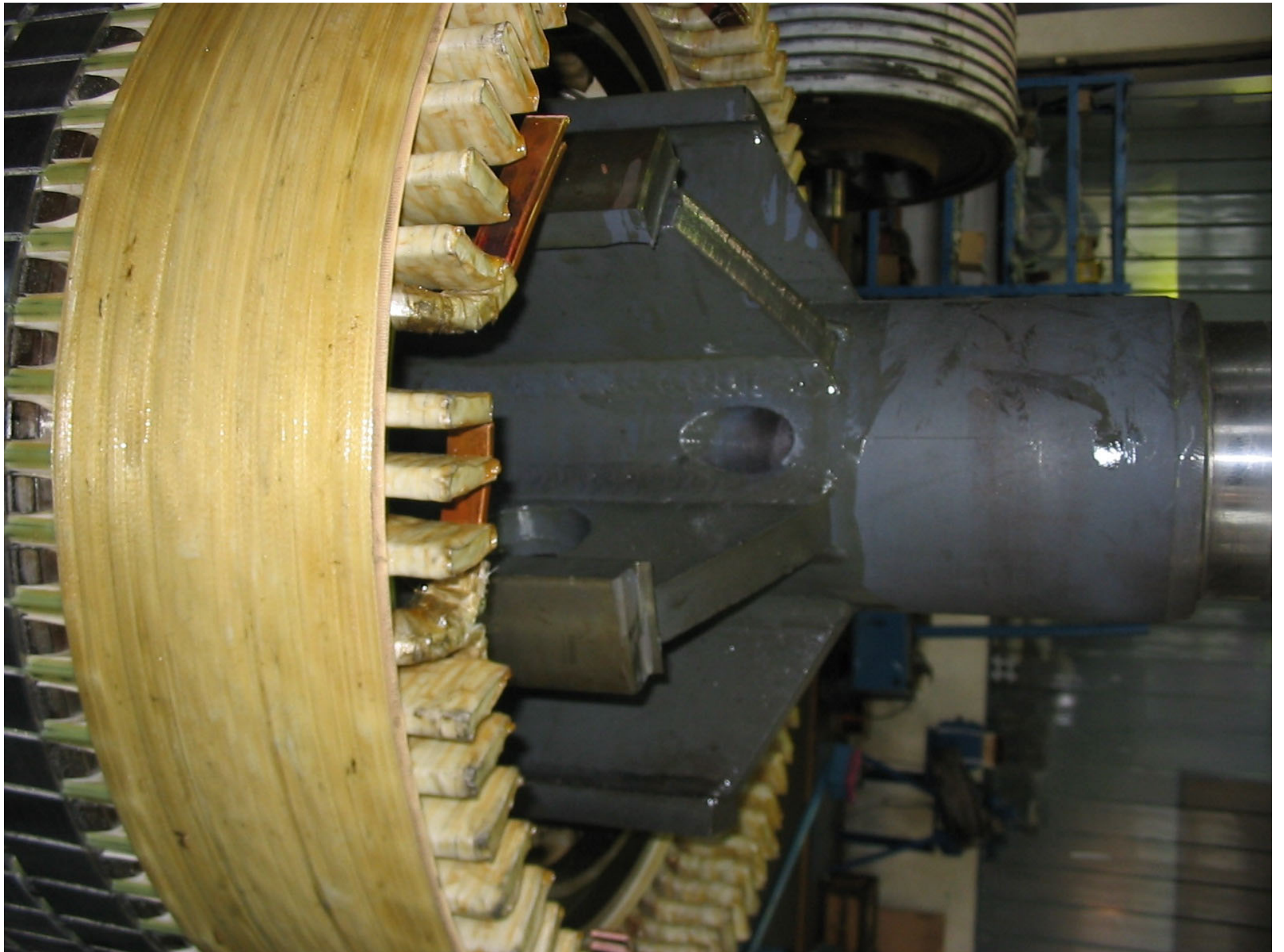


Kavez je od: aluminijuma (ulivanje) za više desetina kW, bakra (donji, radni) i bronzе (gornji, startni) za srednje i velike snage.





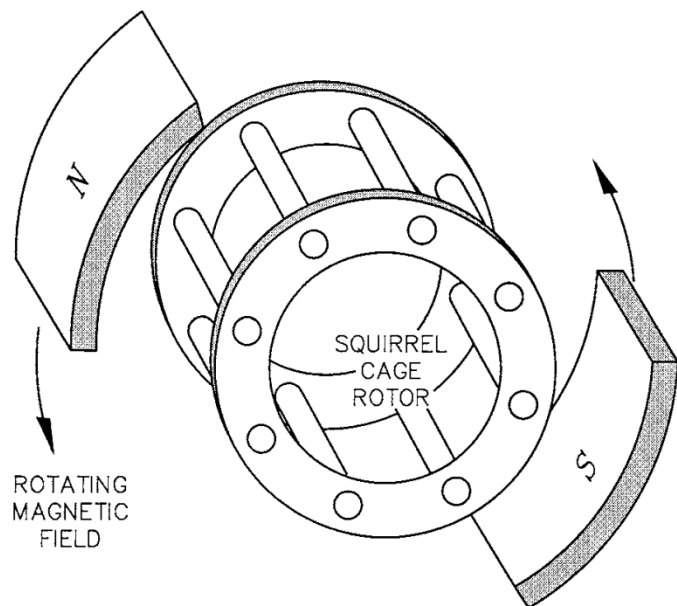








ASINHRONE MAŠINE - Princip rada



Obrtno magnetno polje stvoreno staterskim strujama obrće se sinhronom brzinom.

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p} \text{ o/min}$$

U namotaju rotora pod dejstvom obrtnog polja sa statora indukuje se elektromotorna sila. Ona potera struju kroz namotaj rotora koji se

nalazi u obrtnom polju. Usled čega se javi sila na provodnike rotora, pod čijim dejstvom rotor počinje da se kreće u smeru obrtnog polja.

Rezultat dejstva MPS (struje) u rotorskom namotaju i obrtnog magnetnog fluksa je momenat:

$$M = k \cdot \Phi \cdot I_r \cdot \cos \varphi_r$$

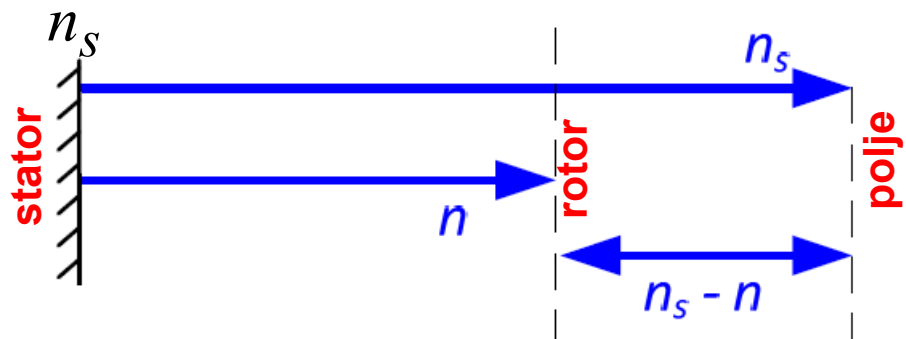
tj. magnetna polja statora i rotora privlače se uzajamno obrazujući obrtni momenat.

Struje rotorskog namotaja stvoriće svoje obrtno polje.

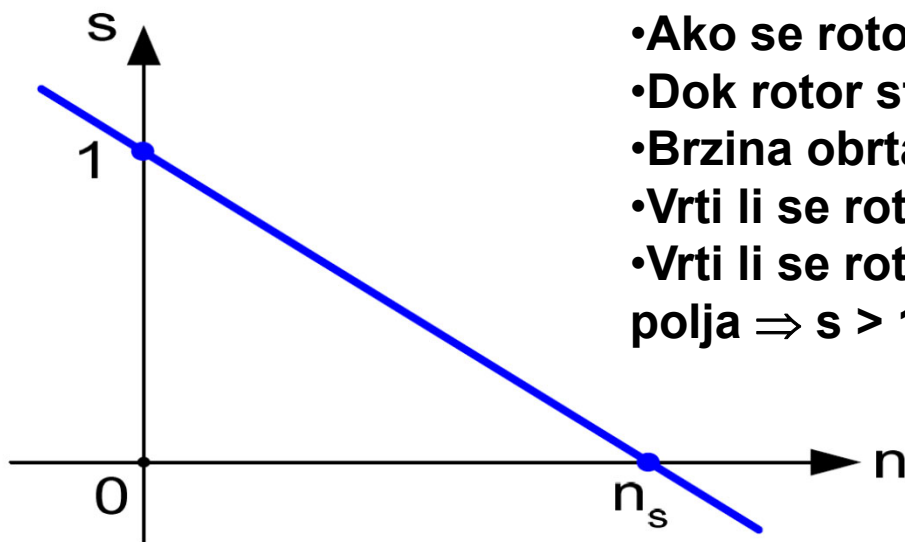
-Klizanje-

Klizanje: $s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{n_r}{n_s}$

p	1	2	3	4
n_s	3000	1500	1000	750



Klizanje u tehnički prihvatljivim iznosima mora biti sasvim mala veličina (zbog uticaja na gubitke energije) te se zbog toga iskazuje u %. Iznosi 0,1÷5%.



- Ako se rotor obrće sinhronom brzinom $\Rightarrow s = 0$
- Dok rotor stoji (zakočen) $\Rightarrow s = 1$
- Brzina obrtanje rotora manje od sinhronne $s > 0$ (**M**)
- Vrti li se rotor brže od obrtnog polja $\Rightarrow s < 0$ (**G**)
- Vrti li se rotor u suprotnu stranu ($n < 0$) od obrtnog polja $\Rightarrow s > 1$ (**AK**)

EKVIVALENTNA ŠEMA ASINHRONOG MOTORA

Neka je statorski trofazni namotaj priključen na mrežu trofaznog napona i neka rotor miruje. U rotorskom namotaju obrtno polje indukuje elektromotornu silu usled koje u rotorskom namotaju potekne struja. Indukovana EMS rotora u kratkom spoju:

$$E_{kr} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot N_r \cdot k_{nr}$$

Dok je rotor ukočen važi: $f_1 = s \cdot f_2 = f_2$

Kod motora sa namotanim rotorom ovo je EMS koja se meri na kliznim kolutovima dok rotor miruje, a prstenovi nisu kratko spojeni. Takvo merenje napona zove se i merenje prenosnog odnosa.

Rotorske struje stvaraju svoje obrtno polje, odnosno rotorski fluks:

- rasipni rotorski fluks
- zajednički fluks.

EKVIVALENTNA ŠEMA ASINHRONOG MOTORA

Proticanju struje kroz rotorski namotaj pod dejstvom elektromotorne sile E_{kr} suprotstavljaju se R_r i reaktansa rasipanja koja opisuje rasipni fluks:

$$X_{\gamma rk} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_{\gamma rk} = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot L_{\gamma rk}$$

Struja rotorskog namotaja je:

$$I_{rk} = \frac{E_{kr}}{\sqrt{R_r^2 + X_{\gamma rk}^2}}$$

EKVIVALENTNA ŠEMA ASINHRONOG MOTORA

Kada se rotor počne obrtati indukovana elektromotorna sila je srazmerna relativnoj brzini kretanja rotora u odnosu na obrtno polje:

$$E_r = 4,44 \cdot \Phi \cdot s \cdot f_2 \cdot N_r \cdot k_{nr} = s \cdot E_{kr}$$

Pri relativnoj brzini 0, tj. za $s=0$, nema napona u rotoru, nema struje, sile ni momenta pa motor ne može raditi pri tom klizanju. Samo pri različitim brzinama obrtanja **obrotnog polja** i **rotora** postoji indukovani napon, struje u rotoru i elektromagnetski momenat. Otud naziv asinhroni motor. Kada se **rotor počeo obrtati** tada je rotorska reaktansa rasipanja:

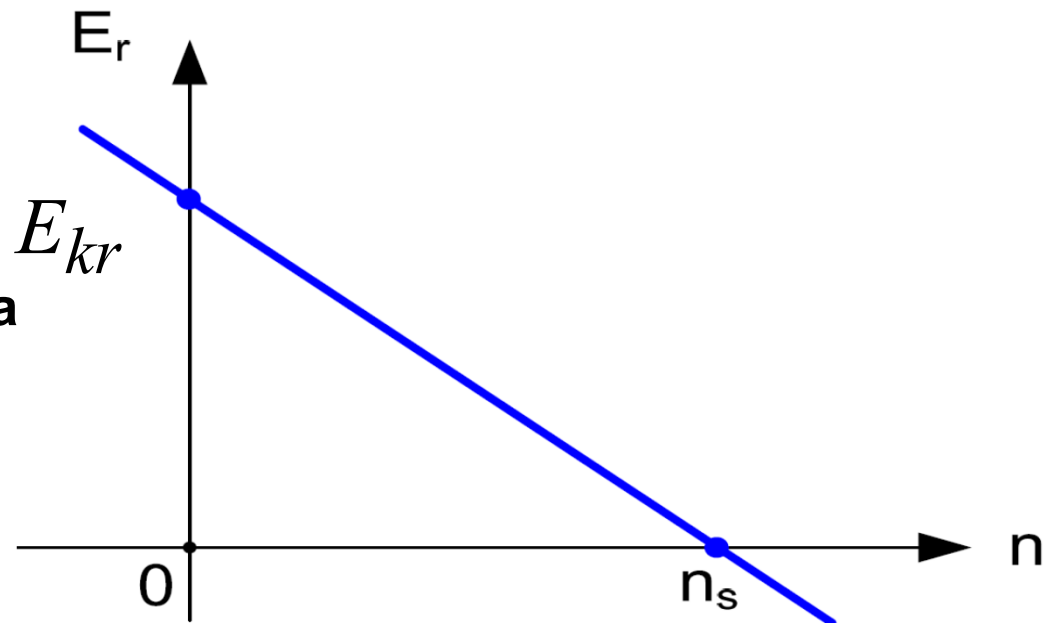
$$X_{\gamma r} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L_{\gamma r}$$

$$X_{\gamma r} = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot L_{\gamma rk} \cdot s$$

$$X_{\gamma r} = s \cdot X_{\gamma rk}$$

Indukovani napon i struja rotora imaju učestanost - **učestanost klizanja**:

$$f_1 = s \cdot f_2$$

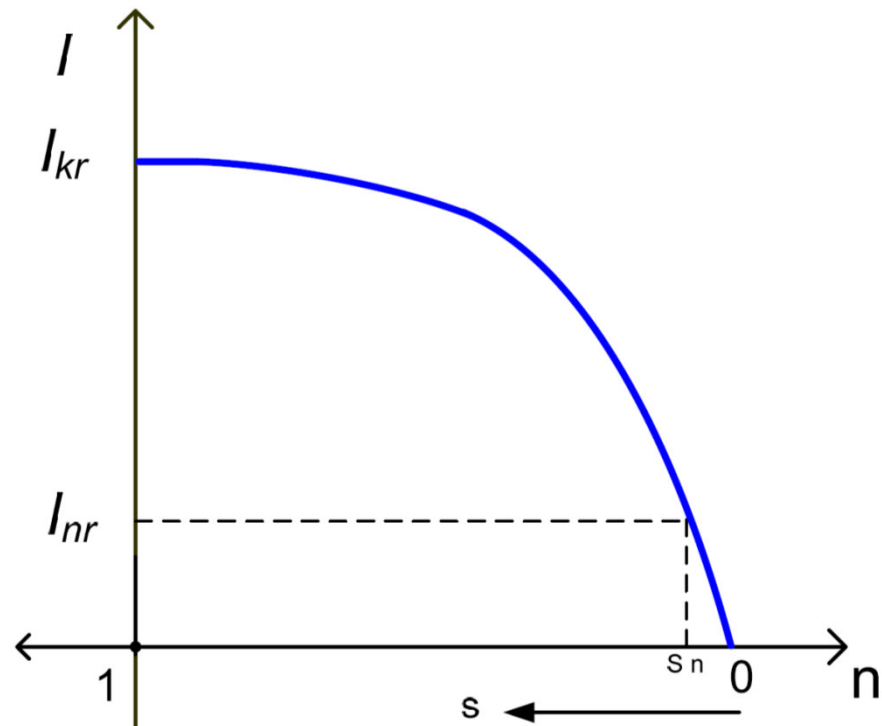


EKVIVALENTNA ŠEMA ASINHRONOG MOTORA

Kada se **rotor počeo obrtati** struja rotora je:

$$I_r = \frac{E_{kr}}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{rk}^2}}$$

$$I_r = \frac{E_r}{\sqrt{R_r^2 + X_{rk}^2}} = \frac{s \cdot E_{kr}}{\sqrt{R_r^2 + s^2 \cdot X_{rk}^2}}$$



Na osnovu prethodne jednačine moguće je napisati jednačinu u kompleksnom domenu koja opisuje naponsku ravnotežu jedne faze rotora.

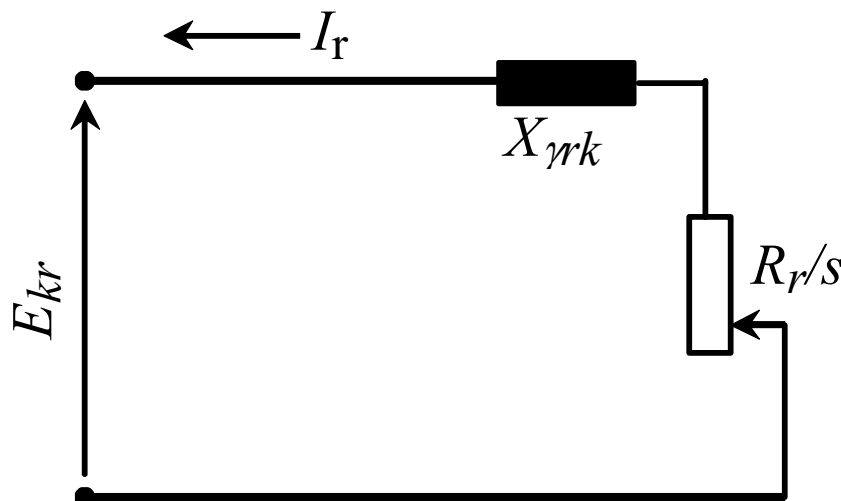
EKVIVALENTNA ŠEMA ASINHRONOG MOTORA

Jednačina naponske ravnoteže jedne faze rotora je:

$$-\hat{E}_r = R_r \cdot \hat{I}_r + js \cdot X_{\gamma rk} \cdot \hat{I}_r = -s \cdot \hat{E}_{kr}$$

$$-\hat{E}_{kr} = \frac{R_r}{s} \cdot \hat{I}_r + jX_{\gamma rk} \cdot \hat{I}_r$$

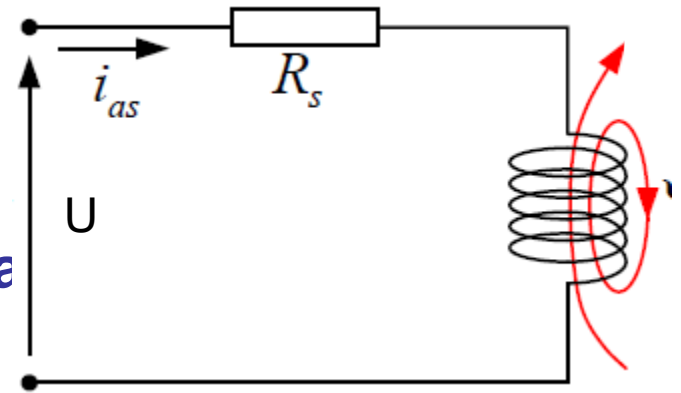
Ekvivalentna šema faze rotora:



EKVIVALENTNA ŠEMA ASINHRONOG MOTORA

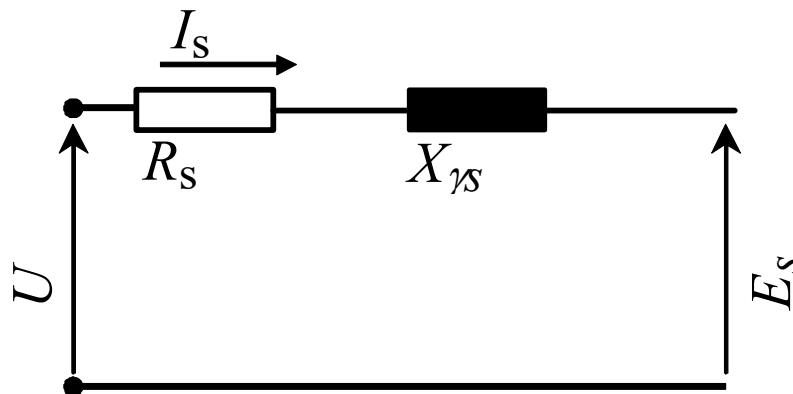
Struja statorskog namotaja određena je:

- nametnutim naponom statora
- omskom otpornošću statorskog namotaja
- reaktansom rasipanja statorskog namotaja
- indukovanom kontra elektromot. silom.



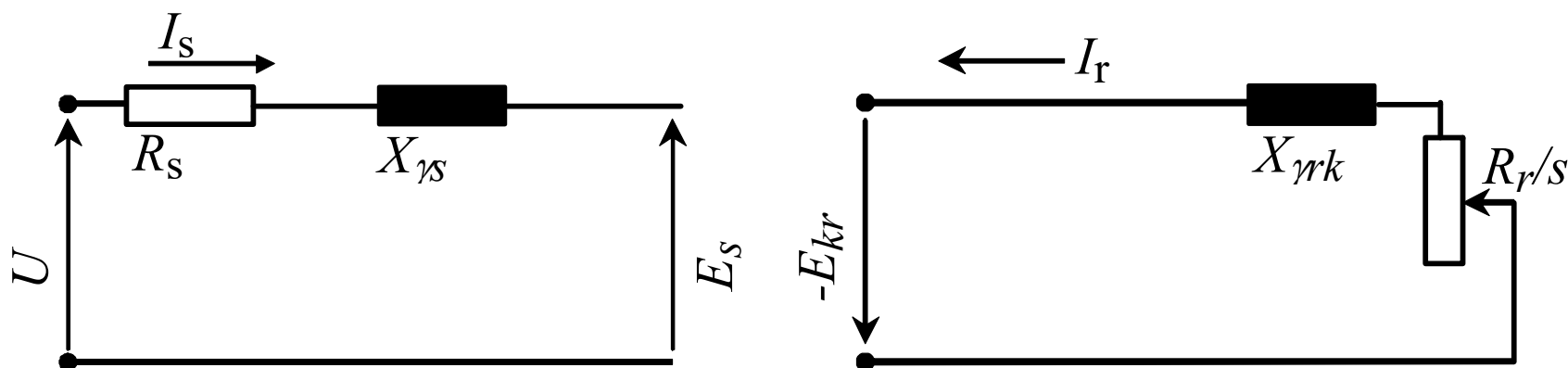
$$\hat{U}_s = R_s \cdot \hat{I}_s + jX_{\gamma s} \cdot \hat{I}_s + \hat{E}_s$$

Ekvivalentna šema faze statora:



EKVIVALENTNA ŠEMA ASINHRONOG MOTORA

Ekvivalentna šema faze statora i rotora asinhronog motora.



Ova dva kola su galvanski odvojena. Slično transformatoru asinhroni motor možemo prikazati ekvivalentnim električnim kolom, pa je u tom cilju potrebno svesti ekvivalentno kolo rotora na statorsku stranu.

EKVIVALENTNA ŠEMA ASINHRONOG MOTORA

Asinhroni motor u mirovanju ($s = 1$) možemo razmatrati i koristiti kao specijalnu izvedbu transformatora (zakretni transformator).

Indukovana elektromotorna sila statora (primara) je:

$$E_s = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_2 \cdot N_s \cdot k_{ns}$$

Kada se nađe količnik ove EMS i EMS rotora (sekundara):

$$E_{kr} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f_1 \cdot N_r \cdot k_{nr}$$

Dobija se prenosni odnos kojim se realizuje svođenje rotora na stator:

$$m = \frac{E_s}{E_{kr}} = \frac{f_2 \cdot N_s \cdot k_{ns}}{f_1 \cdot N_r \cdot k_{nr}} = \frac{N_s \cdot k_{ns}}{N_r \cdot k_{nr}}$$

gde su: N_s i N_r —brojevi navojaka po fazi statorskog i rotorskog namotaja, k_{ns} i k_{nr} — navojni sačinioči statorskog i rotorskog namotaja.

Za kavezni rotor navojni sačinilac je 1, a broj navojaka po fazi je 1/2.

EKVIVALENTNA ŠEMA ASINHRONOG MOTORA

Ako jednačinu naponske ravnoteže rotora svedemo na stator:

$$-\hat{E}_{kr} = \frac{R_r}{s} \cdot \hat{I}_r + jX_{rk} \cdot \hat{I}_r \quad \bigg/ \times m$$

$$-m \cdot \hat{E}_{kr} = \frac{m \cdot R_r}{s} \cdot \hat{I}_r + jm \cdot X_{rk} \cdot \hat{I}_r$$

$$-\hat{E}'_{kr} = \frac{m^2 \cdot R_r}{s} \cdot \hat{I}'_r + jm^2 \cdot X_{rk} \cdot \hat{I}'_r$$

$$-\hat{E}'_{kr} = \frac{R'_r}{s} \cdot \hat{I}'_r + jX'_{rk} \cdot \hat{I}'_r$$

Kako je: $E_S = m \cdot E_{kr} = E'_{kr}$

Dobija se:

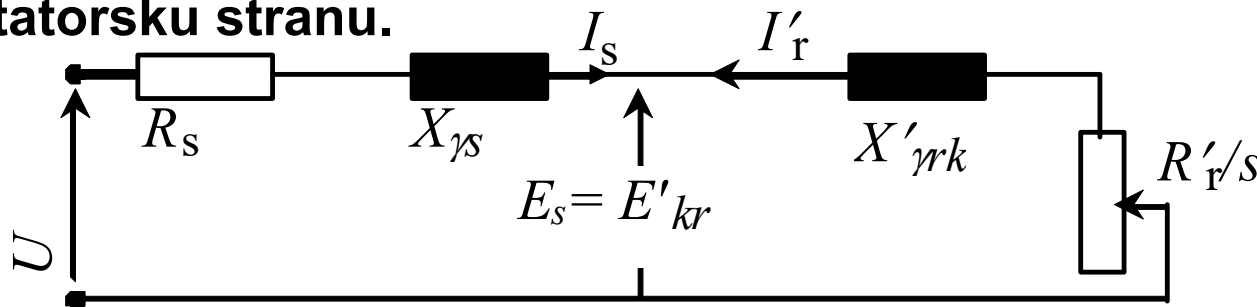
$$-\hat{E}_S = \left(\frac{R'_r}{s} + jX'_{rk} \right) \cdot \hat{I}'_r$$

EKVIVALENTNA ŠEMA ASINHRONOG MOTORA

I kada se uvaži

$$\hat{U}_s = (R_s + jX_{\gamma s}) \cdot \hat{I}_s + \hat{E}_s$$

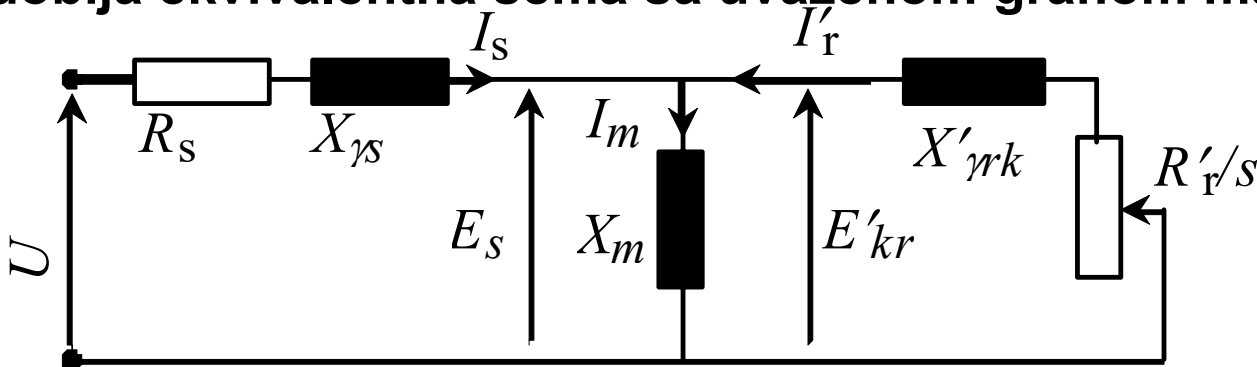
Dobija se ekvivalentna šema asinhrone mašine sa svedenim rotorskim kolom na statorsku stranu.



E_s može se izraziti preko struje i impedanse magnećenja:

$$\hat{E}_s = \hat{Z}_m \cdot \hat{I}_m = jX_m \cdot \hat{I}_m \quad X_m = \omega_s \cdot L_m \quad \hat{I}_m = \hat{I}_s + \hat{I}'_r$$

Tada se dobija ekvivalentna šema sa uvaženom granom magnećenja:



Struje, snage i momente asinhrone mašine možemo računati upotrebom ekvivalentne šeme za bilo koje stacionarno pogonsko stanje.

EKVIVALENTNA ŠEMA ASINHRONOG MOTORA

Kada je AM u praznom hodu $s=0$ pa sledi da je I_m jednaka struji praznog hoda. Kako u praznom hodu nema el.mehaničke konverzije (osim onog dela kojim se pokrivaju mehanički gubici i koji se mogu zanemariti) to znači da je struja statora u praznom hodu pretežno reaktivna radi obezbeđenja potrebne reaktivne energije za magnećenje magnetnog kola.

Reaktansa i struja magnećenja opisuju reaktivnu energiju potrebnu za magnećenje magnetnog kola.

U AM postoje statorsko i rotorsko obrtno polje. Njihov vektorski zbir predstavlja resultantno polje u mašini. Statorskom i rotorskom obrtnom polju odgovara statorski i rotorski fluks. Manji deo ovih flukseva se rasipa oko namota (zatvara se samo oko jednog namota). Ovi fluksevi su opisani induktivnostima (reaktansama) rasipanja. Veći deo fluksa obuhvata (prožima) namote statora i rotora → zajednički fluks (fluks magnećenja)- ψ_m . Zajednički fluks potiče od ukupnog delovanja zbira struja statora i rotora, to je fluks koji postoji u vazdušnom zazoru i uzrokovan je strujom magnećenja- I_m . I_m je ekvivalentna struja kojom se opisuje nastanak zajedničkog fluksa. L_m povezuje zajednički fluks i I_m .

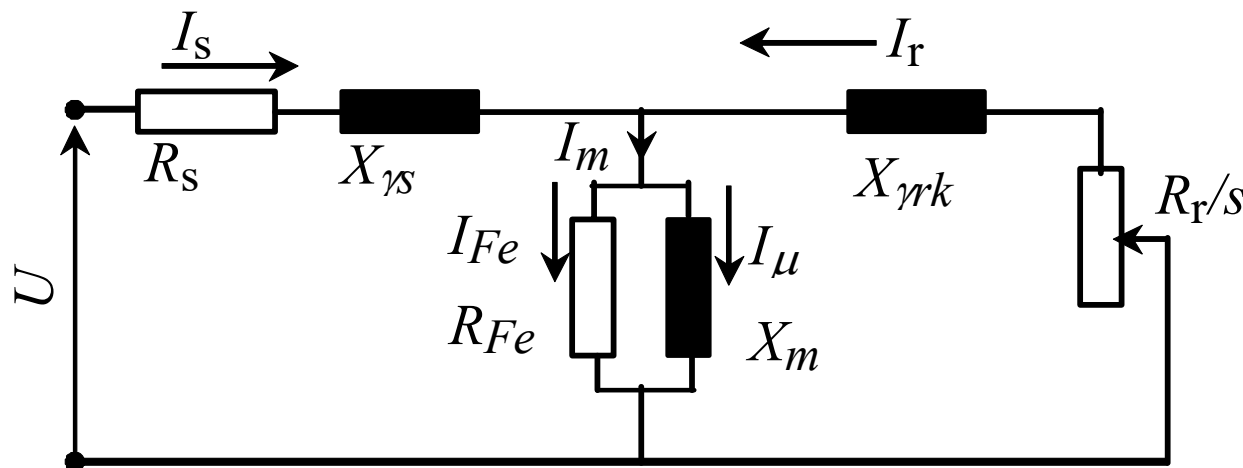
EKVIVALENTNA ŠEMA ASINHRONOG MOTORA

Fluksevi statora i rotora:

$$\hat{\psi}_s = \hat{\psi}_{\gamma s} + \hat{\psi}_m \quad \hat{\psi}_{\gamma s} = L_{\gamma s} \cdot \hat{I}_s \quad \hat{\psi}_m = L_m \cdot \hat{I}_m$$

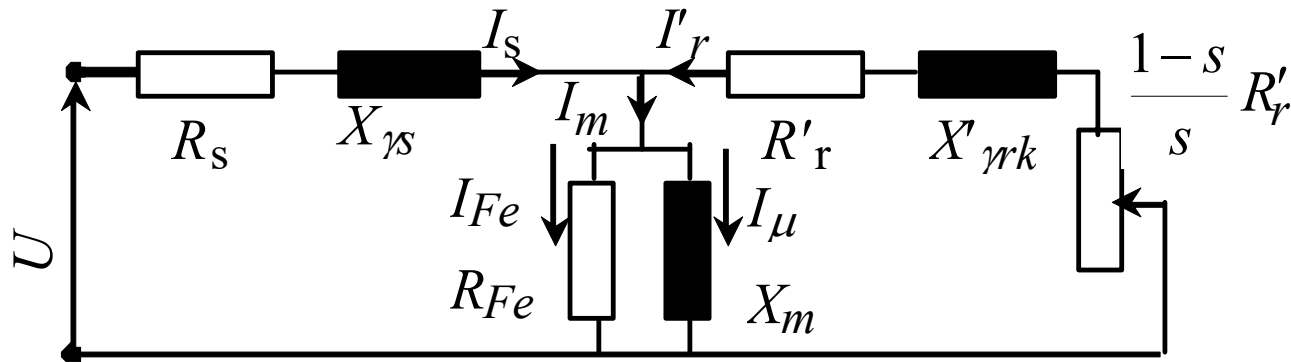
$$\hat{\psi}_r = \hat{\psi}_{\gamma r} + \hat{\psi}_m \quad \hat{\psi}_{\gamma r} = L_{\gamma r} \cdot \hat{I}_r \quad \hat{E}_s = j\omega \cdot \hat{\psi}_m = j\omega \cdot L_m \cdot \hat{I}_m$$

Gubici u Fe se ne mogu opisati jednostavno već se **ekvivalentiraju** omskim otporom R_{Fe} u grani magnećenja. El.param. R_{Fe} se ekvivalentiraju gubici čija je priroda nastanka magnetna. Ekvivalentna šema asinhronog motora sa uvaženim gubicima u Fe:



Ako se razdvoji snaga obrtnog polja koja se oslobađa na R_r/s na snagu **Džulovih gubitaka** u rotoru i **snagu konverzije** dobija se ekvivalentna šema asinhronog motora. Novo uvedeni parametar je fiktivan. ↓

ENERGETSKI BILANS



Izvedena ekv.šema opisuje jednu fazu AM. Prema ekv.šemi za stacionar. stanje: Motor iz mreže uzima: $P_s = 3U \cdot I_s \cdot \cos \varphi$

Na otpornosti statora se troši aktivna sanga: $g_{Cus} = 3R_s \cdot I_s^2$

U gvožđu statora se oslobađa aktivna sanga od: $g_{Fe} = 3 \frac{E_s^2}{R_{Fe}}$

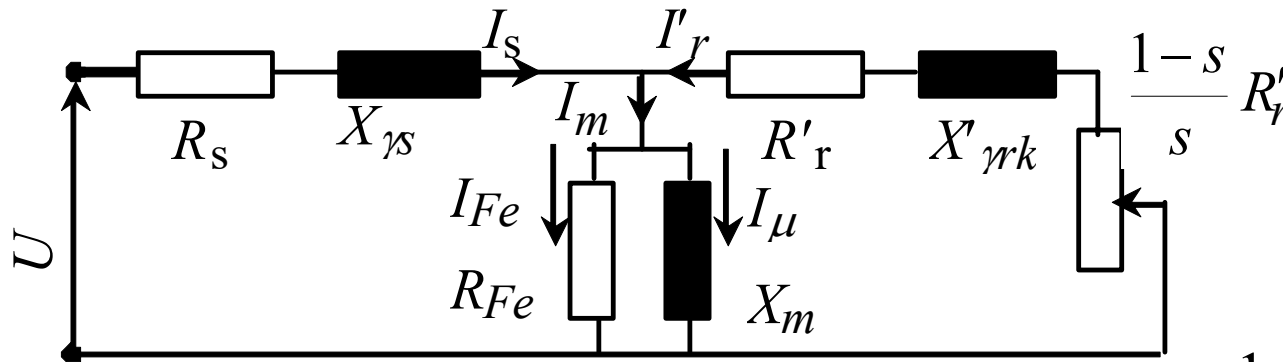
Snaga obrtnog polja: $P_{ob} = P_1 - g_{Cus} - g_{Fe} = 3 \frac{R'_r}{s} I_r'^2$

Na otpornosti se troši aktivna sanga: $g_{Cur} = 3R_r \cdot I_r'^2 = s \cdot P_{ob}$

Snaga konverzije: $P_c = P_{ob} - g_{Cur} = 3 \frac{1-s}{s} R'_r \cdot I_r'^2 = \frac{1-s}{s} \cdot g_{Cur}$

Razvijena mehanička snaga: $P_{meh} = P_c - g_{meh}$

ENERGETSKI BILANS



Mehanička snaga kada se zanemare g_{meh} : $P_{meh} = P_c = 3 \frac{1-s}{s} R'_r \cdot I_r'^2$

$$P_{meh} = (1-s) \cdot P_{ob}$$

Na otpornosti rotora se troši aktivna sanga: $g_{Cur} = 3 R_r \cdot I_r'^2 = s \cdot P_{ob}$

Električni gubici u rotoru direktno su proporcionalni klizanju, zbog toga klizanje mora biti što manje da bi se obezbedio prihvatljiv η . Klizanje je obično (0,5÷5%). Ilustracija:

Mali motori <20 kW;

$$s = 3 - 5\%$$

Srednji motori <500kW;

$$s = 1 - 1,5\%$$

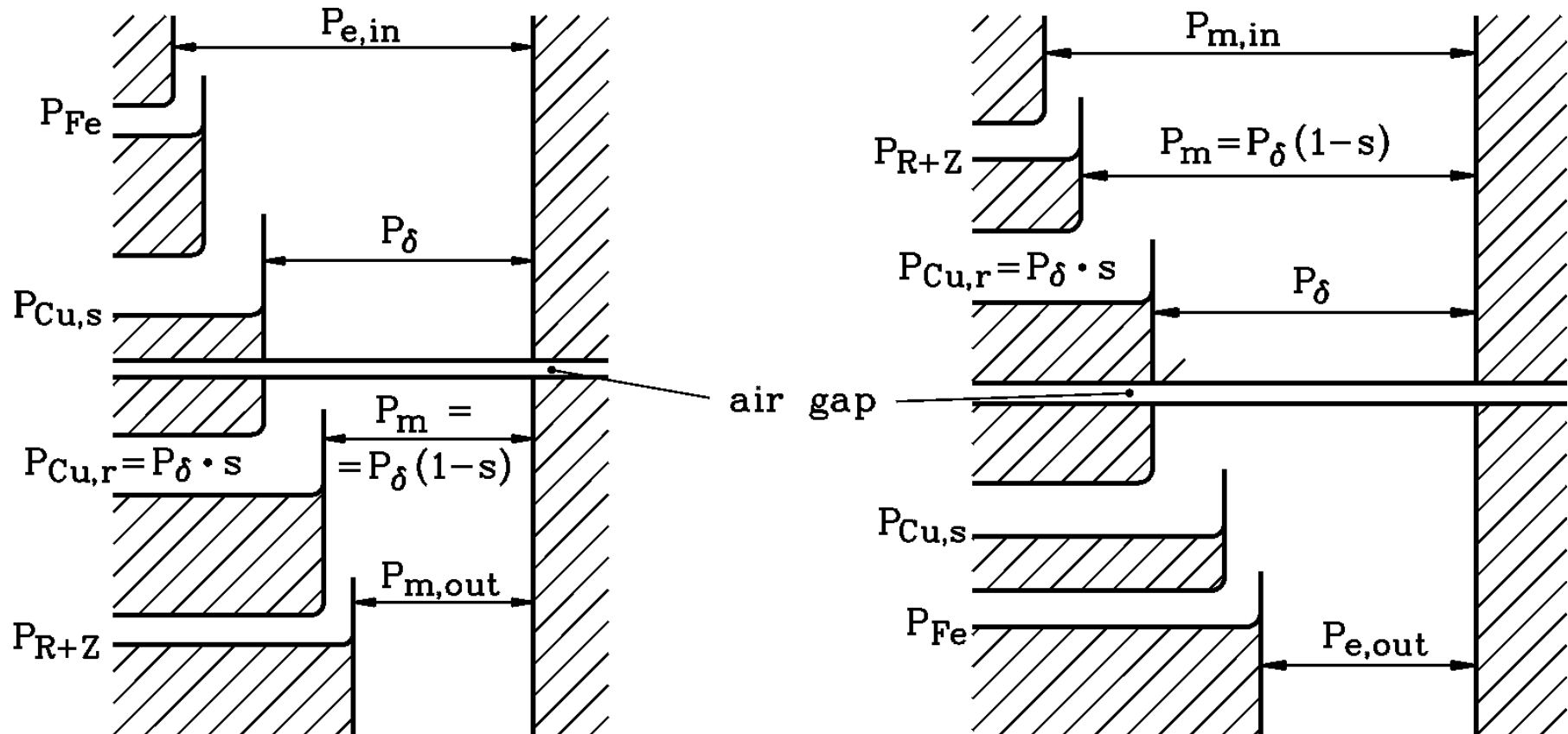
Veliki motori >500kW;

$$s = 0,5 - 1\%$$

Gubici u gvožđu rotora se mogu zanemariti zbog male frekvencije u rotoru.

ENERGETSKI BILANS

Šema energetskeg bilansa:



a) Motorski

b) Generatorski režim rada

BB1 PRAZAN HOD I KRATAK SPOJ ASINHRONE MAŠINE

To su dva krajnja stanja u pogledu opterećenja koja se protežu od potpune rasterećenosti u ph do mehaničke zakočenosti u stanju ks. U ovim stanjima asinhroni motor se nalazi tokom eksploatacije:

- Kratak spoj u trenutku uključanja,
- Prazan hod kada je motor neopterećen.

Ali to su i dva karakteristična ogleda koji omogućuju da se odrede parametri ekv. šeme i druge bitne k-ke AM.

U praznom hodu na vratilu motora **nema opterećenja**:

$$m_m = 0 \quad p_m = 0 \quad \eta = 0 \quad m_c = K_m \cdot \omega_m$$

U ovom radnom režimu motor iz mreže uzima reaktivnu snagu potrebnu za magnećenje feromagnetnog jezgra i vazdušnog zazora. Ova energija je slabo zavisna od opterećenja. Motor uzima aktivnu snagu da pokrije gubitke praznog hoda. Brzina je bliska sinhronoj, a $s \approx 0$. AM uzima aktivnu snagu da pokrije gubitke praznog hoda:

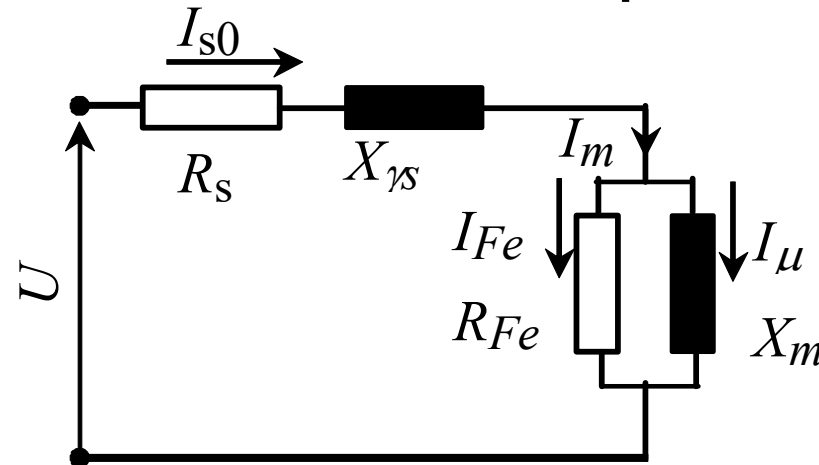
$$P_0 = P_{ulazno} = g_{Cus0} + g_{Fes0} + g_m$$

$$g_{Cus0} = 3 \cdot R_s I_{s0}^2$$

$$g_{Fes0} = 3 \cdot R_{Fe} I_{Fe}^2$$

PRAZAN HOD I KRATAK SPOJ ASINHRONE MAŠINE

Ekvivalentna šema asinhrone mašine u praznom hodu:



Ekv. šema ne uzima u obzir g_m tako da je ulazna snaga u ovu $\frac{P_0 - g_m}{3}$ ekv. šemu:

Faktor snage praznog hoda je mali i tipično iznosi 0,1 jer je aktivna snaga mala dok je reaktivna gotovo kao u nominalnom režimu.

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3U_f I_{s0}}$$

Struja praznog hoda je $0,3 \div 0,8 I_n$. Za motore velike snage struje ph su relativno manje. Zbog postojanja vazdušnog zazora relativna struja ph AM je veća nego kod TR.

PRAZAN HOD I KRATAK SPOJ ASINHRONE MAŠINE

U ogledu ph mere se napon, struja i uzeta električna snaga. Napon u ogledu ph je stalne učestanosti i menja se u intervalu $0,5 \div 1,2 U_n$.

Dijagram **struje** i **snage** praznog hoda u zavisnosti od napona.

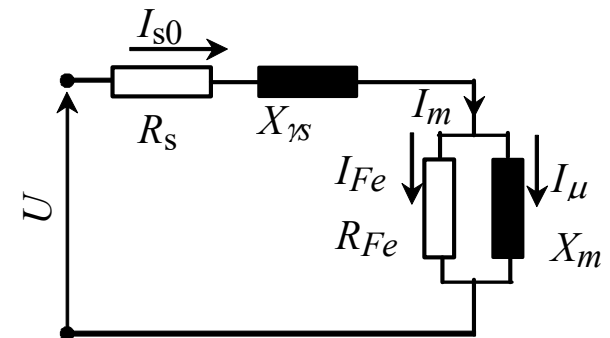
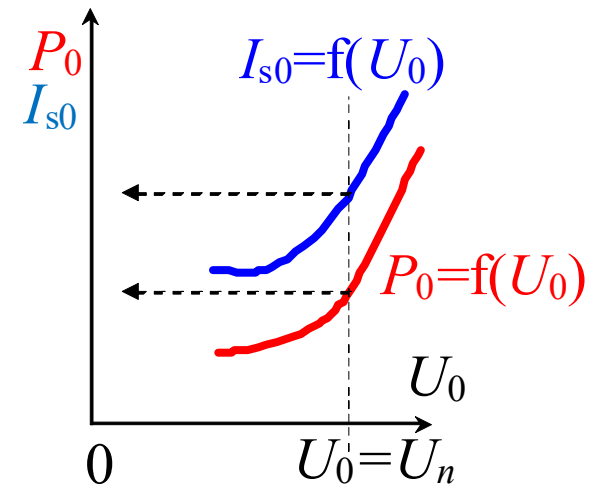
Iz ogleda praznog hoda može se doći do parametara grane magnećenja u ekvivalentnoj šemi:

$$U_n, \quad I_{s0}, \quad \cos \varphi_0, \quad g_{Fes}$$

$$R_{Fe} = \frac{3U_{nf}^2}{g_{Fes}}$$

$$I_{Fe} = \frac{U_{nf}}{R_{Fe}}$$

$$X_m = \frac{U_n}{I_\mu} = \frac{U_n}{I_{s0} \sin \varphi_0}$$



PRAZAN HOD I KRATAK SPOJ ASINHRONE MAŠINE

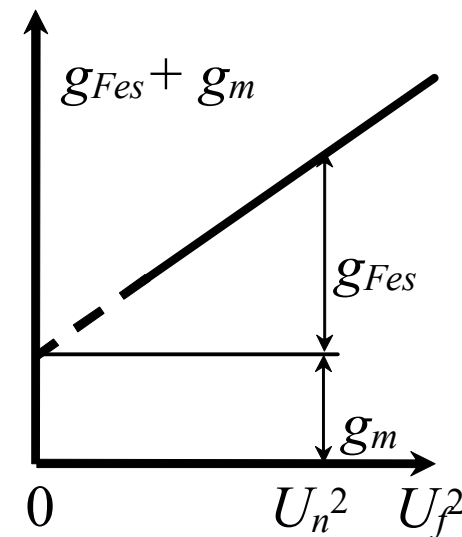
Otpornost namotaja statora se meri nekom standardnom metodom tako da se može izračunati:

$$g_{Fes} + g_m = P_0 - 3R_s \cdot I_{s0}^2$$

Kako je učestanost napajanja stalna može se smatrati da je i brzina obrtanja približno stalna. Mehanički gubici u ogledu praznog hoda su stalni. Brzina praznog hoda je jednaka sinhronoj brzini.

Gubici u gvožđu odvajaju se grafičkom metodom od mehaničkih. Tipična vrednost odnosa ovih gubitaka je:

$$\frac{P_{Fe}(U_f = U_{fn})}{g_m} = 3$$



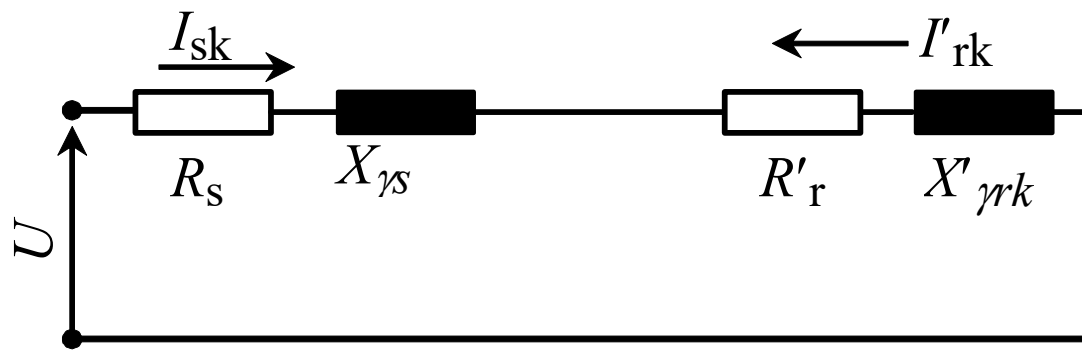
PRAZAN HOD I KRATAK SPOJ ASINHRONE MAŠINE

Tokom ogleda kratkog spoja rotor je ukočen ($s=1$). Ogled se izvodi sa sniženim naponom napajanja i nominalnom strujom statora.

$$p_m = 0 \quad p_c = 0 \quad \eta = 0 \quad m_c \neq 0$$

Kako se ogled izvodi sa sniženim naponom to se gubici u gvožđu mogu zanemariti, a i reaktivan energija koja se povlači.

Moguće je izostaviti granu magnećenja u ekvivalentnoj šemi za kratak spoj.



PRAZAN HOD I KRATAK SPOJ ASINHRONE MAŠINE

Ulazna snaga u mašinu i faktor snage su:

$$P_k = 3U_k I_{sk} \cos \varphi_k \qquad \cos \varphi_k = \frac{P_k}{3U_k I_{sk}}$$

Faktor snage u kratkom spoju ima tipično vrednost između 0,4 i 0,6.

Ulazna snaga pokriva Džulove gubitke u rotorskom i statorskom namotaju. Iz snage kratkog spoja može se odrediti ukupna otpornost statorskog i rotorskog namotaja.

$$P_k = g_{Cusk} + g_{Curk} = 3(R_s + R'_r)I_{sn}^2$$

Ako se statorska otpornost prethodno izmeri moguće je odrediti svedenu otpornost rotorskog namotaja.

$$R'_r = \frac{P_k}{3I_{sn}^2} - R_s$$

PRAZAN HOD I KRATAK SPOJ ASINHRONE MAŠINE

Prema ekvivalentnoj šemi moguće je odrediti vrednost ukupne reaktanse rasipanja:

$$X_{\gamma s} + X'_{\gamma rk} = \sqrt{\left(\frac{U_{fk}}{I_{sn}}\right)^2 - (R_s + R'_r)^2}$$

Može se smatrati da je:

$$X'_{\gamma rk} \approx X_{\gamma s}$$

Asinhroni motor koji se pokreće iz stanja mirovanja, kreće iz stanja kratkog spoja. Ovaj kratak spoj traje vrlo kratko. U tom kratkom vremenskom intervalu javlja se struja (struja polaska) koja višestruko nadmašuje nominalnu vrednost. Struja polaska iznosi od 3 do 5 I_n , a za pojedine motore i do 8 I_n .

Vrednosti parametara ekv.šeme AM dobijeni iz ogleda praznoga hoda i kratkog spoja su **približne** (utjecaj zasićenja, promene otpornosti usled zagrevanja, uticaj potiskivanja struja kod kaveznih rotora) ali **dovoljno tačne za praktične proračune**.

MOMENAT KONVERZIJE ASINHRONE MAŠINE

Snaga obrtnog polja opisuje elektromagnetnim putem prenetu energiju na rotor:

$$P_{ob} = P_1 - g_{Cus} - g_{Fe} = 3 \frac{R'_r}{s} I_r'^2$$

U rotoru se snaga gubi u bakru (namotaju) i gvožđu. Gubici u gvožđu rotora su zanemarivi jer je učestanost rotorskih struja mala. Snaga konverzije dobija se kao:

$$p_c = P_{ob} - g_{Cur} = 3 \frac{1-s}{s} R'_r \cdot I_r'^2$$

Korisna mehanička snaga:

$$p_m = p_c - g_m$$

Koeficijent korisnog dejstva:

$$\eta = \frac{p_m}{p_1}$$

MOMENAT KONVERZIJE ASINHRONE MAŠINE

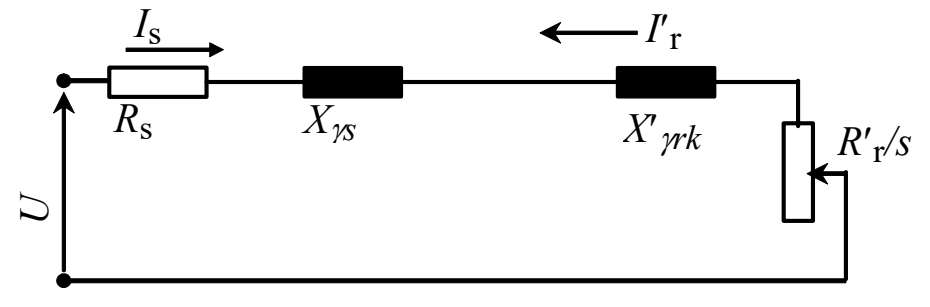
Moment konverzije je: $m_c = \frac{p_c}{\omega_m}$ $\omega_m = (1-s) \frac{\omega_s}{p}$

$$p_c = 3 \frac{1-s}{s} R'_r \cdot I_r'^2$$

$$\omega_s = 2\pi \cdot f_s$$

$$m_c = m_m = 3p \frac{1-s}{s} \cdot \frac{R'_r \cdot I_r'^2}{(1-s) \cdot \omega_s} = \frac{3p}{\omega_s} \cdot \frac{R'_r}{s} \cdot I_r'^2 = p \cdot \frac{P_{ob}}{\omega_s}$$

Iz ekvivalentne šeme asinhronog motora struja rotora je:

$$I_r' = \frac{U}{\sqrt{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{js} + X'_{rk})^2}}$$


Momenat konverzije: $m_c = m_m = \frac{3 \cdot p}{2\pi \cdot f_s} U^2 \frac{\frac{R'_r}{s}}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{js} + X'_{rk})^2}$

MOMENAT KONVERZIJE ASINHRONE MAŠINE

Ako se uzme potpuna ekv. šema dobija se tačniji izraz za mc. Struja rotora:

$$I'_r = \frac{U}{\sqrt{\left(R_s + \sigma_1 \cdot \frac{R'_r}{s}\right)^2 + \left(X_{\gamma s} + \sigma_1 \cdot X'_{\gamma rk}\right)^2}}$$

Faktor rasipanja $\sigma_1 = 1 + \frac{X_{\gamma s}}{X_m} \approx 1,02 \div 1,08$

Momenat konverzije – **Momentna (statička) karakteristika AM:**

$$m_c = m_m = \frac{3 \cdot p}{2\pi \cdot f_s} U^2 \frac{\frac{R'_r}{s}}{\left(R_s + \sigma_1 \frac{R'_r}{s}\right)^2 + \left(X_{\gamma s} + \sigma_1 X'_{\gamma rk}\right)^2}$$

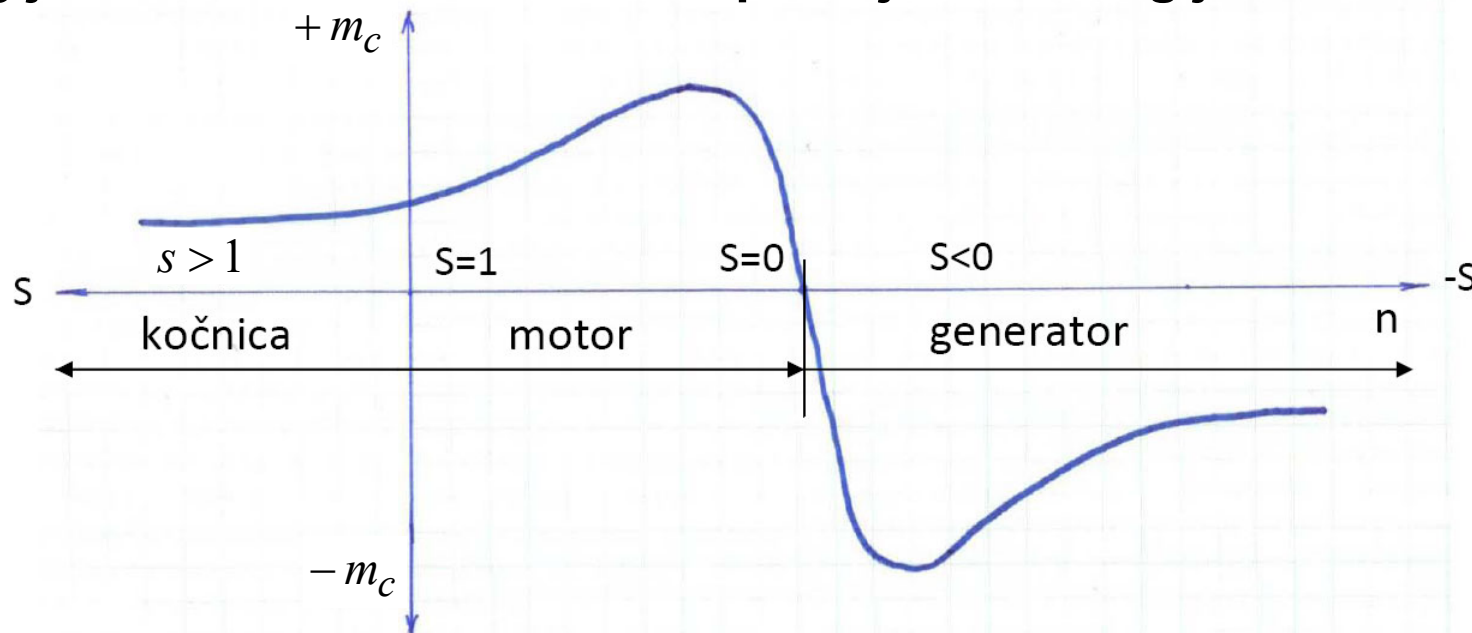
Polazni momenat (*potezni, momenat kratkog spoja, starting torque*) motora:

$$M_{pol} = m_c(s=1) = \frac{3 \cdot p \cdot U^2}{2\pi \cdot f_s} \frac{R'_r}{\left(R_s + \sigma_1 \cdot R'_r\right)^2 + \left(X_{\gamma s} + \sigma_1 \cdot X'_{\gamma rk}\right)^2}$$

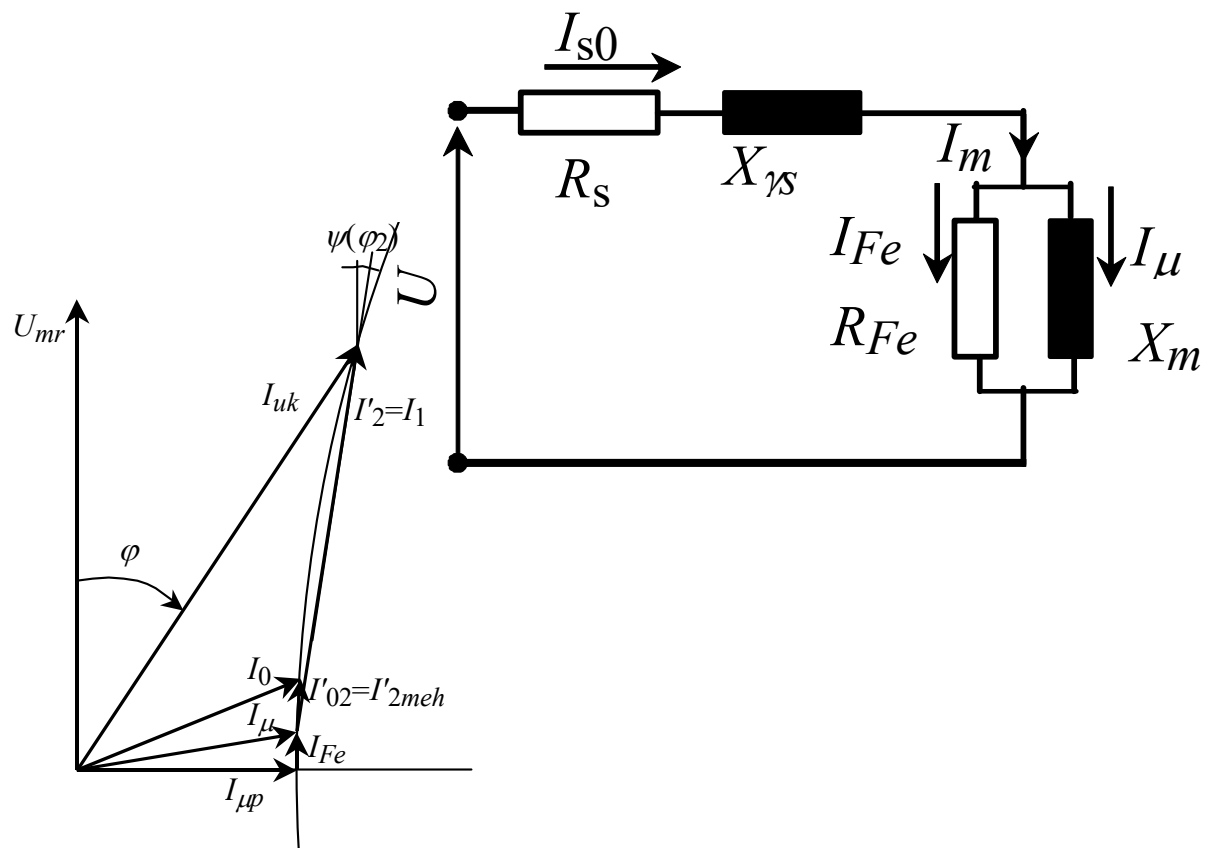
MOMENTNA KARAKTERISTIKA ASINHRONE MAŠINE

Karakteristična područja:

- od $s = 1$ do $s = 0$ motorsko područje rada, energija se uzima iz mreže,
- za $s \leq 0$ generatorski režim rad, energija se vraća u mrežu
- za $s \geq 1$ protivstrujno kočenje, energija se uzima iz mreže i kinetička energija radne mašine koči rotor i predaje mu energiju.



Momenat koji AM razvija pri svakoj brzini zavisi od kvadrata napona.



MOMENAT KONVERZIJE ASINHRONE MAŠINE

M_c je funkcija klizanja. Maksimalna vrednost momenta – **Prevalni momenat** se dobija pri **prevalnom klizanju** (*prekretno, breakedown slip*):

$$\frac{dm_c}{ds} = 0 \Rightarrow s_p = \pm \frac{\sigma_1 \cdot R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_{js} + \sigma_1 \cdot X'_{rk})^2}} \approx \pm \frac{R'_r}{X_{js} + X'_{rk}}$$

Prevalni momenat (*prekretni, breakedown, maksimalni*):

$$M_p = m_c(s = s_p) = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2\pi \cdot f_s \cdot \sigma_1} \cdot \frac{U^2}{\pm R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{js} + \sigma_1 X'_{rk})^2}}$$

$$M_p = m_c(s = s_p) = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2\pi \cdot f_s} \cdot \frac{U^2}{X_{js} + X'_{rk}}$$

Predznak (+) je za motorski a (-) za generatorski režim rada. M_p u gener. režimu je nešto veće po intezitetu nego u motorskom jer se u generator. režimu i g_{cus} moraju biti pokriveni sa snagom obrtnog polja, tj. treba nam veći elektromagnetni momenata nego u motorskom režimu.

MOMENAT KONVERZIJE ASINHRONE MAŠINE

U praksi koristimo analitičke izraze za momentnu k-ku poznate kao Klosove jednačine. **Klosovu** jednačinu dobijamo ako izraz za momenat podelimo sa izrazom za prevalni momenat:

$$\frac{m_c}{M_p} = \frac{2 + \beta}{\frac{s}{s_p} + \frac{s_p}{s} + \beta}; \quad \beta = \frac{2R_s}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\gamma s} + \sigma_1 \cdot X'_{\gamma rk})^2}} \approx 2 \cdot s_p$$

Za manje tačna računanja (usvojimo $R_s \approx 0$) može se koristiti pojednostavljena Klosova jednačina.

$$\frac{m_c}{M_p} = \frac{2}{\frac{s}{s_p} + \frac{s_p}{s}}$$

Preopteretivost se definiše kao: $\nu = \frac{M_p}{m_c}$

Tada je rešenje Klosove jednačine:

$$s = s_p \left(\nu - \sqrt{\nu^2 - 1} \right) \quad s_p = s \left(\nu + \sqrt{\nu^2 - 1} \right)$$

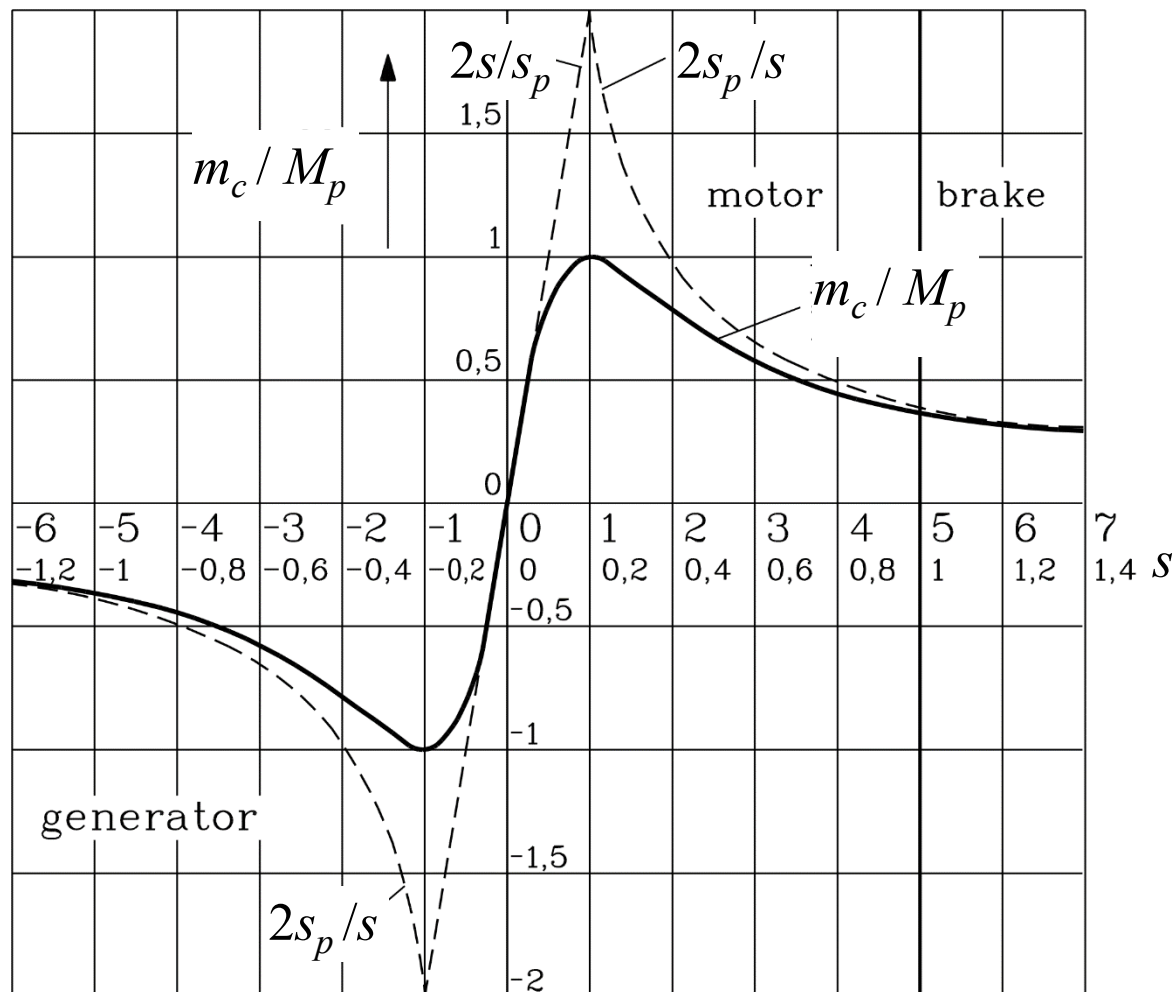
Klosova jednačina vredi za kolutne AM i za one kavezne AM koji nemaju izražen efekat potiskivanja struje u rotoru. Kod kaveznih AM sa izraženim efektom potiskivanja struje u rotoru Klosova jednačina je prihvatljiva u području malih klizanja.

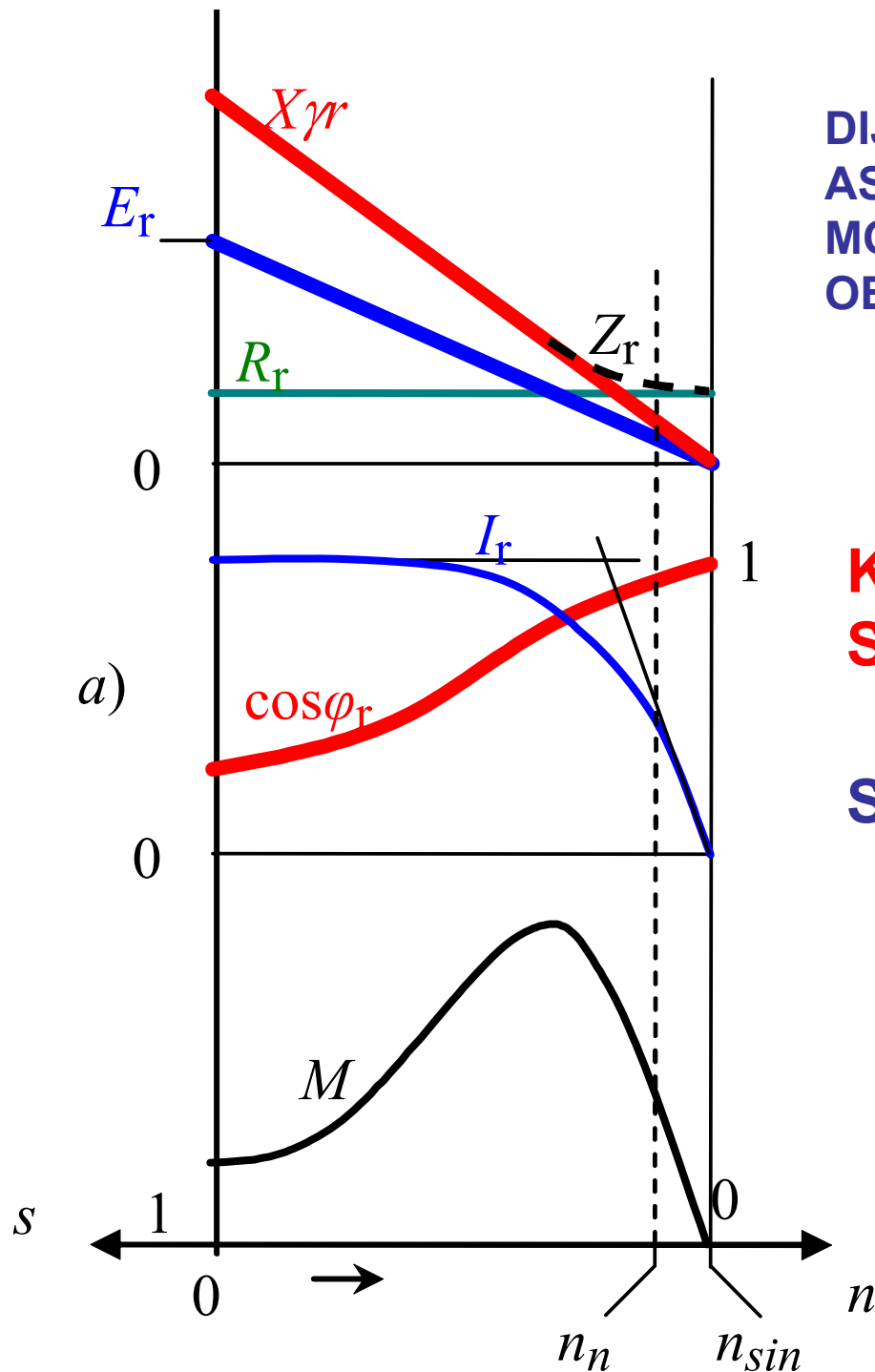
MOMENAT KONVERZIJE ASINHRONE MAŠINE

Za dovoljno mala i dovoljno velika klizanja Klosova jednačina se može aproksimirati sa:

$$\left(\frac{m_c}{M_p} \right)_{s \rightarrow 0} = \frac{2s}{s_p}$$

$$\left(\frac{m_c}{M_p} \right)_{s \gg s_p} = \frac{2s_p}{s}$$



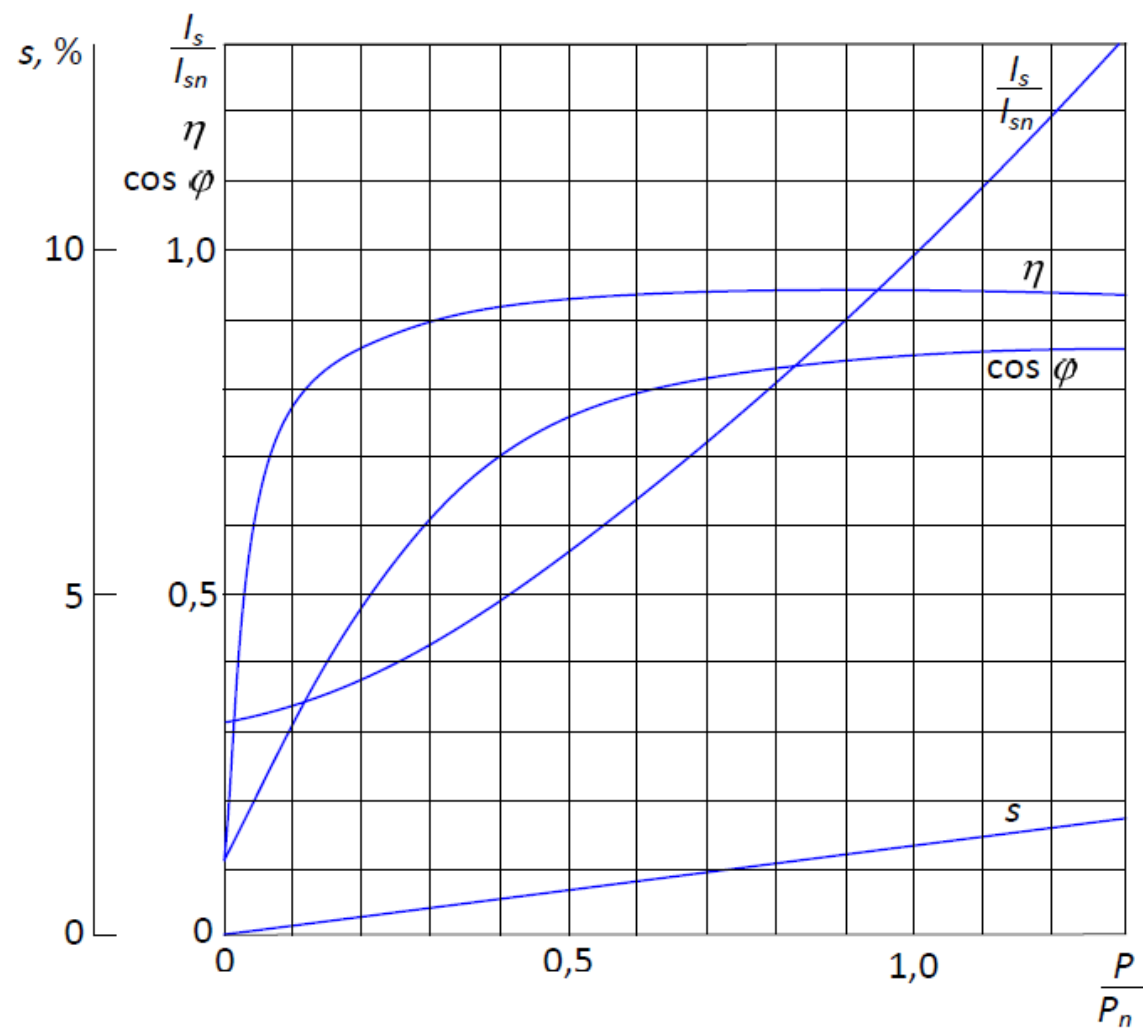


DIJAGRAMI VELIČINA ROTORA
ASINHRONOG MOTORA I OBRTNOG
MOMENTA U ZAVISNOSTI OD BRZINE
OBRTANJA.

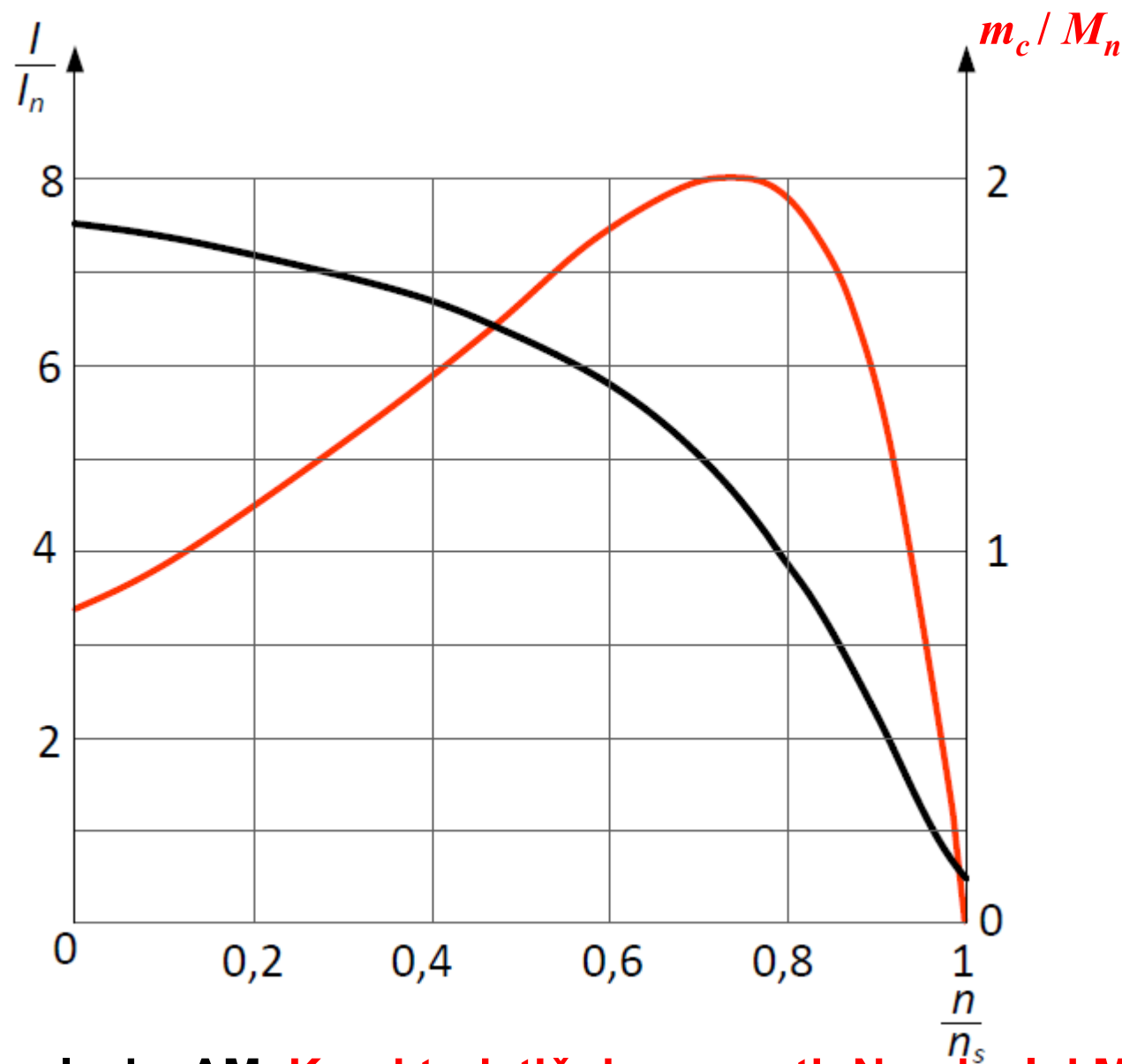
**KAKO IZGLEDA STRUJA
STATORA?**

STRUJNA RAVNOTEŽA

Radne karakteristike AM



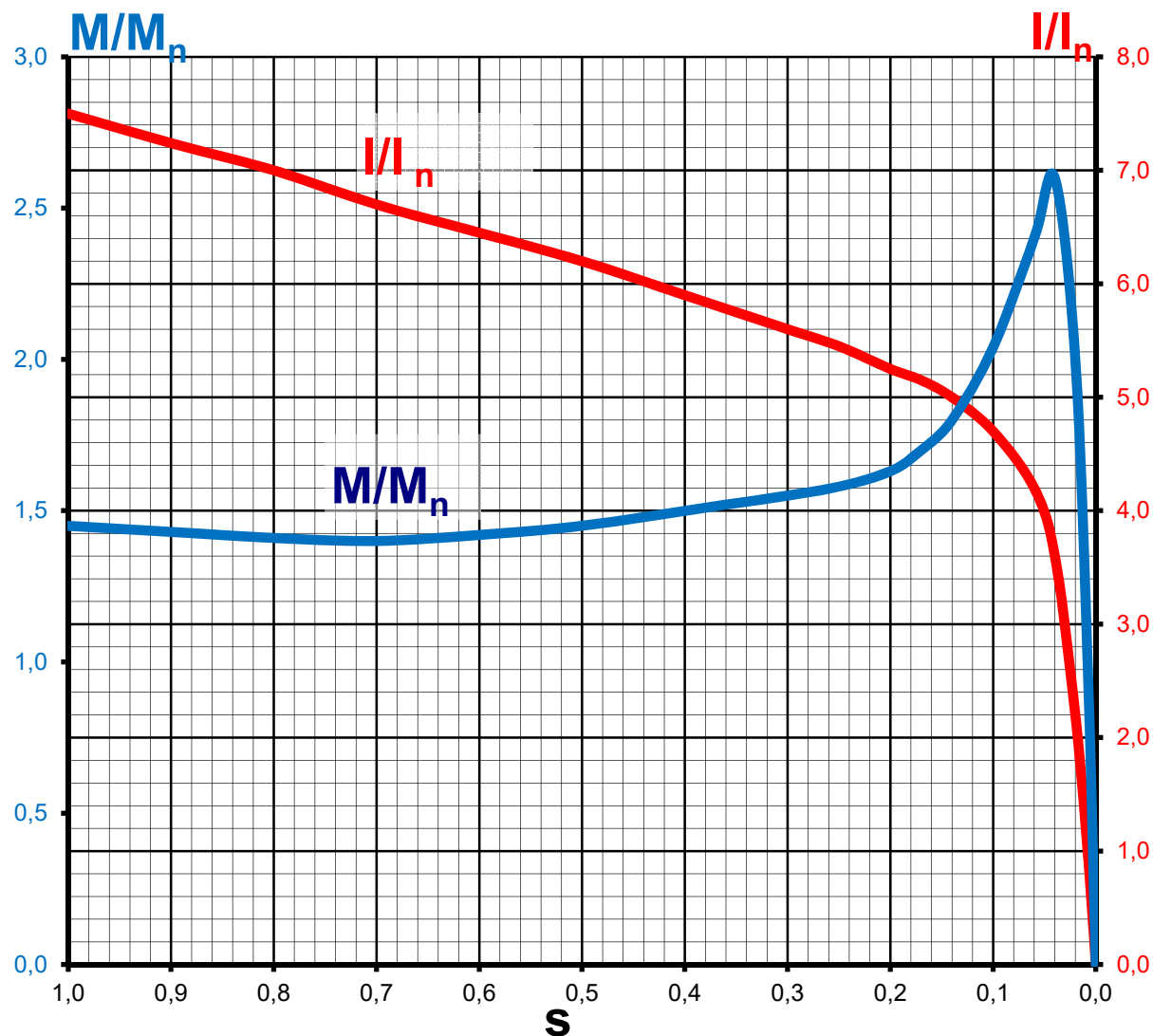
Momenat i struja motora tokom pokretanja



Velika struja polaska AM. Karakteristični momenti: Nominalni M_n , $M_p \geq 1,6(2 \div 3) \cdot M_n$; $M_{pol} = (0,9 \div 1,2) \cdot M_n$

Momenat i struja motora tokom pokretanja

Za AM sa podacima 400 kW; 1492 o/min; 675A; 400 V; 50Hz; date su karakteristike.



Karakteristični momenat: **Minimalni momenat-Momenat sedla.**

Struja statora asinhronog motora

- Prazan hod. U praznom hodu $s=0$ pa je iz ekv. šeme:

$$\underline{I}_s(s=0) = \frac{\underline{U}_s}{R_s + jX_s} \approx -j \frac{\underline{U}_s}{X_s} \qquad \frac{\underline{I}_s}{I_n}(s=0) \approx -j \frac{\underline{U}_s / U_n}{X_s / Z_n} = -j \frac{1}{x_s}$$

Primer:

$x_s = x_m + x_{\gamma s} \cong 3,0 + 0,15 = 3,15$: $I_s / I_n \cong 1 / x_s \cong 1/3$ **Struja ph:** cca. 1/3 nominalne struje. Za 100 A nominalne struje struja praznog hoda je cca. 33 A.

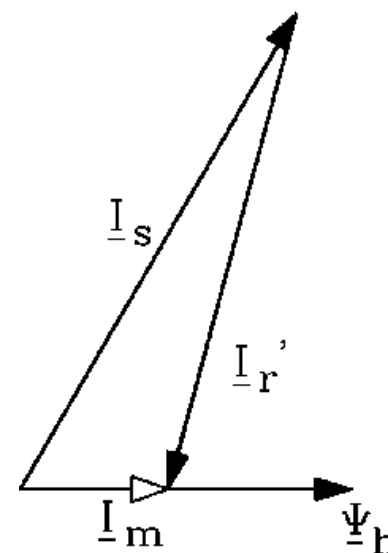
- Struja polaska: Pri pokretanju $s=1$ iz ekv. šeme:

$$\underline{I}_s(s=1) \approx -j \underline{U}_s \frac{1}{X_{\gamma s} + X'_{rk}} \qquad \frac{\underline{I}_s}{I_n}(s=1) \approx -j \frac{\underline{U}_s / U_n}{(X_{\gamma s} + X'_{rk}) / Z_n} = -j \frac{1}{x_{\gamma s} + x'_{rk}}$$

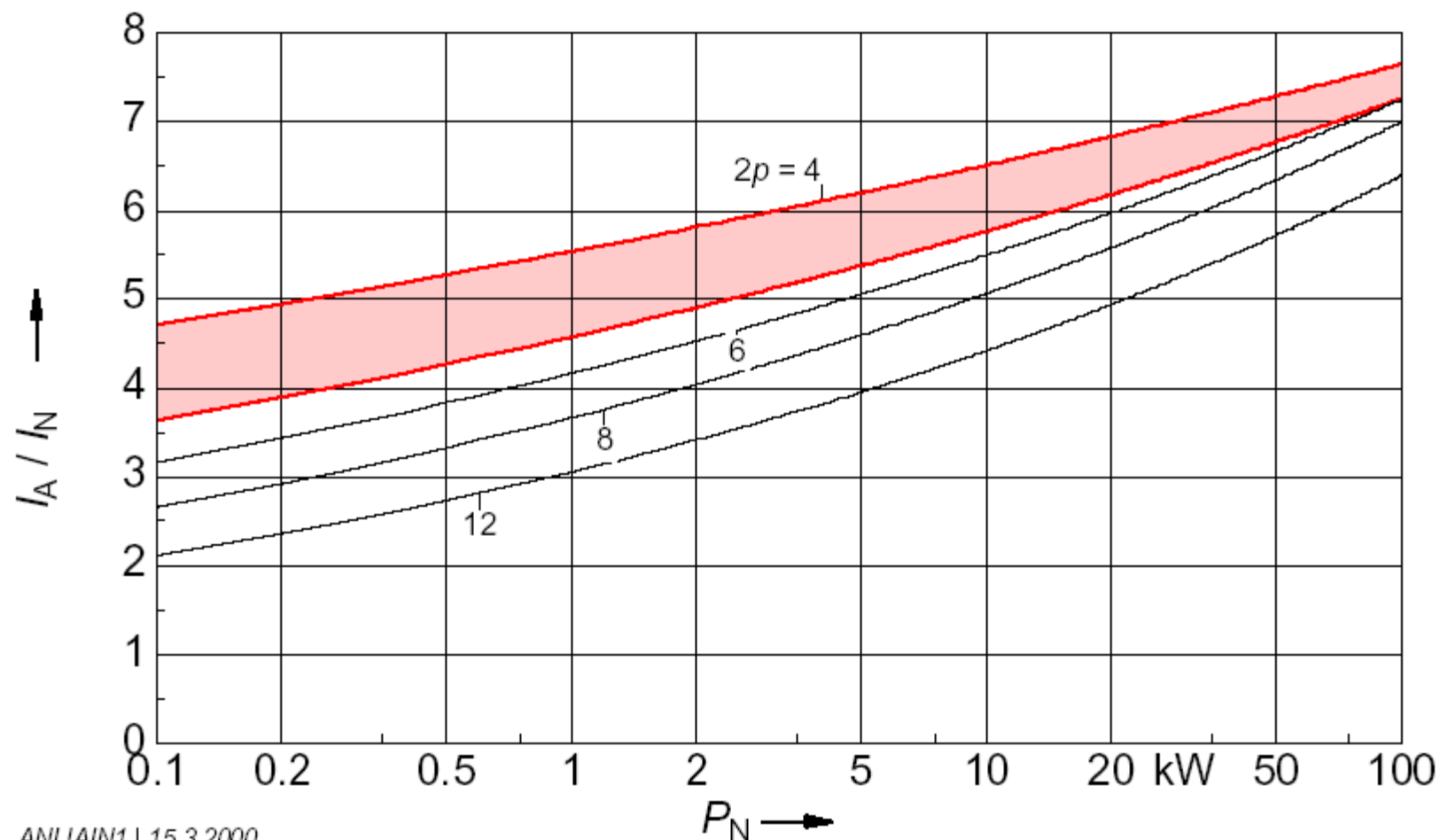
Primer:

$x_{\gamma s} = x_{\gamma r} = 0.1$: $i(s=1) = 1/(2 \cdot 0.1) = \underline{5}$: **Struja polaska je $5 \times I_n$.** Veći motori imaju manje rasipne flukseve, pa prema tome i veće struje polaska tipično $5 \div 7 \times I_n$.

- Strujna ravnoteža: Struja rotora je gotovo u opoziciji sa strujom statora.



Struja polaska asinhronog motora



ANI IAIN1 | 15.3.2000

Relativna vrednost struja polaska asinhronog motora zavisi od P_N motora i broja polova.

Pokretanje asinhronog motora

Pri pokretanju asinhronih motora javljaju se sledeće teškoće:

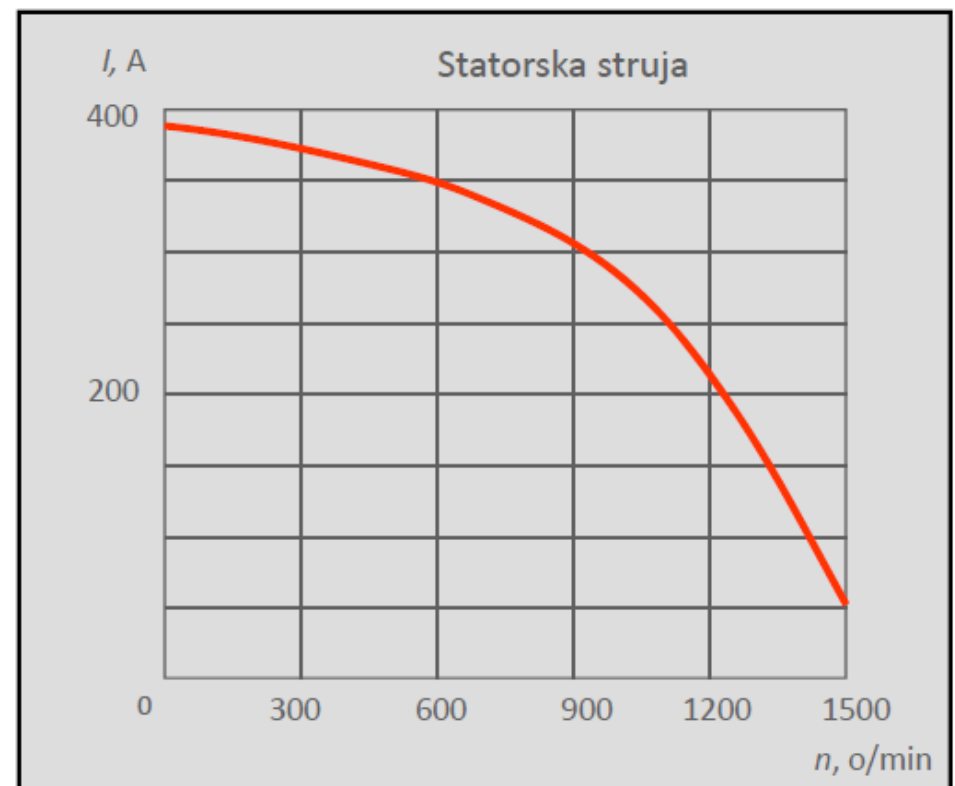
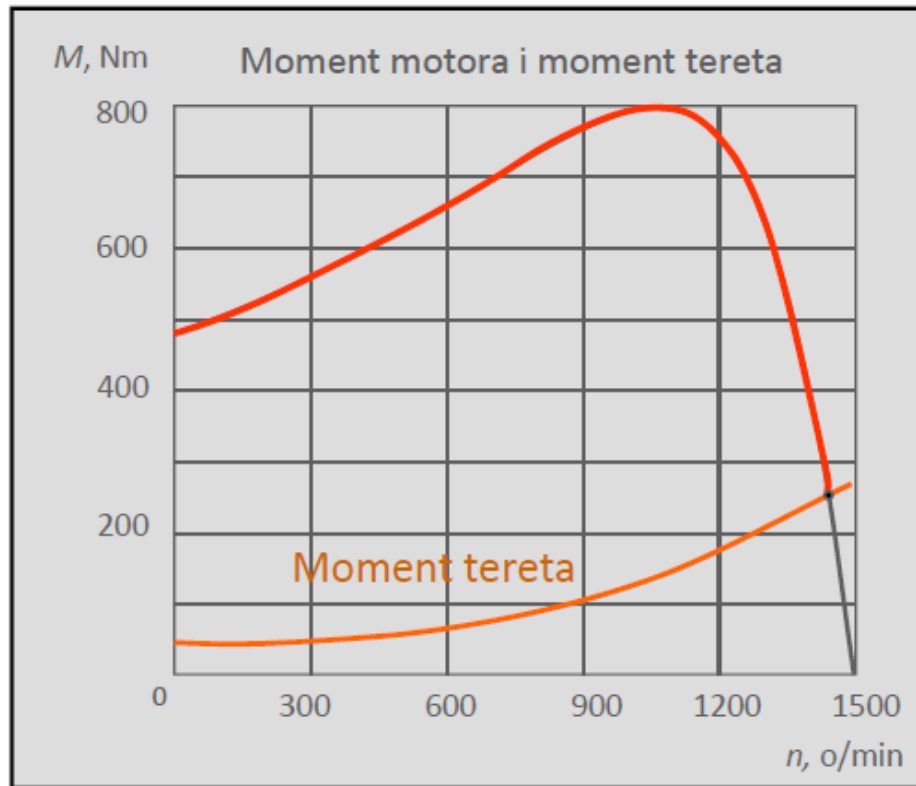
- **Velike struje pokretanja, obično 5-8 puta veće od nazivnih,**
- **Preveliki ili nedovoljno veliki momenti pokretanja,**
- **Predugo trajanje zaleta motora i pogona.**

Najčešće primenjivane tehnike pokretanja asinhronih motora su:

- **Pokretanje direktnim priključenjem na mrežu,**
- **Pokretanje zvezda-trougao preklopkom,**
- **Pokretanje preko autotransformatora,**
- **Pokretanje soft-start uređajem,**

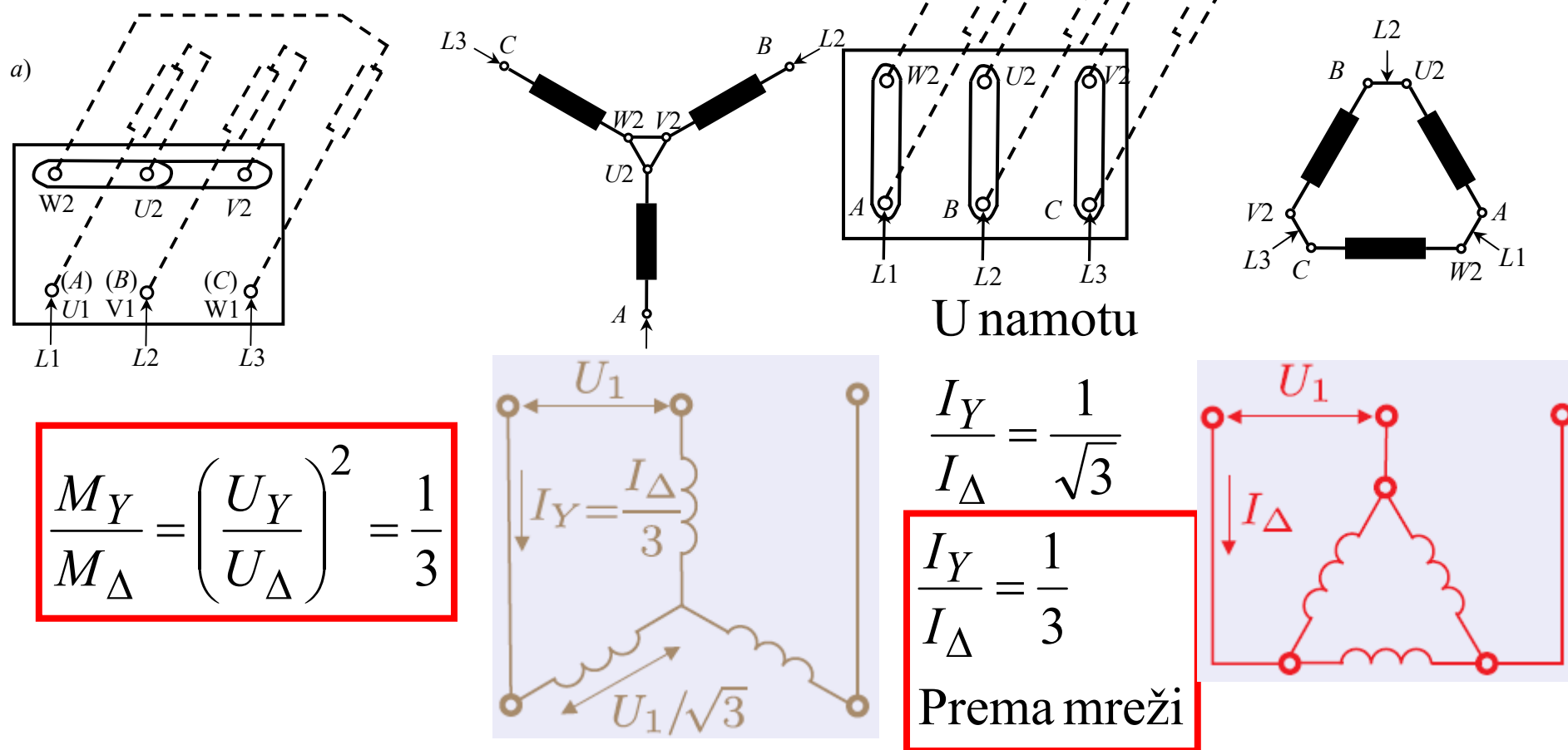
Sve se tehnike pokretanja svode na to da se izvrši uspešan zalet motora i pogona uz što manje struje zaleta i što kraće trajanje zaleta. Uticaj na mrežu mora biti u prihvatljivim granicama dozvoljenog pada napona izazvanog strujom polaska motora.

Pokretanje asinhronog motora direktnim priključkom na mrežu



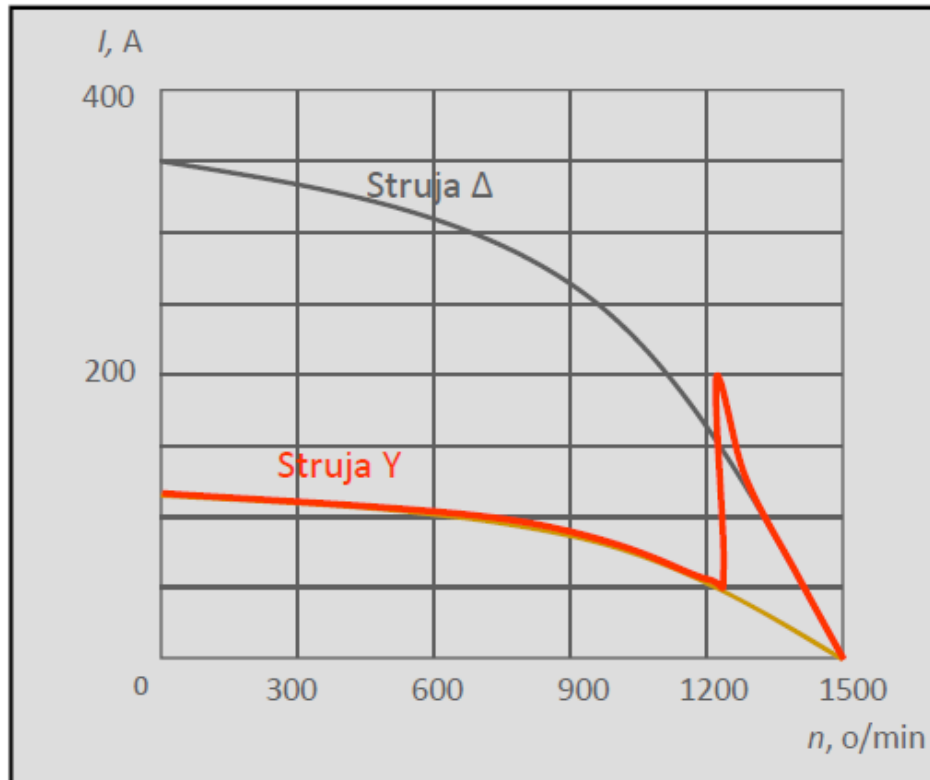
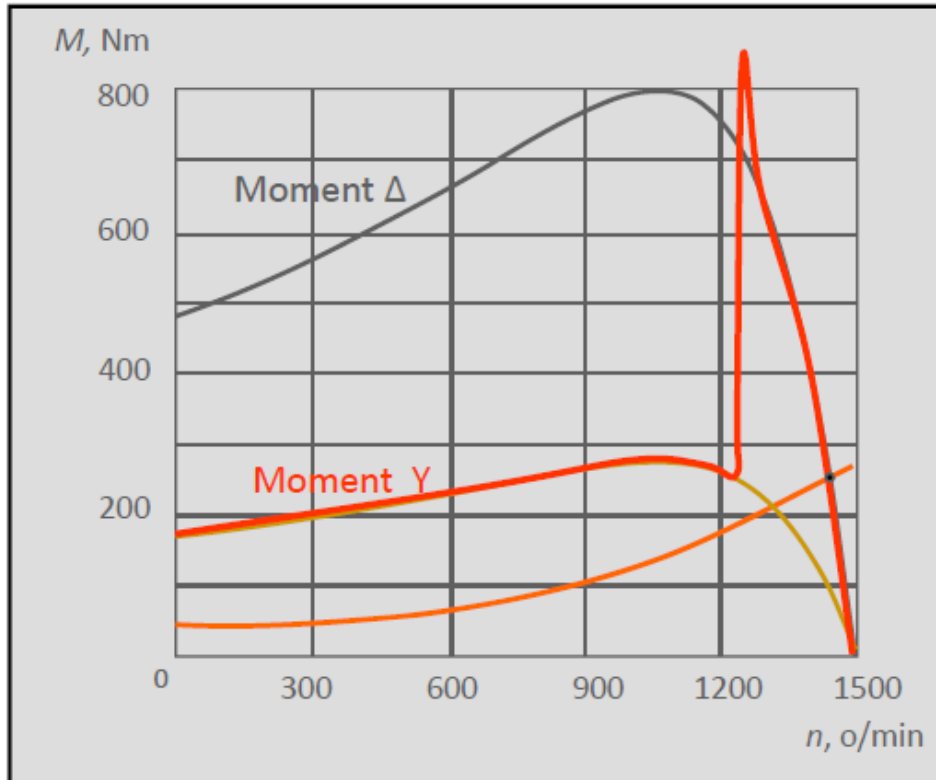
Ovaj način pokretanja je najprimereniji najjednostavnijem i najpouzdanijem motoru – kaveznom AM. Zbog velike struje pokretanja asinhronog motora, koja pravi probleme u napojnoj distributivnoj mreži (**padovi napona** i **preopterećenje sklopne opreme**), koriste se različite tehnike pokretanja u cilju smanjenja struje polaska.

Pokretanje kaveznog asinhronog motora preklopom Y-Δ



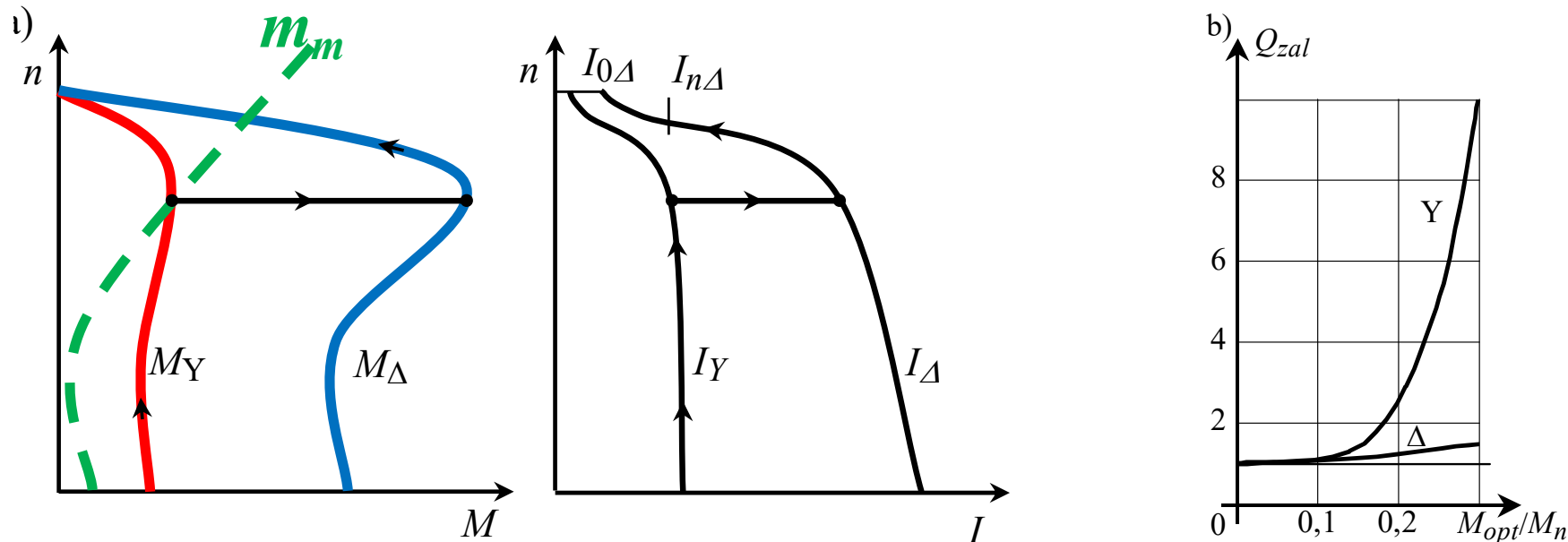
Kavezni AM za trajan rad u vezi Δ pri pokretanju veže se u Y . Napon po faznom namotaju je $\sqrt{3}$ puta manji pa kroz namotaj teče $\sqrt{3}$ puta manja struja, a struja iz mreže je još $\sqrt{3}$ puta manja jer se iz jednog faznog voda napaja samo jedan namotaj. U spoju Y iz mreže se povlači $1/3$ polazne struje u spoju Δ . Kada se obavi zalet u zvezdi motor se spoji u trougao.

Pokretanje kaveznog asinhronog motora preklopkom Y- Δ



U trenutku prevezivanja iz Y u Δ motor povuče 3x veću struju od one koju je imao pre prespajanja. Ako se zalet ne obavi do nominalne brzine pri prespajanju će nastati veliki udari i trzaji. Da bi zalet bio uspešan potrebno je da motor bude rasterećen/slabo opterećen i da zalet u Y dovoljno dugo traje. Primenom Y- Δ pokretanja izbegava se veliki strujni udar ili jak mehanički trzaj.

Pokretanje kaveznog asinhronog motora preklopkom Y- Δ



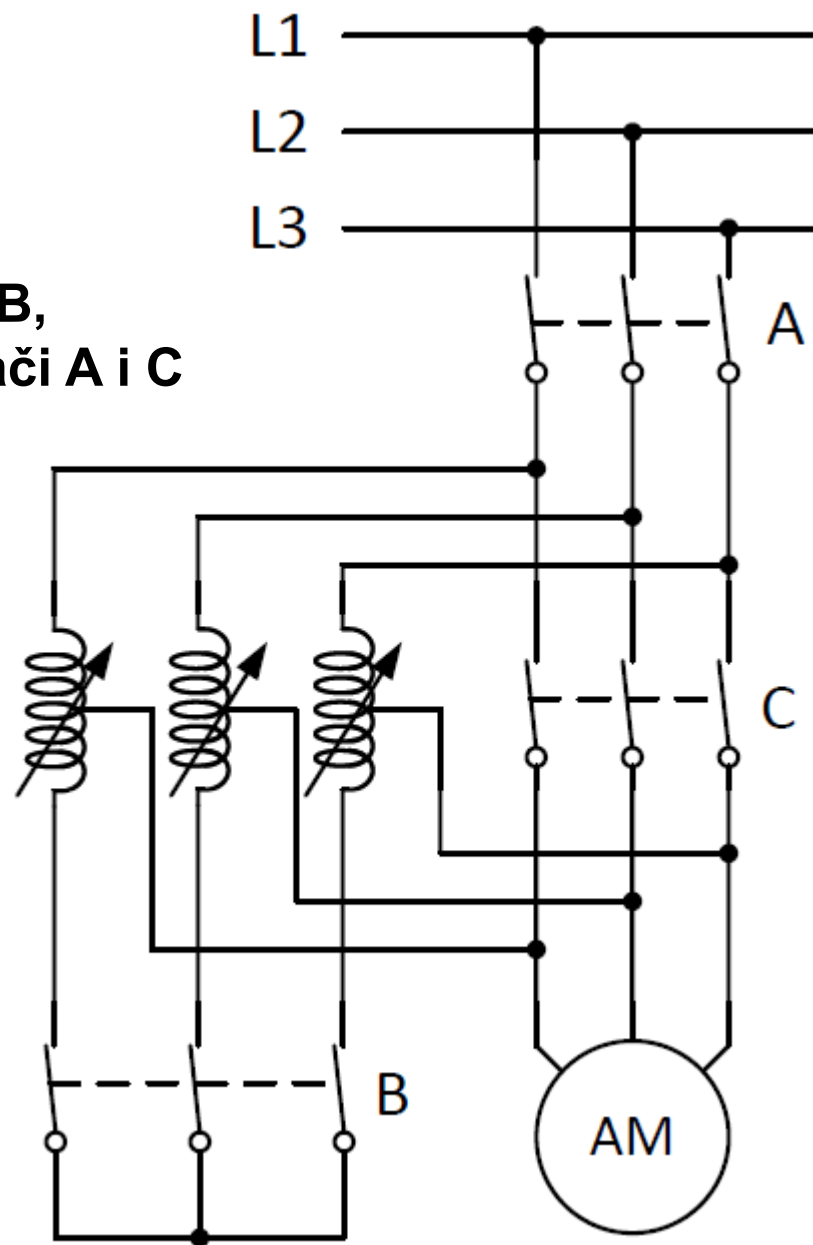
Ilustracije za slučaj necelishodne upotrebe pokretanja preklopkom **Y- Δ** .

a) Zalet nije rasterećen, pa pri prebacivanju iz zvezde u trougao motor povuče iz mreže struju praktično jednaku kao i u kratkom spoju a razvije i pun prevalni momenat.

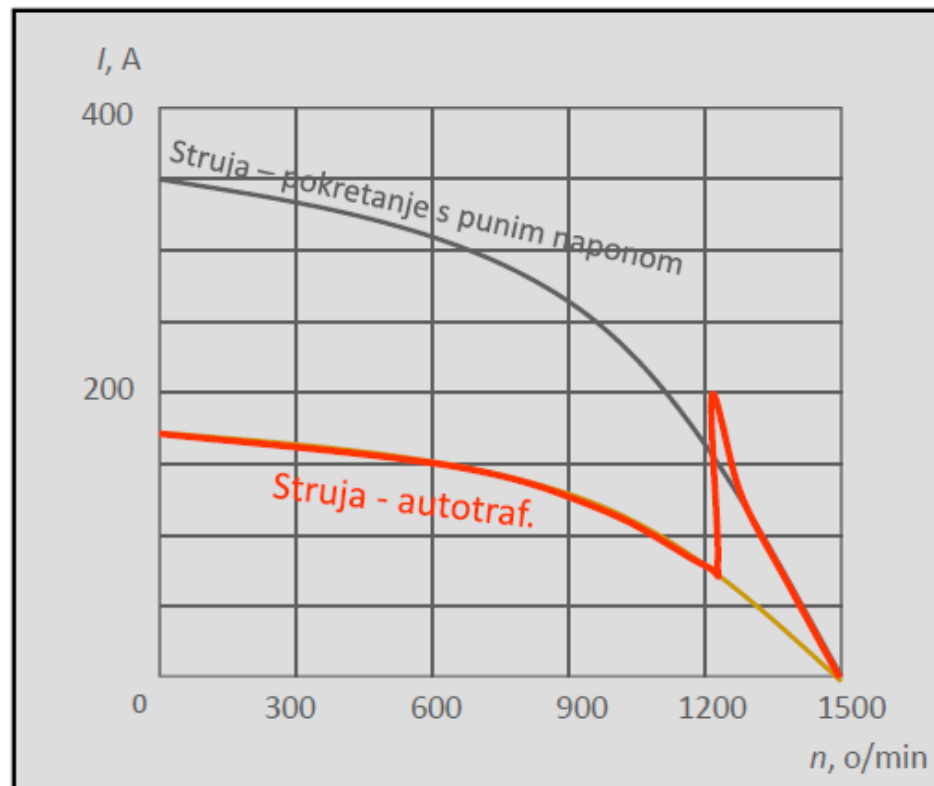
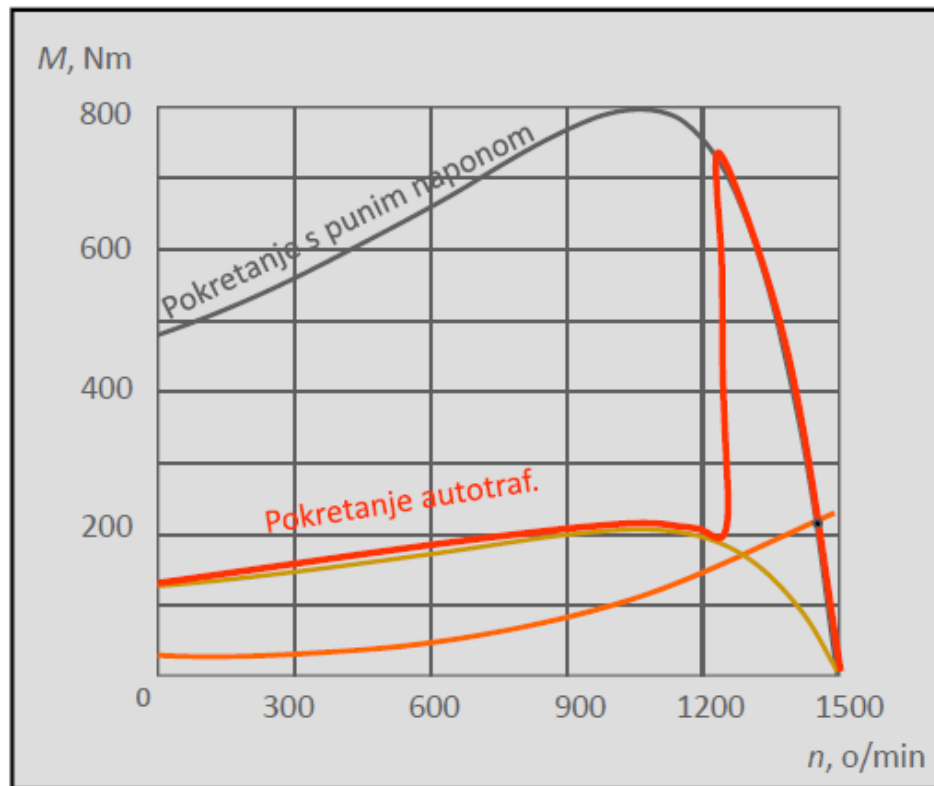
b) Dijagram pokazuje relativne količine toplote koje se stvaraju usled gubitaka u namotima motora pri delimično opterećenom zaletu u spregama zvezda i trougao. Vide se izrazito velike količine toplote razvijene u sprezi zvezda pri zaletu već i sa relativno malim momentima opterećenja.

Pokretanje kaveznog AM autotransformatorom

Pokretanje: Zatvoreni prekidači A i B,
Normalan pogon: Zatvoreni prekidači A i C



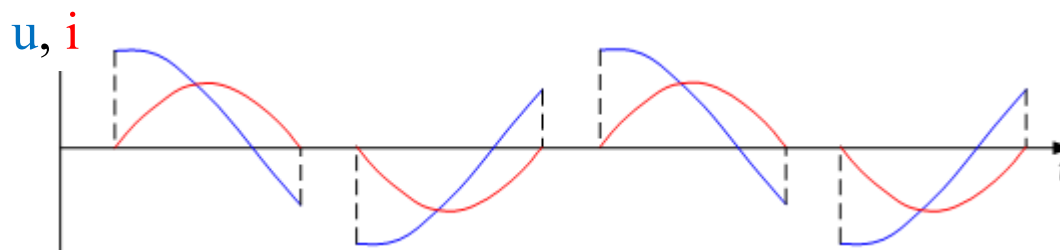
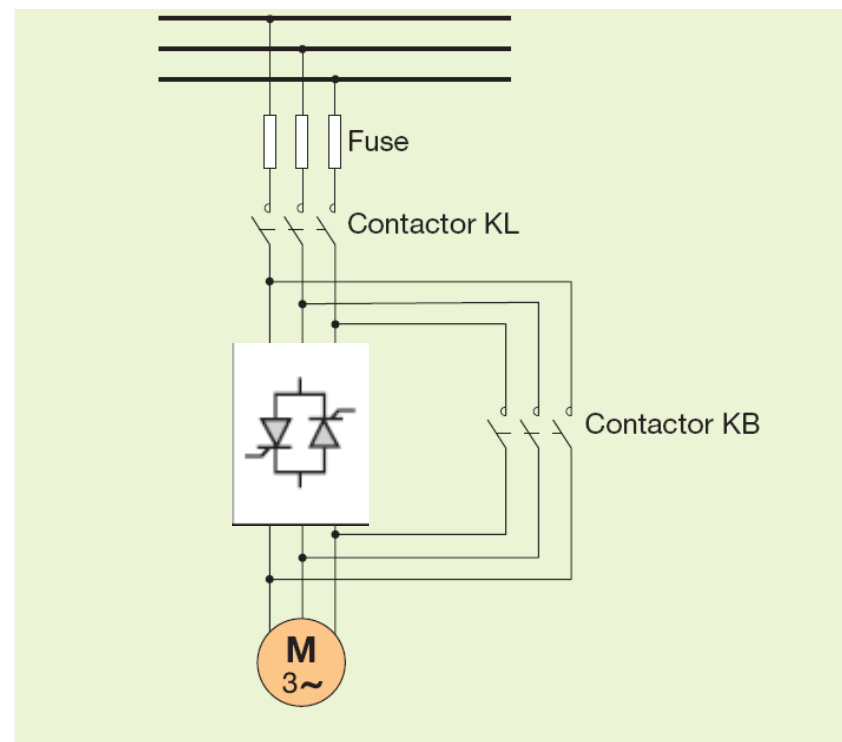
Pokretanje kaveznog AM autotransformatorom



Pokretanje AM autotransformatorom omogućuje da se struja pokretanja prilagodi uslovima koje zahteva mreža.

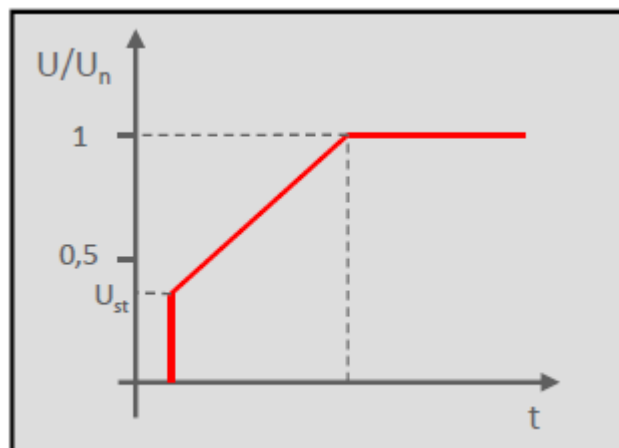
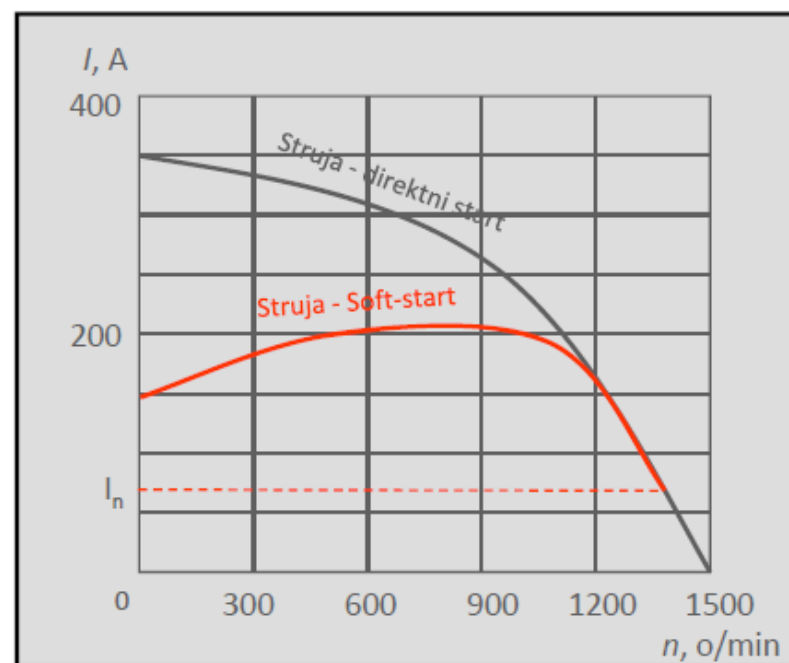
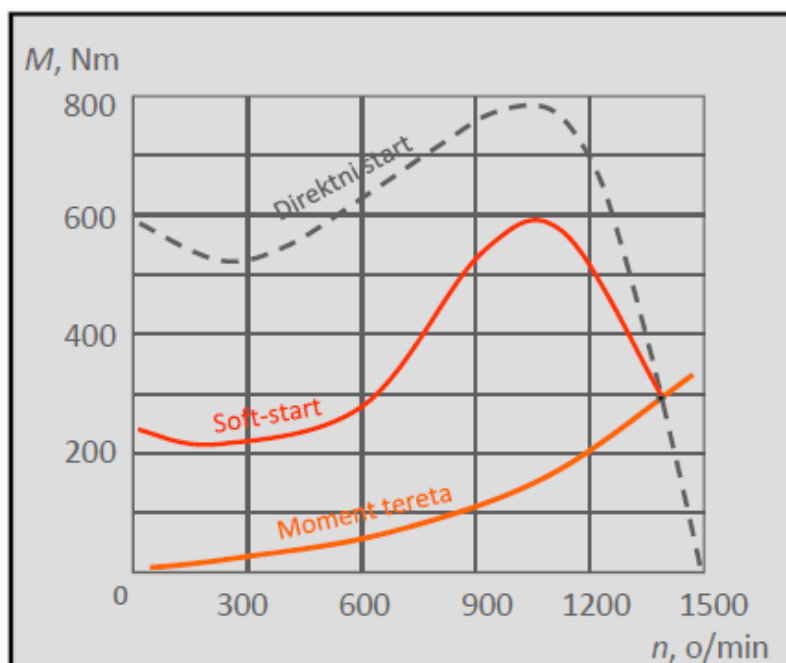
“Soft start” – lagano pokretanje kaveznog AM

“Soft-starter” je uređaj energetske elektronike kojim se reguliše napon statora AM kako bi se smanjila struja pokretanja na neki dozvoljeni iznos. Tokom pokretanja napon statora AM se linearno povećava kako bi se struja statora držala ispod željene vrednosti.



Talasni oblici napona i struje soft startera

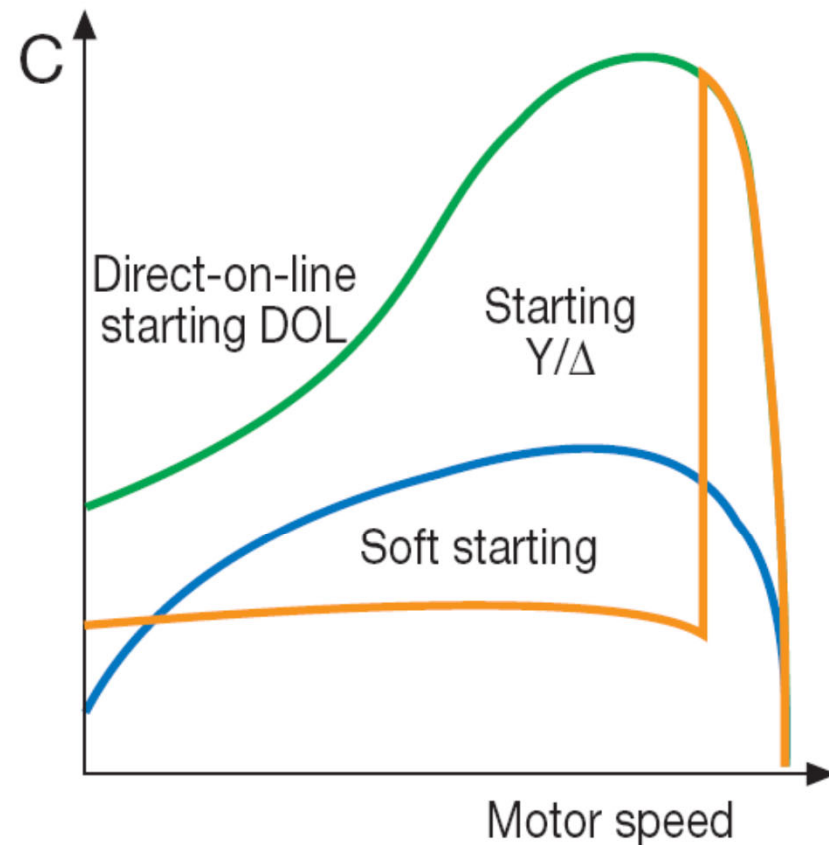
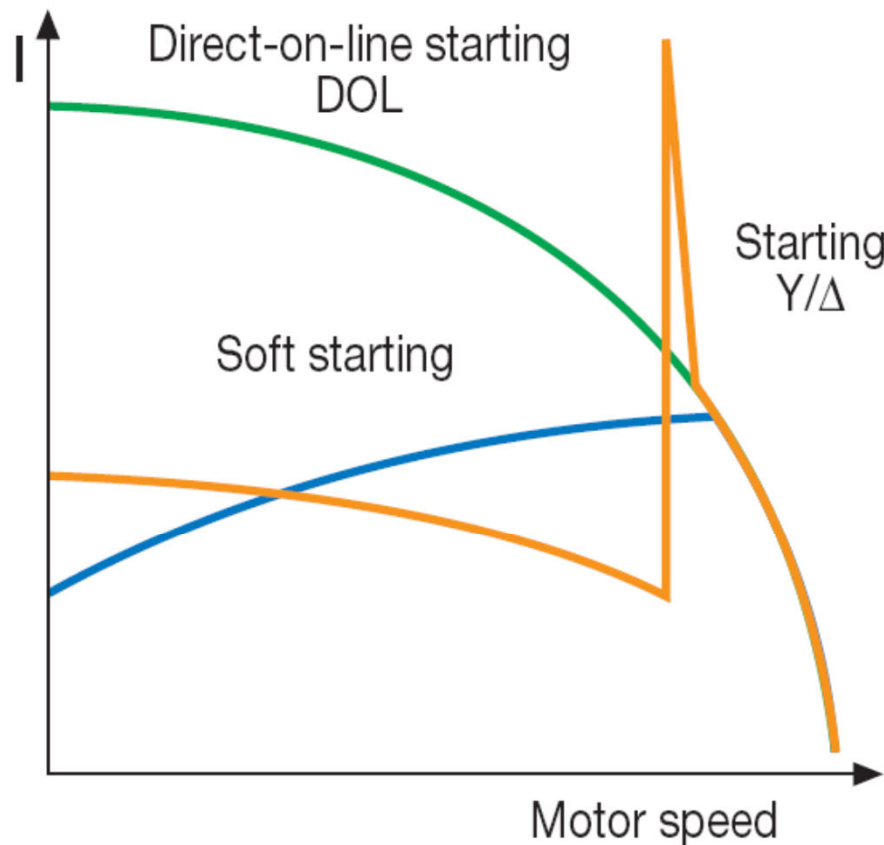
“Soft start” – lagano pokretanje kaveznog AM



“Soft start” – lagano pokretanje kaveznog AM

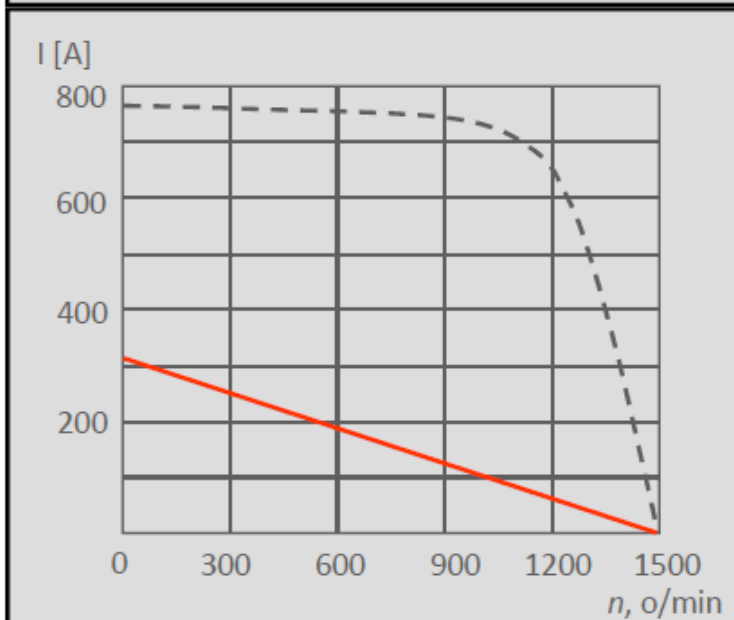
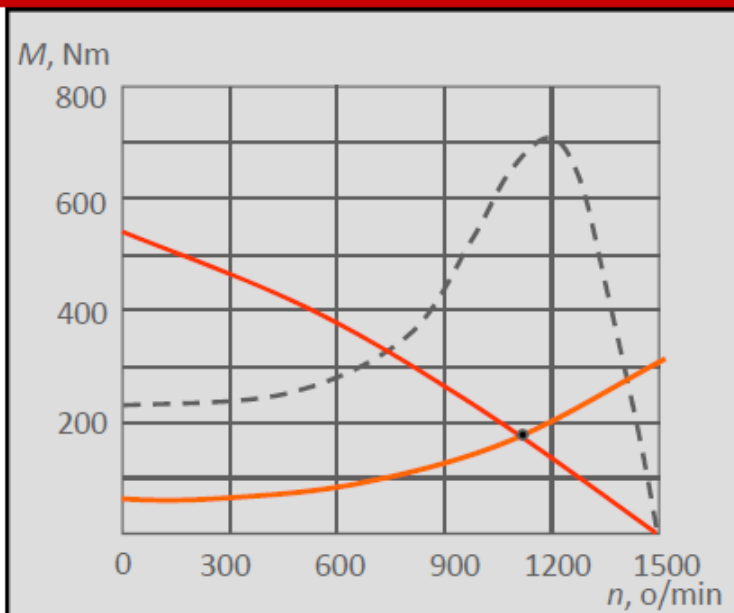
Motor current

Motor torque



Ova ilustracija tendenciozno favorizuje “Soft-start” pokretanje. Ukazuje da je soft startom struja polaska manja nego u Y/Δ pokretanju i da se zalet uspešno obavlja.

Pokretanje kliznokolutnog asinhronog motora dodavanjem otpornika u rotorsko kolo



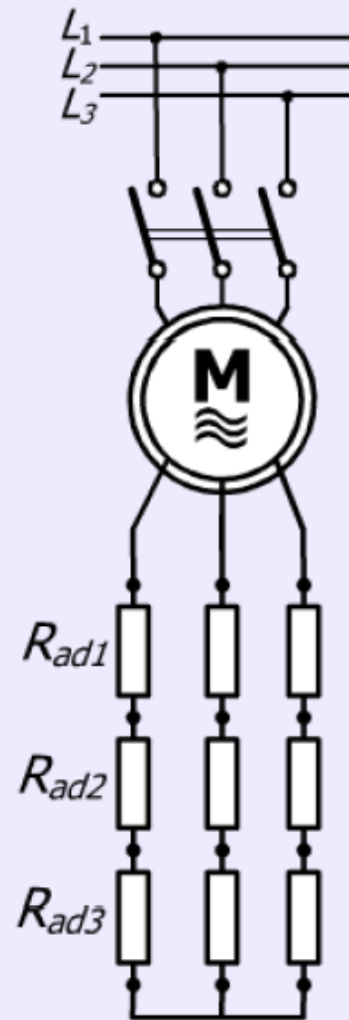
$R_d = 0$

$R_d = R_{ad1}$

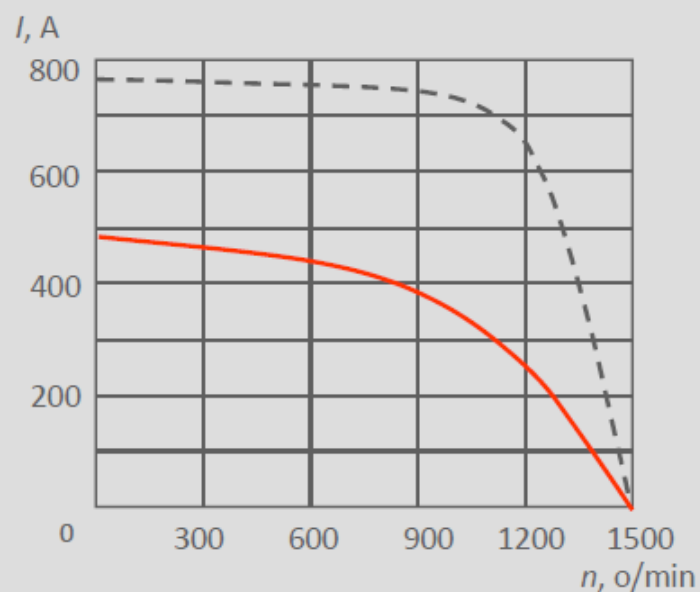
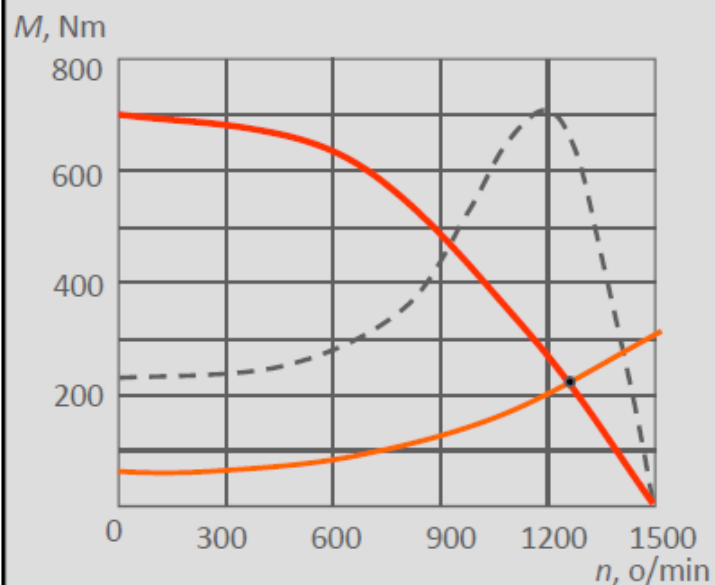
$R_d = R_{ad1} + R_{ad2}$

$R_d = R_{ad1} + R_{ad2} + R_{ad3}$

Nastavi prezentaciju



Pokretanje kliznokolutnog asinhronog motora dodavanjem otpornika u rotorsko kolo



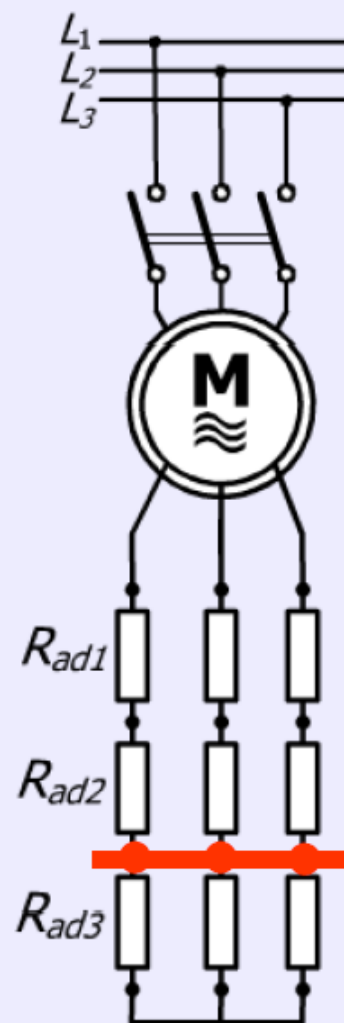
$$R_d = 0$$

$$R_d = R_{ad1}$$

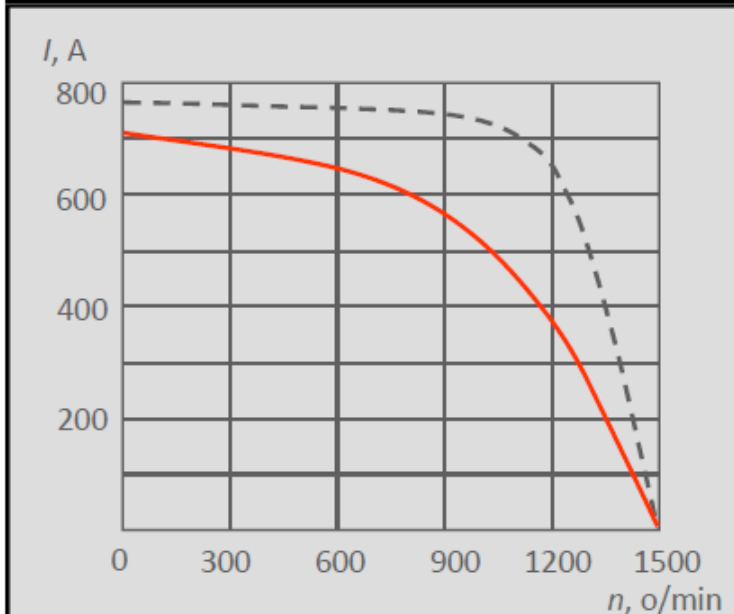
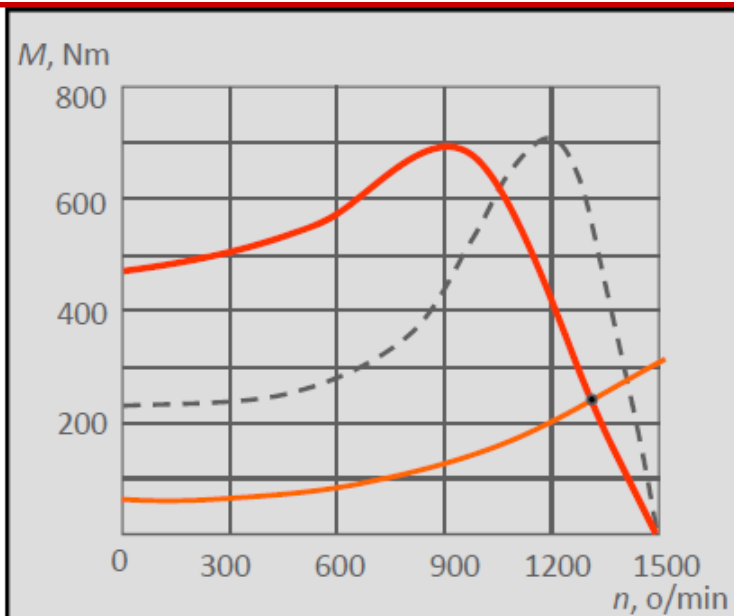
$$R_d = R_{ad1} + R_{ad2}$$

$$R_d = R_{ad1} + R_{ad2} + R_{ad3}$$

Nastavi prezentaciju



Pokretanje kliznokolutnog asinhronog motora dodavanjem otpornika u rotorsko kolo



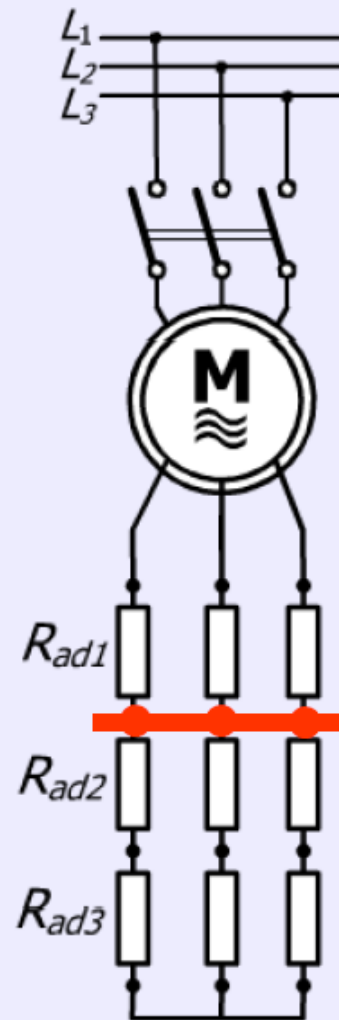
$$R_d = 0$$

$$R_d = R_{ad1}$$

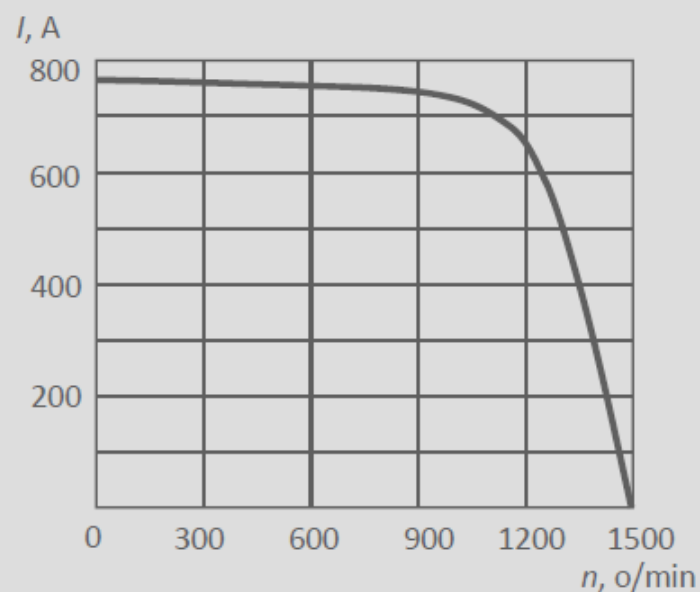
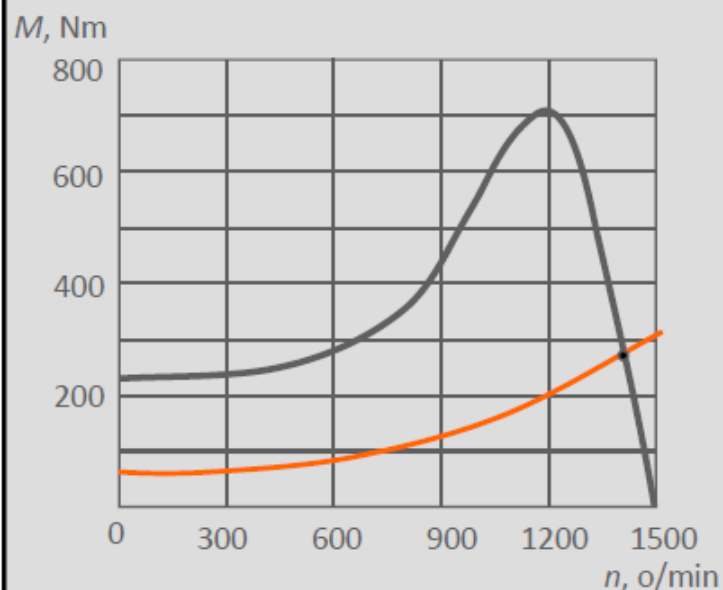
$$R_d = R_{ad1} + R_{ad2}$$

$$R_d = R_{ad1} + R_{ad2} + R_{ad3}$$

Nastavi prezentaciju



Pokretanje kliznokolutnog asinhronog motora dodavanjem otpornika u rotorsko kolo



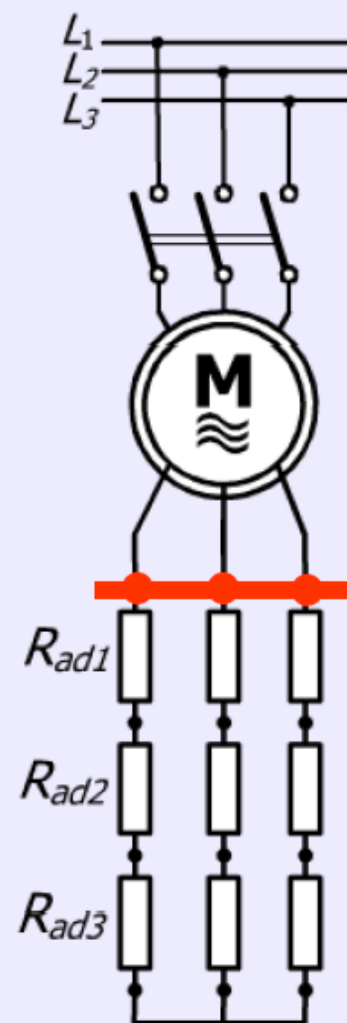
$$R_d = 0$$

$$R_d = R_{ad1}$$

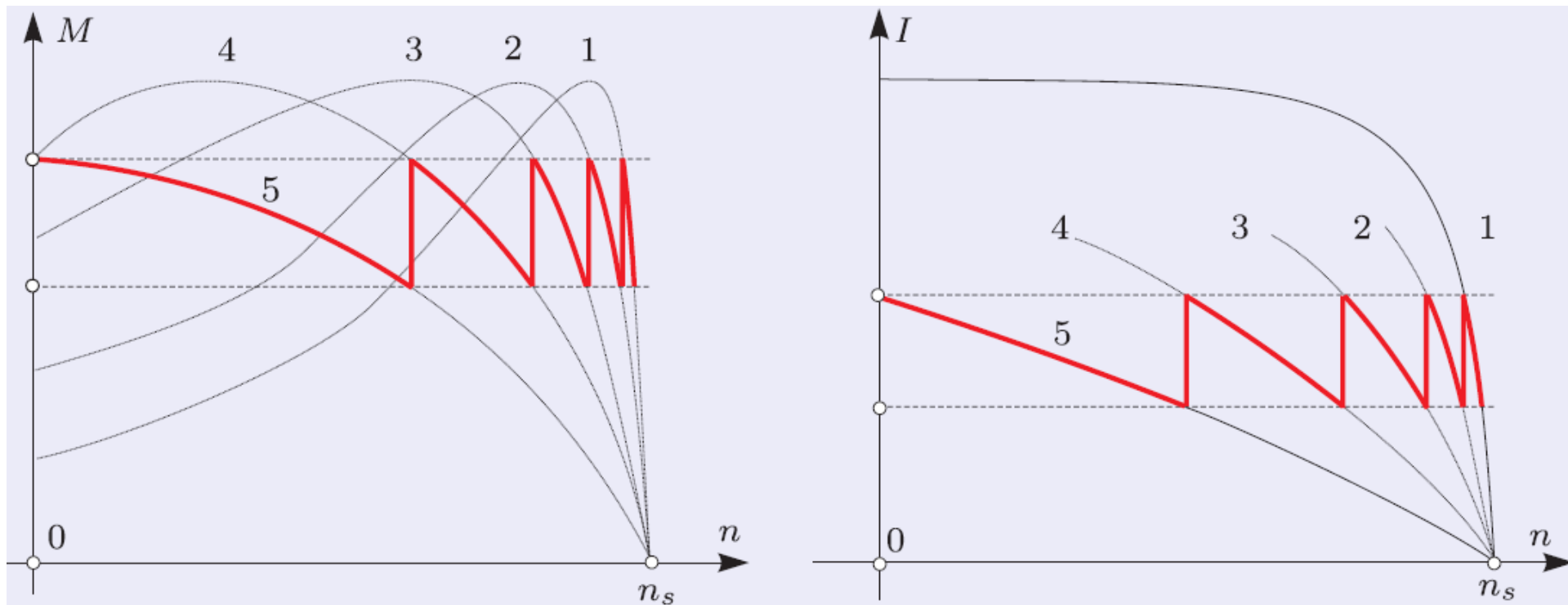
$$R_d = R_{ad1} + R_{ad2}$$

$$R_d = R_{ad1} + R_{ad2} + R_{ad3}$$

Nastavi prezentaciju



Pokretanje kliznokolutnog asinhronog motora dodavanjem otpornika u rotorsko kolo



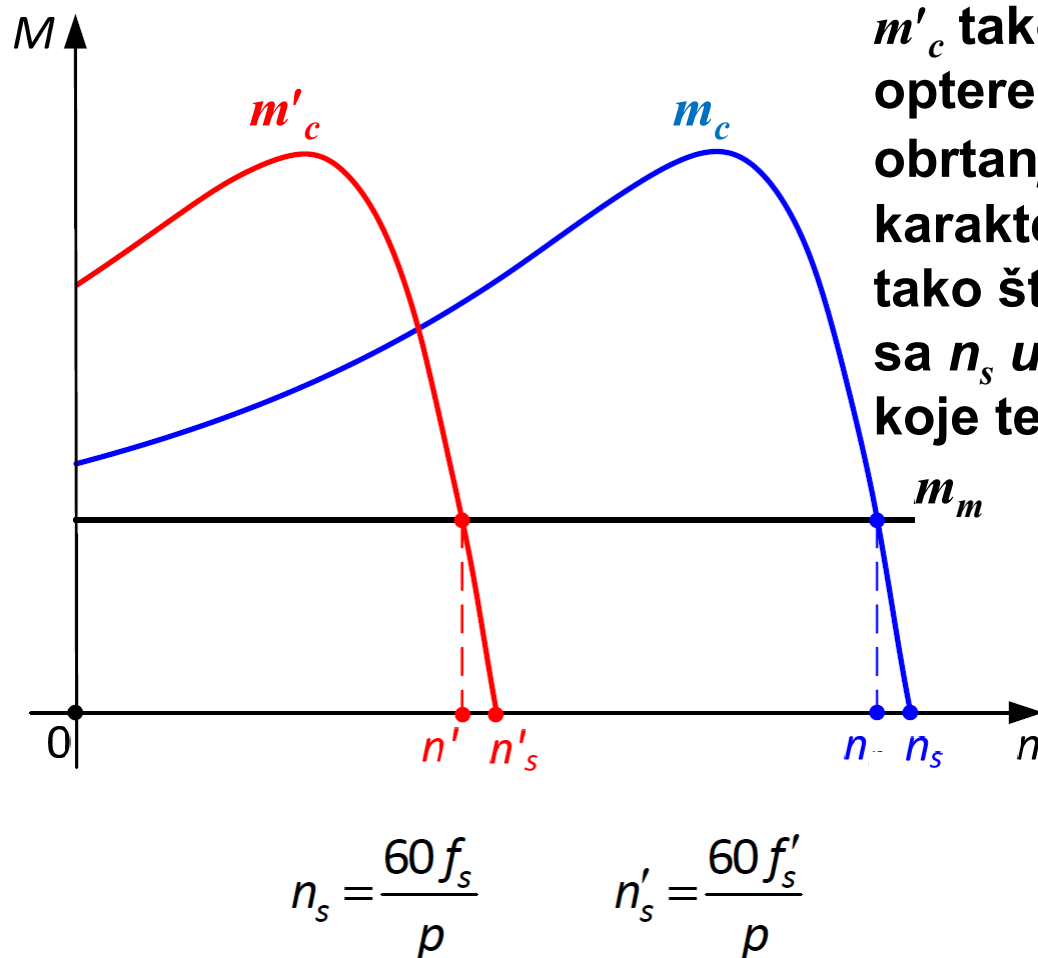
Ako se otpornik za pokretanje izvede s više segmenata moguće je uz pravovremene prelaske sa jednog segmenta na drugi dobiti približno konstantnu vrerdnost momenta i struje pokretanja.

PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

Brzina obrtanja AM je: $n = n_s(1-s) = \frac{60f_s}{p}(1-s)$

i ona se može podešavati promenom broja pari polova p , promenom klizanja s i promenom frekvencije f_s .

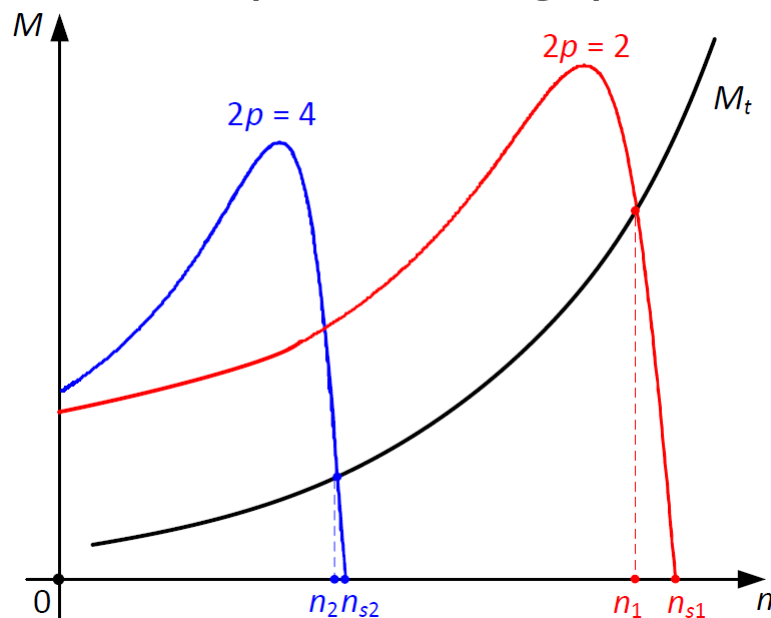
Regulisati brzinu obrtanje znači menjati momentnu karakteristiku motora m_c u m'_c tako da njen presek s k-kom opterećenja bude pri željenoj brzini obrtanja n' . Prema slici momentnu karakteristiku motora m_c smo promenili tako što smo promenili sinhronu brzinu sa n_s u n'_s menjajući frekvenciju struja koje teku kroz namote statora.



PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

Promenom broja polova

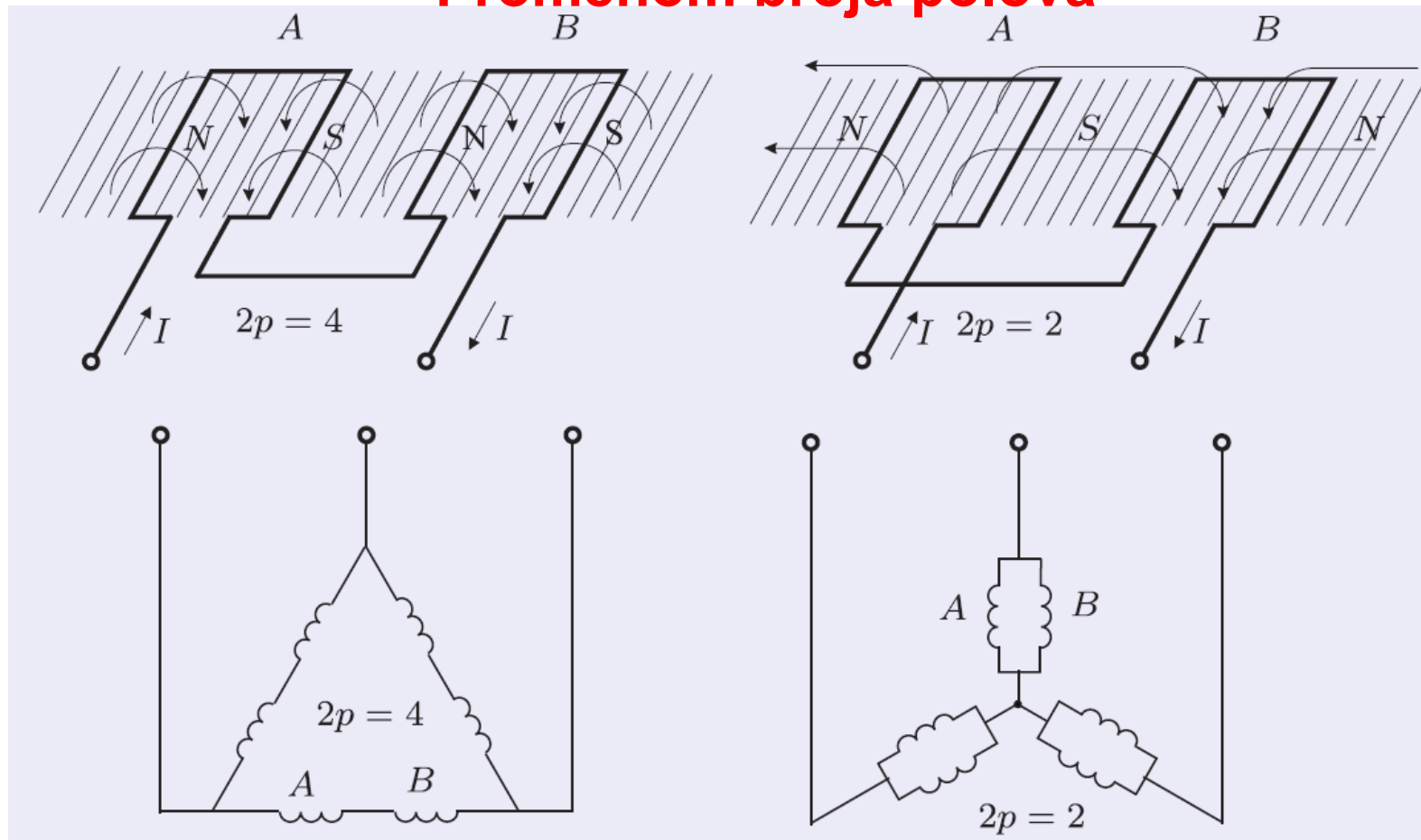
Promena brzine promenom broja pari polova moguća je samo u grubim koracima. Promena broja polova se može ostvariti sa jednim namotajem izvedenim iz dva jednaka dela koja se prespajaju prema Dalanderovom principu. Jedan namotaj se jednostavno prespaja u pogledu broja polova u odnosu 1:2. Prema Dalanderu postoji više spojeva namotaja: konstantna snaga na obe brzine, konstantan momenat, manji momenat pri manjoj brzini. Za tri ili više brzina koriste se dva ili više galvanski odvojena namotaja u motoru koji su smešteni u iste žlebove. U mašini za pranje veša (stare) motor ima dva namotaja na statoru, jedan sa $2p=2$ (za centrifugu), a drugi $2p=12$ (za pranje).



	NIŽA BRZINA	VIŠA BRZINA
DAHLANDER SPOJ D/YY - KONSTANTNI MOMENT NA OBJE BRZINE		
DAHLANDER SPOJ Y/YY - VENTILATORSKA KARAKTERISTIKA MOMENTA		
HEMA PRIKLJUČKA NA MREŽU		

PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

Promenom broja polova



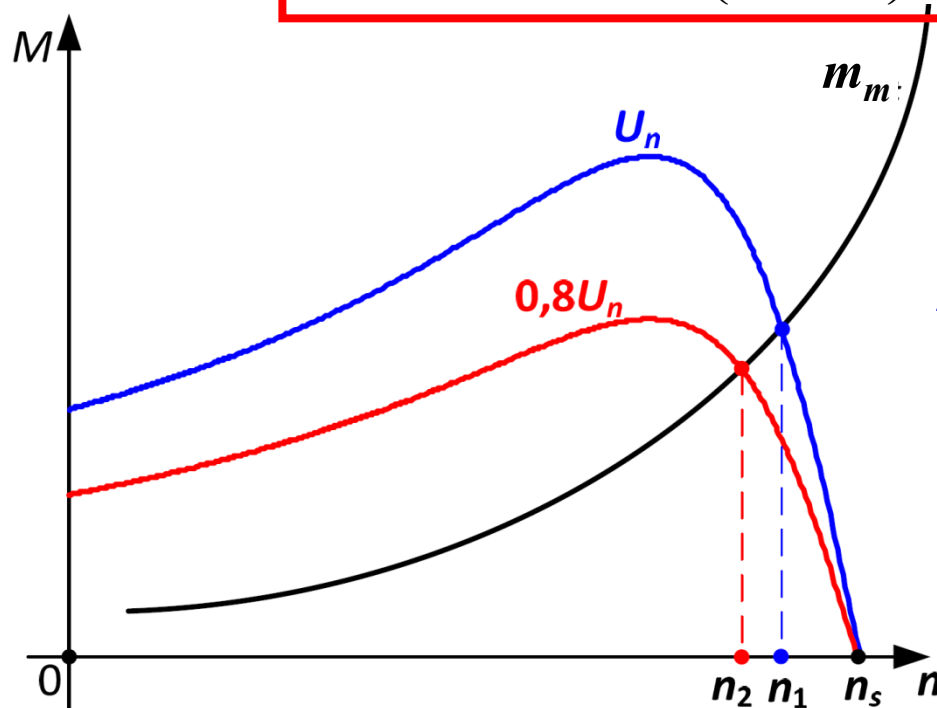
Prespajanje sekcija za Dalanderov spoj namotaja.

PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

Promenom napona napajanja

Promena brzine AM promenom napona napajanja, uz stalnu frekvenciju, momentna k-ka se menja prema $m_c = f(U^2)$. Svakom naponu odgovara druga k-ka motora. K-ka opterećenja je određena vrstom opterećenja. Radna tačka je u preseku karakteristike motora i opterećenja.

$$m_c = M = \frac{3 \cdot p}{2\pi \cdot f_s} U^2 \frac{\frac{R'_r}{s}}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + (X_{\gamma s} + X'_{rk})^2} = m_m$$

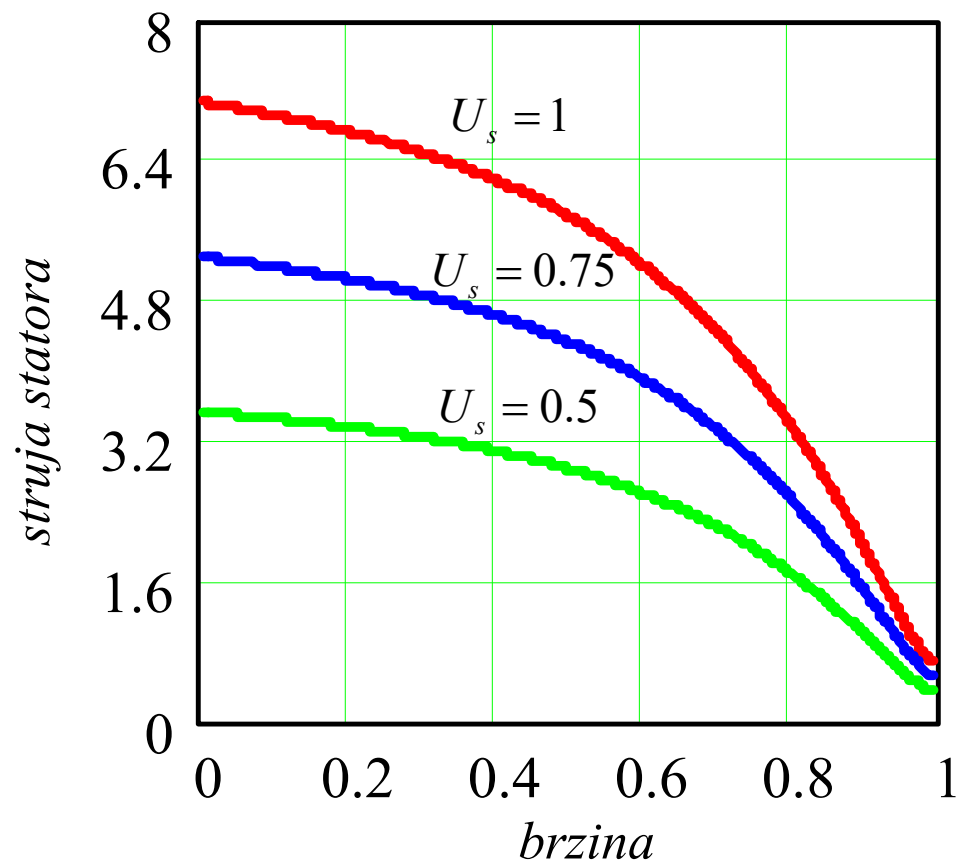
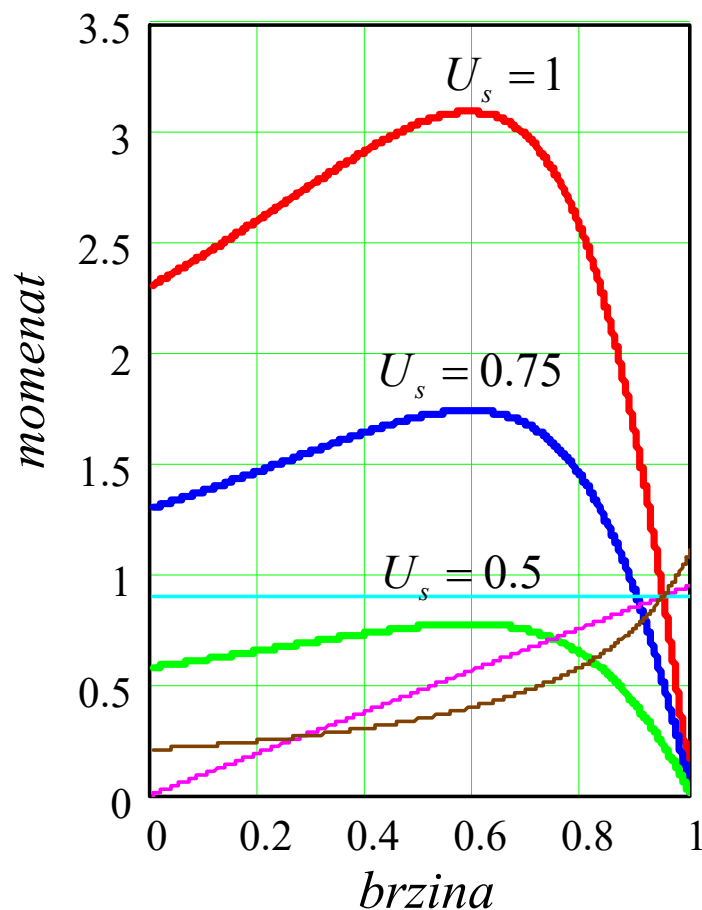


Smanjenjem napona opada brzina AM, a klizanje raste.

Pretvarači energetske elektronike omogućuju regulaciju napona u širokim granicama.

PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

Promenom napona napajanja



Promenom napona, uz stalnu frekvenciju napajanja, postiže se promena brzine u uskom intervalu oko sinhronne brzine. Energetski gledano, promena brzine na ovaj način nije optimalna jer su gubici energije neizbežni.

PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

Promenom napona napajanja

Mane su da **preopteretivost opada**:

$$\nu = \frac{M_p}{M}$$

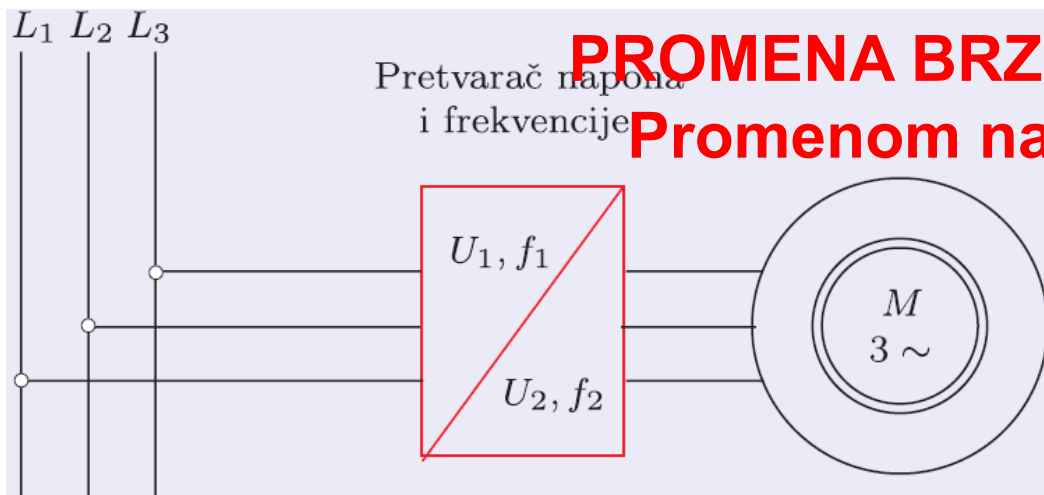
Povećavaju se gubici u bakru rotora i smanjuje koeficijent korisnog dejstva. Pretpostavimo da je momenat opterećenja konstantan:

$$m_c = m_m = M_{RM} = p \frac{P_{ob}}{\omega_s}$$

Smanjenjem napona opada brzina **AM**, a klizanje raste. Snaga konverzije opada, a gubici u bakru rotora rastu.

$$p_c = (1 - s) \cdot P_{ob}$$

$$g_{Cur} = s \cdot P_{ob}$$



PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

Promenom napona i frekvencije napajanja

Brzina obrtanja AM direktno je proporcionalna frekvenciji: $n = \frac{60 f_s}{p} (1 - s)$

Ali, se u motoru sa promenom frekvencije menja i **fluks** - **indukcija** što utiče na promenu razvijenog momenta.

$$U_s \approx E_s = 4,44 \cdot N \cdot f_s \cdot \Phi = 4,44 \cdot N \cdot f_s \cdot B \cdot S$$

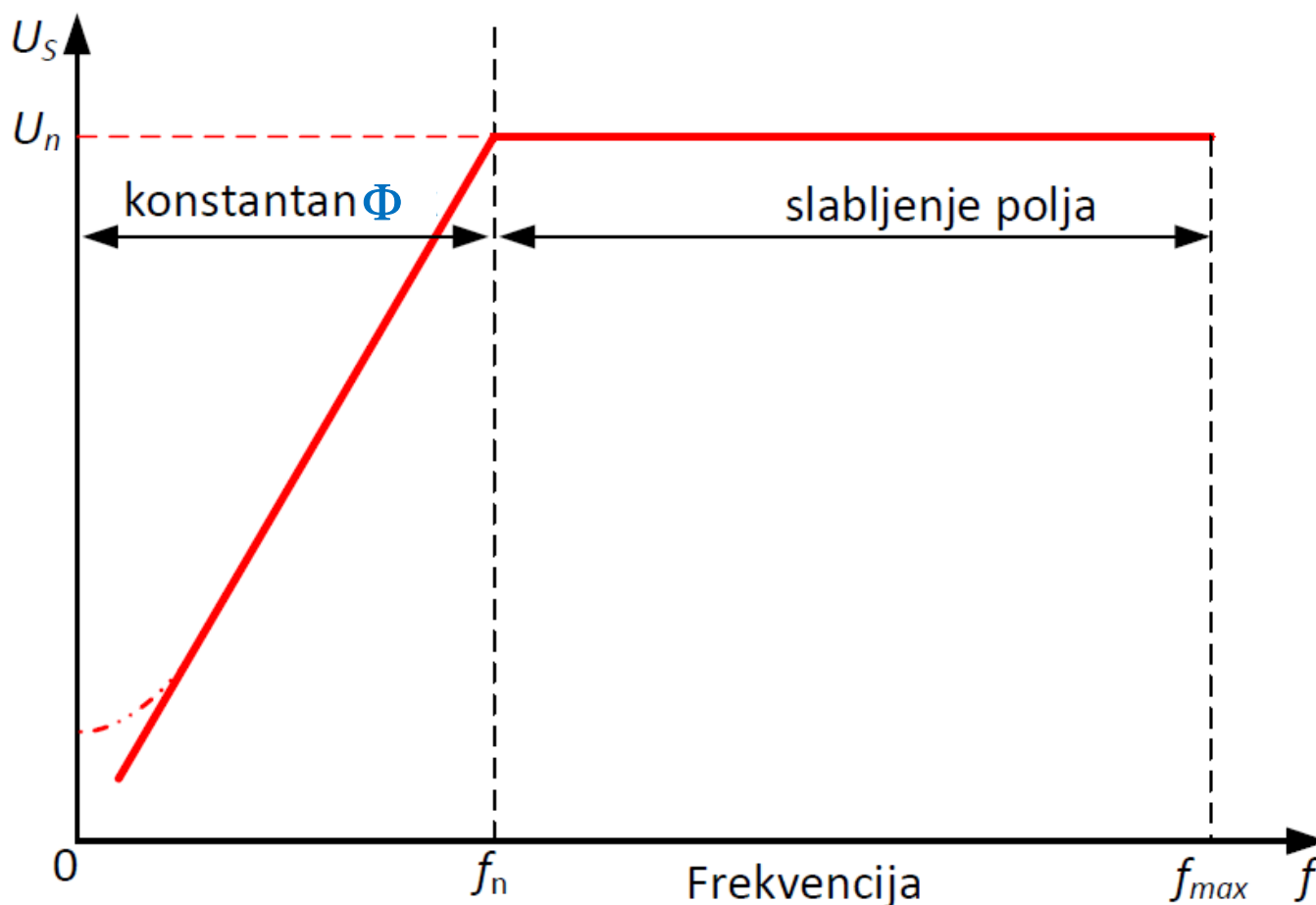
Ako promenimo f_s uz stalan napon promeniće se fluks Φ , odnosno B indukcija. Povećanje B nije dozvoljeno zbog zasićenja magnetnog kola, a smanjenje Φ nije prihvatljivo jer je praćeno smanjenjem momenta koji motor razvija. Zbog toga se istovremeno menjaju napon i frekvencija tako da je njihov odnos stalan.

$$\frac{E_s}{f_s} \approx \frac{U_s}{f_s} = \frac{U_{s \text{ nom}}}{f_{s \text{ nom}}}$$

Time se postiže da je fluks u mašini približno nominalan. Ovo je poznato kao U/f upravljanje AM.

PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

Promenom napona i frekvencije napajanja



Promena napona i frekvencije pri U/f zakonu upravljanja.
Promena frekvencije napona napajanja omogućuje podešavanje brzine AM u širokom opsegu do $2 \cdot f_{snom}$.

PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

Promenom napona i frekvencije napajanja

$$m_c = M = \frac{3 \cdot p}{2\pi \cdot f_s} U^2 \frac{\frac{R'_r}{s}}{\left(R_s + \frac{R'_r}{s}\right)^2 + \left(X_{\gamma s} + X'_{\gamma rk}\right)^2} = M_{RM}$$

Ako pretpostavimo da je momenat opterećenja konstantan i ako zanemarimo R_s onda je apsolutno klizanje ω_r konstantno pri primenjenom U/f zakonu upravljanja.

$$m_c = M = 3 \cdot p \left(\frac{U}{2\pi \cdot f_s} \right)^2 \frac{\omega_r \cdot R'_r}{R_r'^2 + \omega_r^2 (L_{\gamma s} + L'_{\gamma rk})^2} = M_{RM}$$

Ako je momenat radne mašine konstantna pri $U/f=\text{const.}$ tada je $\omega_r=\text{const.}$

PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

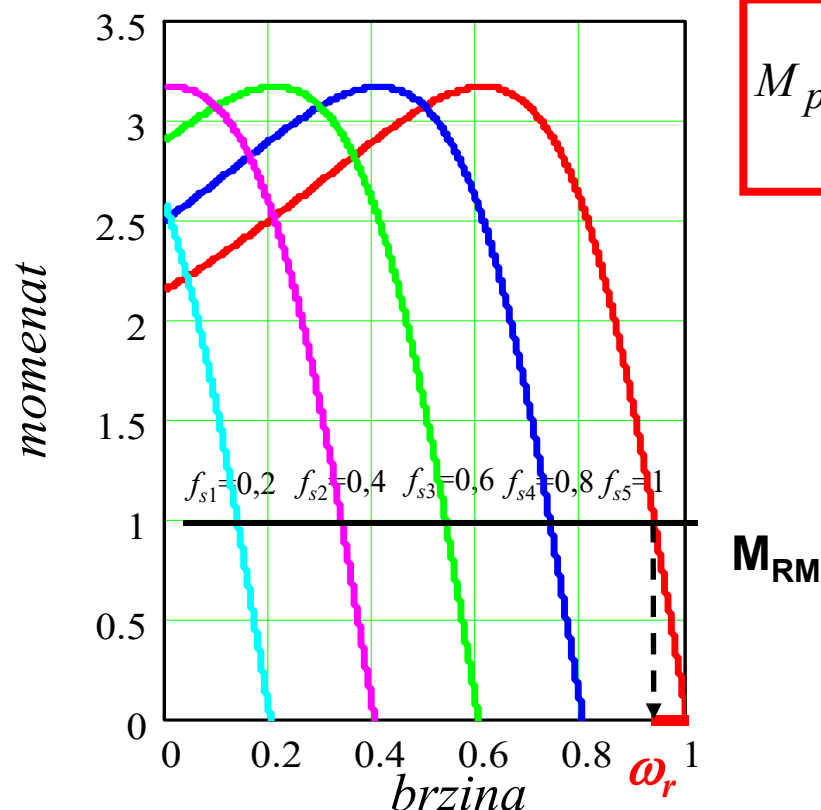
Promenom napona i frekvencije napajanja

Familija statičkih k-ka AM sa primenjenim $U/f=\text{const}$ zakonom upravljanja.

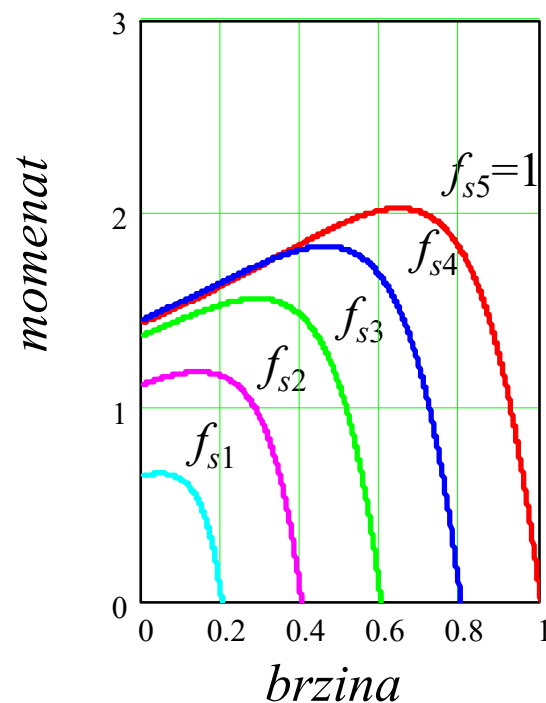
$$M_p = m_c(s = s_p) = \frac{3p}{2} \left(\frac{U}{2\pi \cdot f_s} \right)^2 \frac{1}{L_{\gamma k}}$$

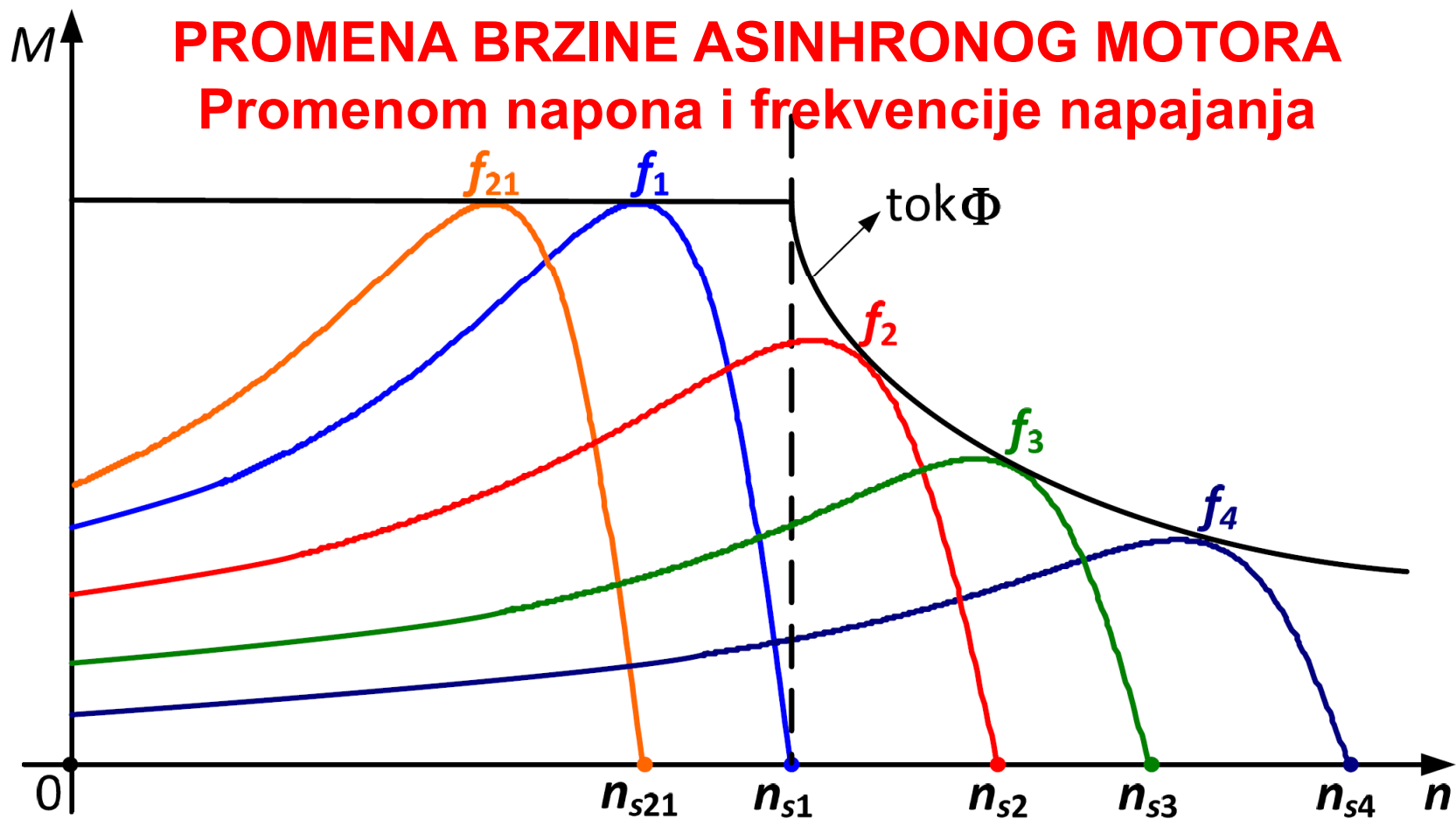
Ako R_s nije zanemarljivo prevadni momenat pada sa smanjenjem f_s ispod $f_{s \text{ nom}}$

$$M_p = m_c(s = s_p) = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot 2\pi \cdot f_s} \frac{U^2}{\pm R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{\gamma s} + X'_{\gamma rk})^2}}$$



Ako je momenat radne mašine konstantna pri $U/f=\text{const}$. tada je $\omega_r=\text{const}$.





Frekvencija f_1 je nominalna frekvencija za koju je građen motor. Smanjivanje frekvencije daje karakteristiku $U_{21}/f_{21} = \text{const.}$, tj. smanjeni su napon i frekvencija u odnosu na $U_1/f_1 = \text{const.}$

Povećanje frekvencije na f_2 nije moguće po zakonu $U/f = \text{const.}$ jer je napon za određeni motor određen gornjom granicom od $U = U_n$. Zbog povećanja frekvencije f_1 na f_2 , a nepromijenjenog napona, smanjen je Φ u motoru i razvijeni moment. To je tzv. **područje slabljenja polja**.

PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

Promenom napona i frekvencije napajanja

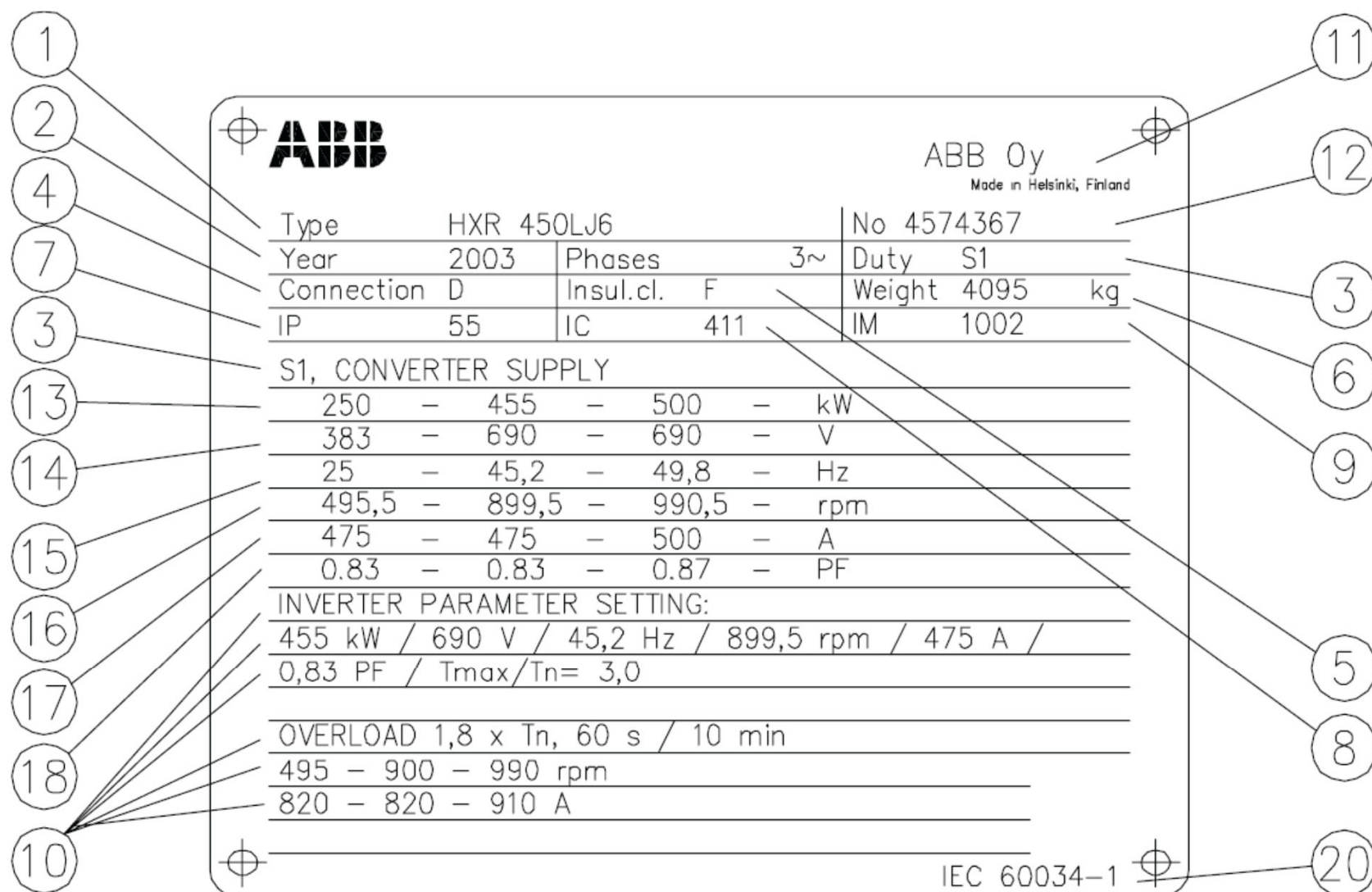
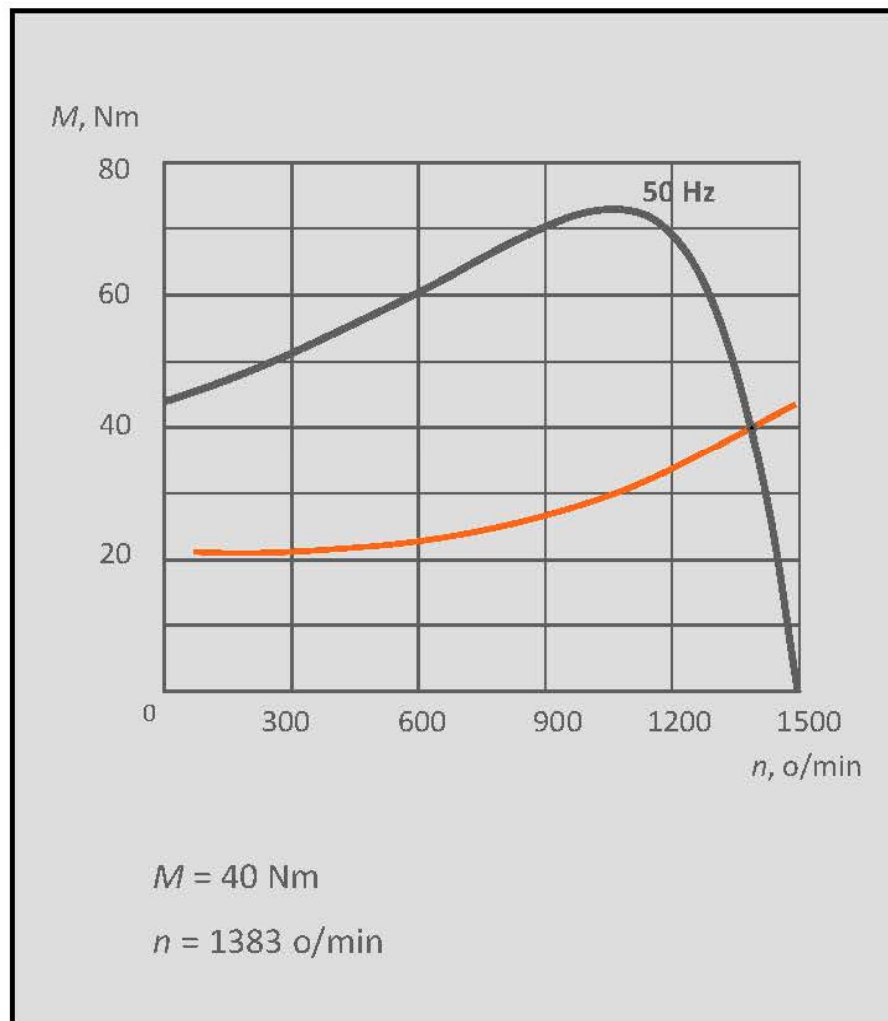


Figure 1-2 Rating plate for frequency converter machines manufactured according to IEC

Regulacija (namještanje) brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona i frekvencije



$U/f = \text{const.}$

$U = \text{var}, f = \text{const}$

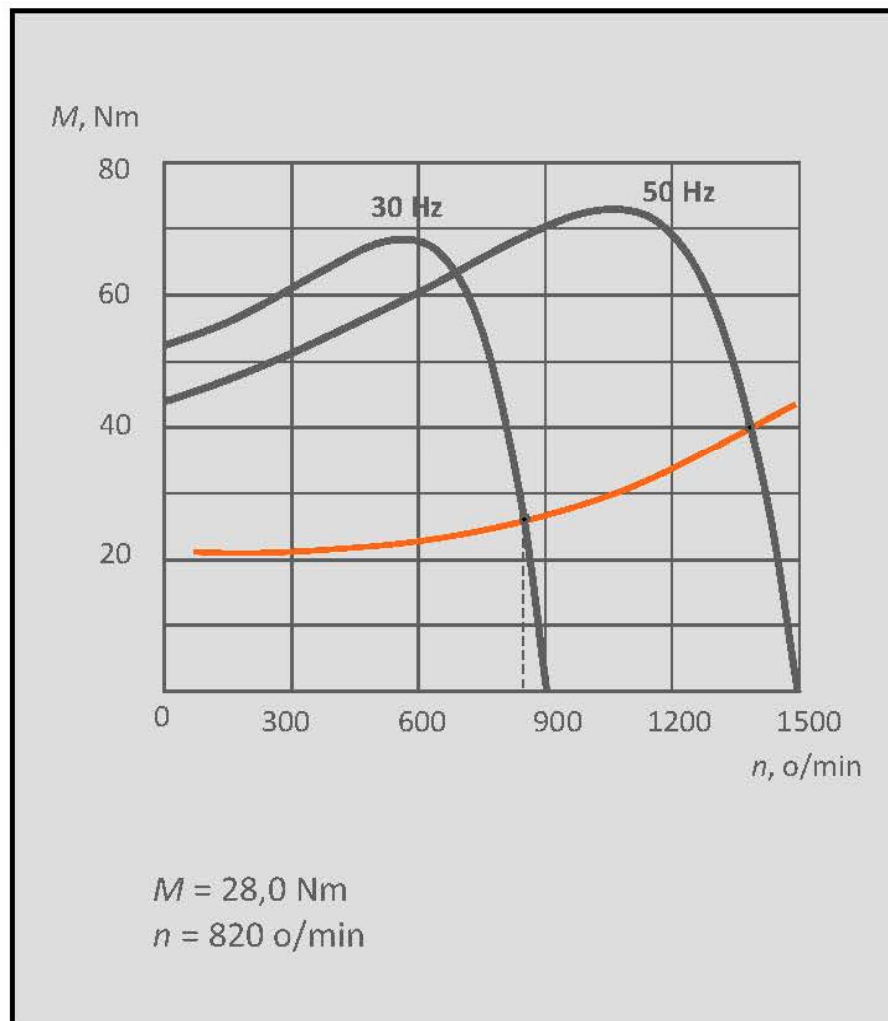
$f = 50$ Hz

$f = 30$ Hz

$f = 10$ Hz

Nastavi prezentaciju

Regulacija (namještanje) brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona i frekvencije



$U/f = \text{const.}$

$U = \text{var}, f = \text{const}$

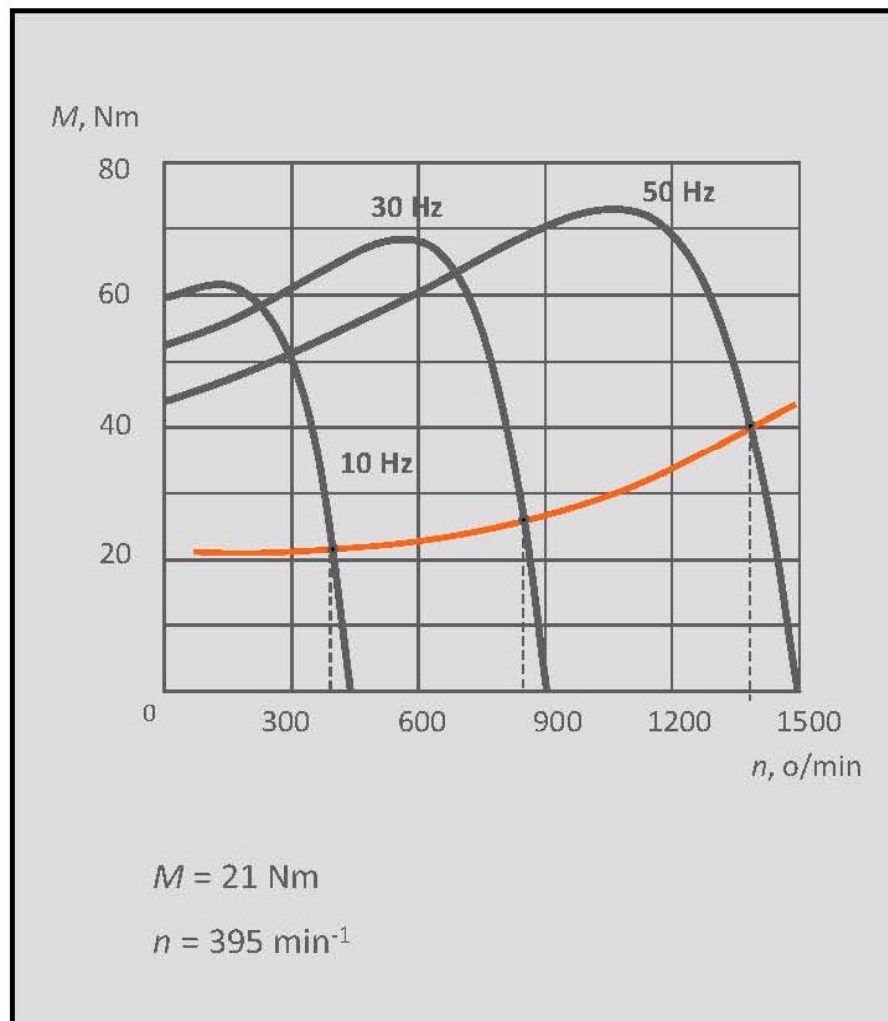
$f = 50 \text{ Hz}$

$f = 30 \text{ Hz}$

$f = 10 \text{ Hz}$

Nastavi prezentaciju

Regulacija (namještanje) brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona i frekvencije



$U/f = \text{const.}$

$U = \text{var}, f = \text{const}$

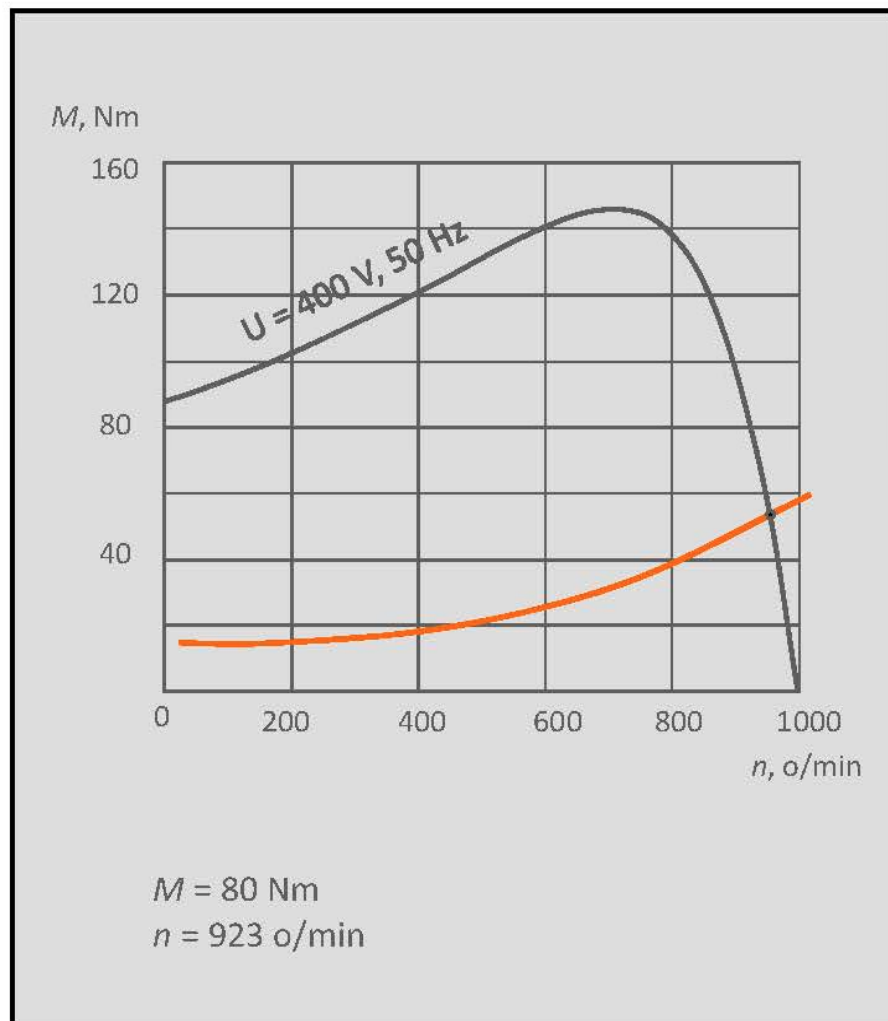
$f = 50 \text{ Hz}$

$f = 30 \text{ Hz}$

$f = 10 \text{ Hz}$

Nastavi prezentaciju

Regulacija (namještanje) brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona i frekvencije



$U/f = \text{const.}$

$U = \text{var}, f = \text{const.}$

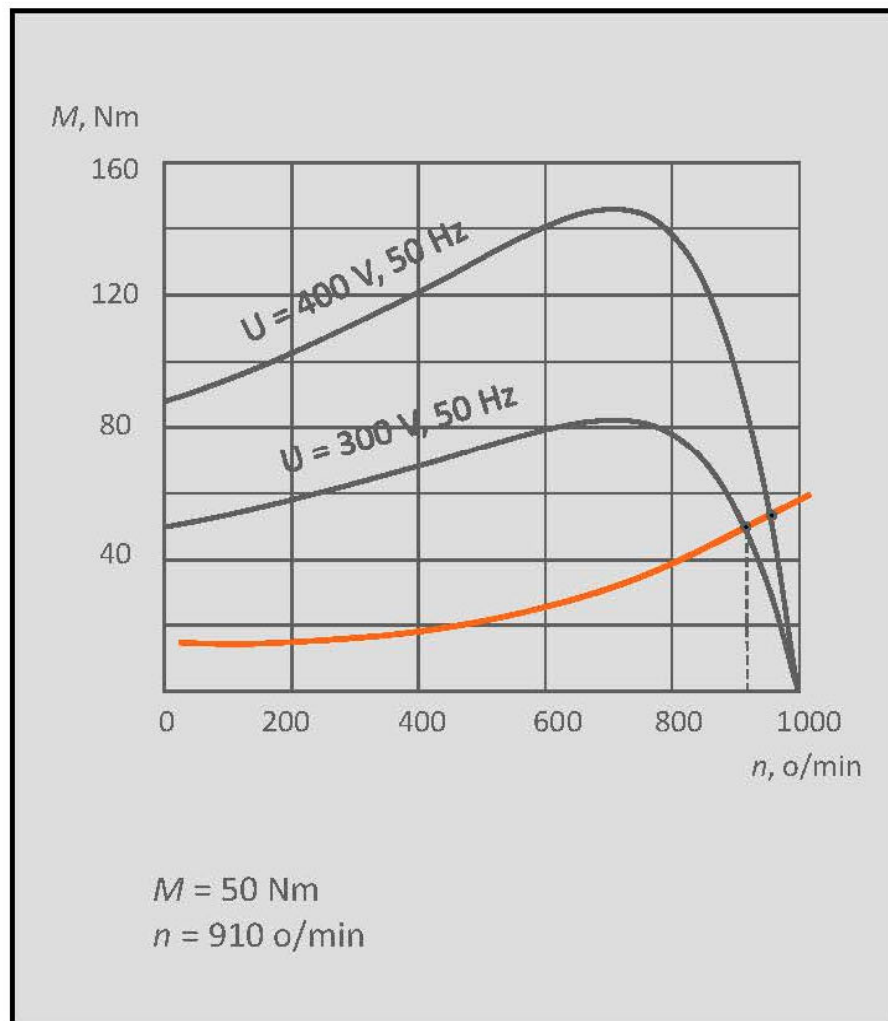
$U = 400 \text{ V}$

$U = 300 \text{ V}$

$U = 200 \text{ V}$

Nastavi prezentaciju

Regulacija (namještanje) brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona i frekvencije



$U/f = \text{const.}$

$U = \text{var}, f = \text{const}$

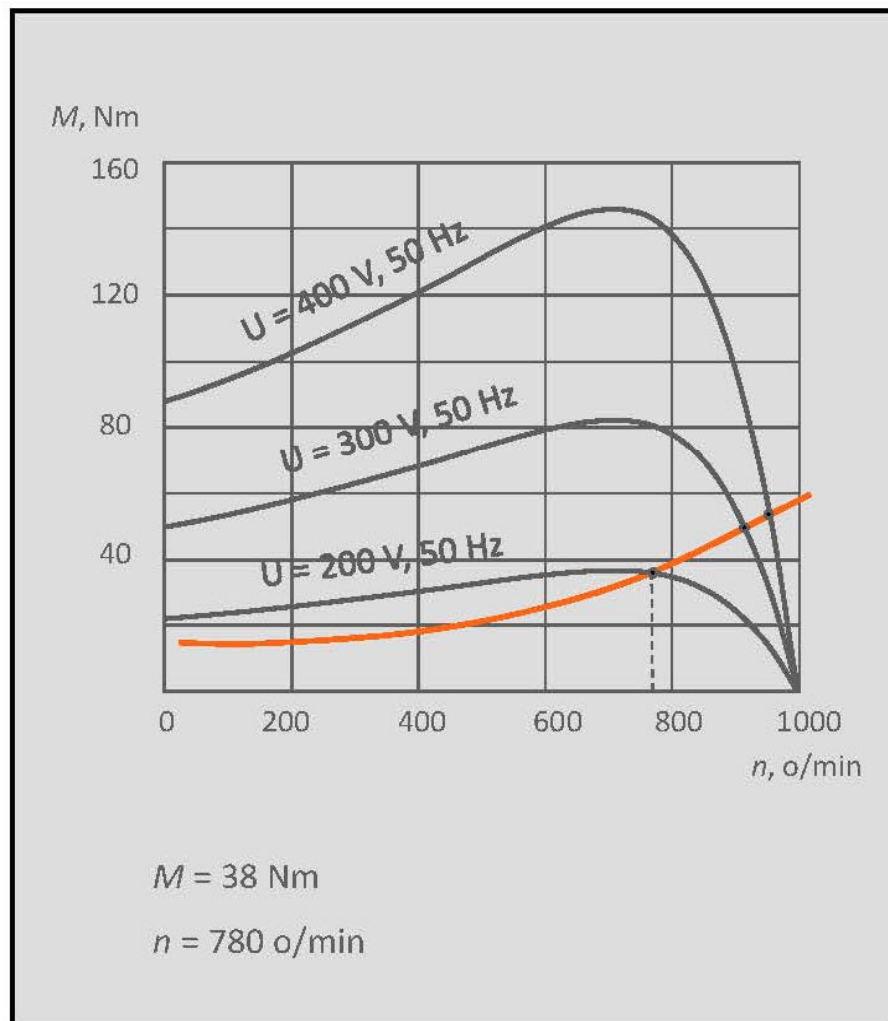
$U = 400\text{ V}$

$U = 300\text{ V}$

$U = 200\text{ V}$

Nastavi prezentaciju

Regulacija (namještanje) brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona i frekvencije



$U/f = \text{const.}$

$U = \text{var}, f = \text{const.}$

$U = 400 \text{ V}$

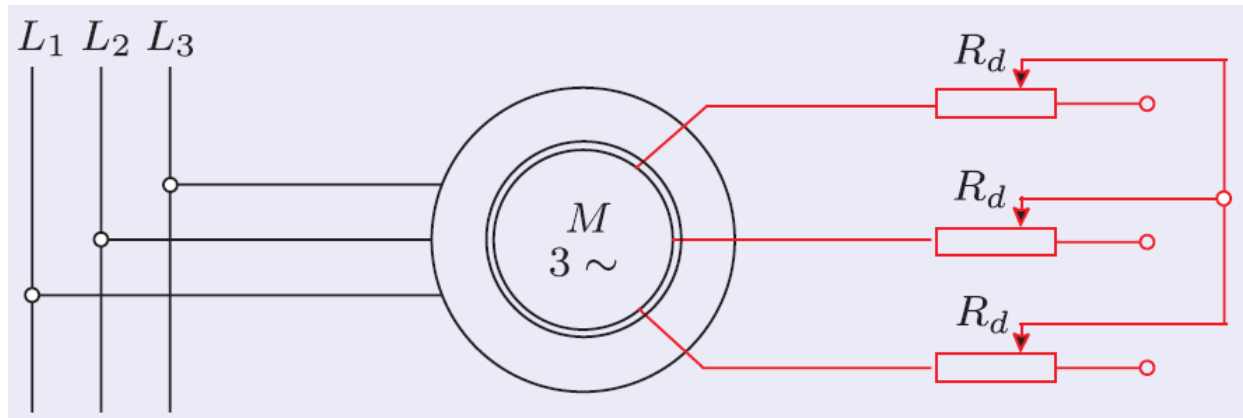
$U = 300 \text{ V}$

$U = 200 \text{ V}$

Nastavi prezentaciju

PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

Promenom otpornosti dodatnog otpornika u kolu rotora



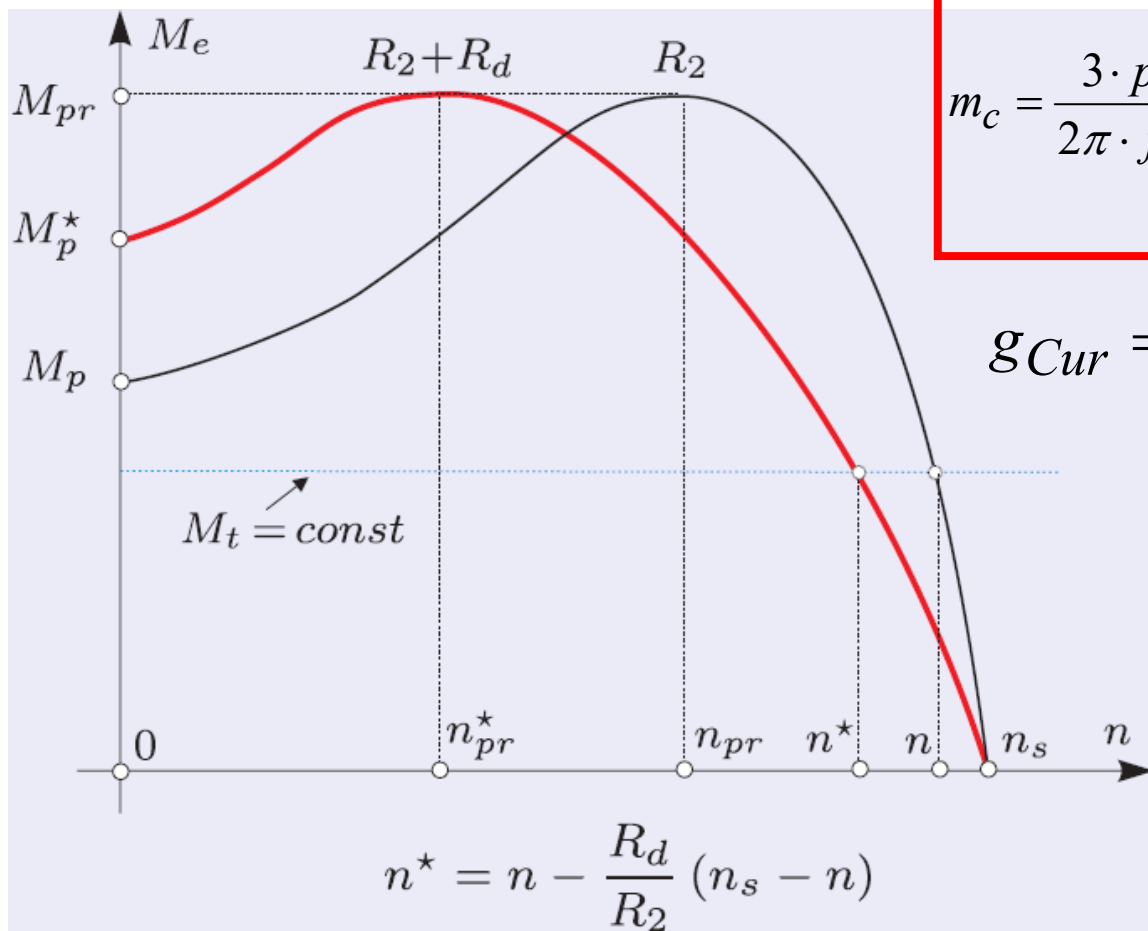
Uključenjem otpornika u kolo rotora smanjuje se struja a samim tim i obrtni momenat i motor usporava, povećava se klizanje.

Zbog povećanja klizanja raste indukovani napon koji povećava struju. Klizanje se povećava sve dok se pri nekoj sniženoj brzini ne izjednači momenat koji motor razvija sa momentom opterećenja – **momenat radne** mašine.

PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

Promenom otpornosti dodatnog otpornika u kolu rotora

Statičke k-ke AM sa dodatnim otpornikom u kolu rotora.



$$m_c = \frac{3 \cdot p}{2\pi \cdot f_s} U^2 \frac{\frac{R'_r + R'_{rd}}{s}}{\left(R_s + \frac{R'_r + R'_{rd}}{s}\right)^2 + (X_{\gamma s} + X'_{\gamma rk})^2}$$

$$g_{Cur} = s \cdot P_{ob} = 3(R_r + R'_{rd})I_r'^2$$

Glavni nedostatak promene brzine dodatnim otpornikom u kolu rotora je povećanje snage gubitaka na dodatnom otporniku i smanjenje koeficijenta korisnog dejstva.

PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

Promenom otpornosti dodatnog otpornika u kolu rotora

Dodatna otpornost u rotorskom kolu menja mehaničku ka-ku asinhronog motora jer se menjaju vrednosti:

• **Polaznog momenta** -može se uticati na njegovo povećanje:

$$M_{pol} = \frac{3 \cdot p \cdot U^2}{2\pi \cdot f_s} \frac{R'_r + R'_{rd}}{(R_s + R'_r + R'_{rd})^2 + (X_{js} + X'_{rk})^2}$$

• **Prevalno klizanje:**

$$s_p = \pm \frac{R'_r + R'_{rd}}{\sqrt{R_s^2 + (X_{js} + X'_{rk})^2}} \approx \pm \frac{R'_r + R'_{rd}}{X_{js} + X'_{rk}}$$

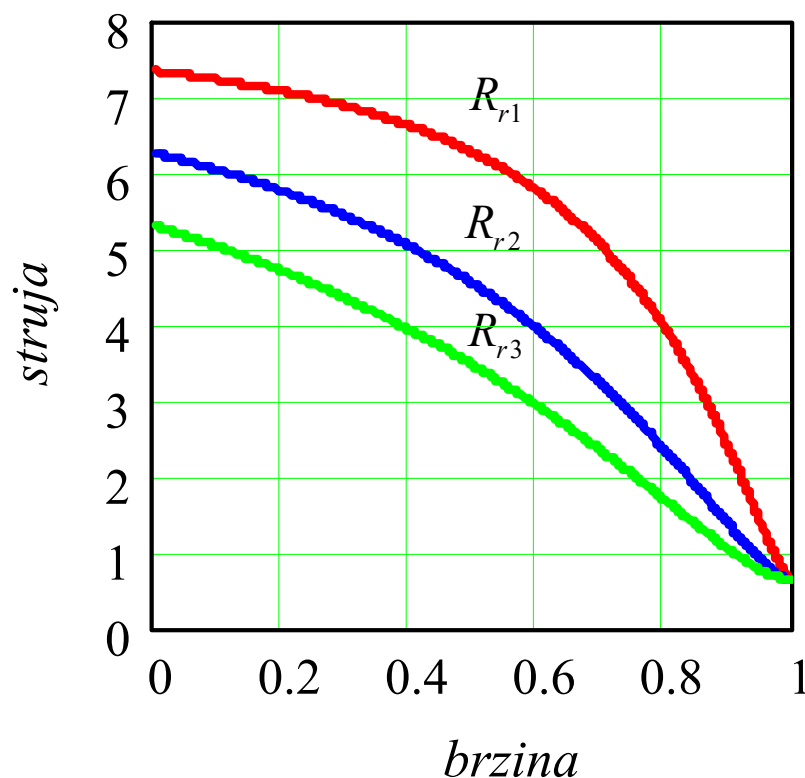
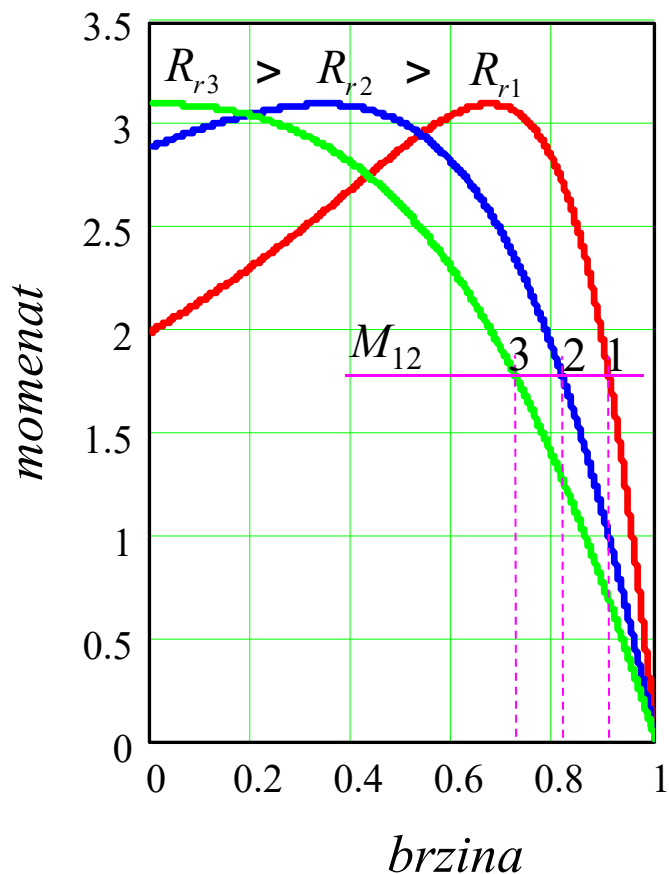
Adekvatnim izborom R_{rd} može se postići da je polazni momenat jednak sa prevalnim.

$$s_p = 1 = \frac{R'_r + R'_{rd}}{\sqrt{R_s^2 + (X_{js} + X'_{rk})^2}} \quad m_{pol} = M_{pr}$$

PROMENA BRZINE ASINHRONOG MOTORA

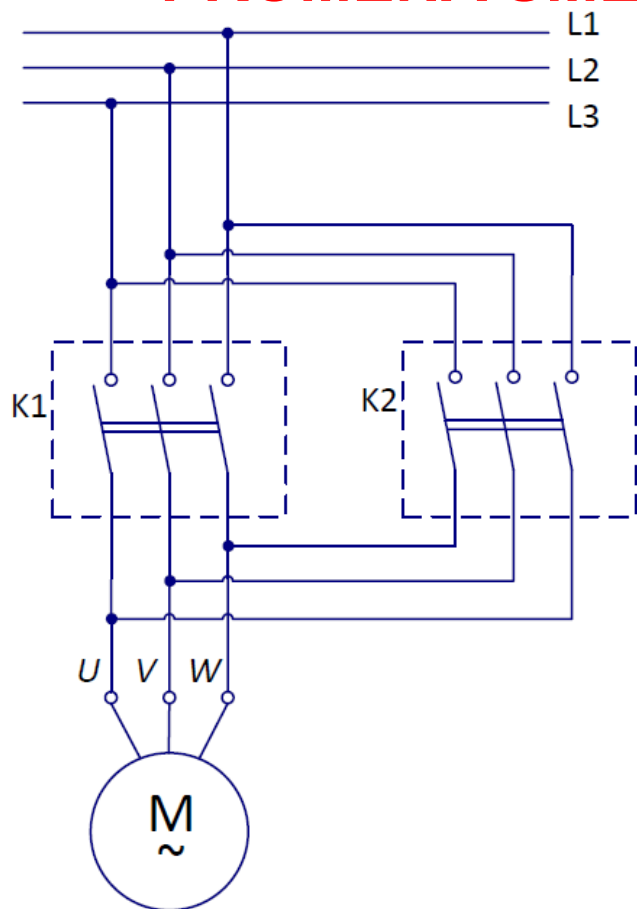
Promenom otpornosti dodatnog otpornika u kolu rotora

Statičke k-ke AM sa dodatnim otpornikom u kolu rotora.



Prevalni momenat se ne menja. Polazne struje se smanjuju. Regulacioni opseg je ograničen 20÷30% ispod n_s kako bi se održao prihvatljiv η , jer za nižu brzinu treba veći dodatni otpornik.

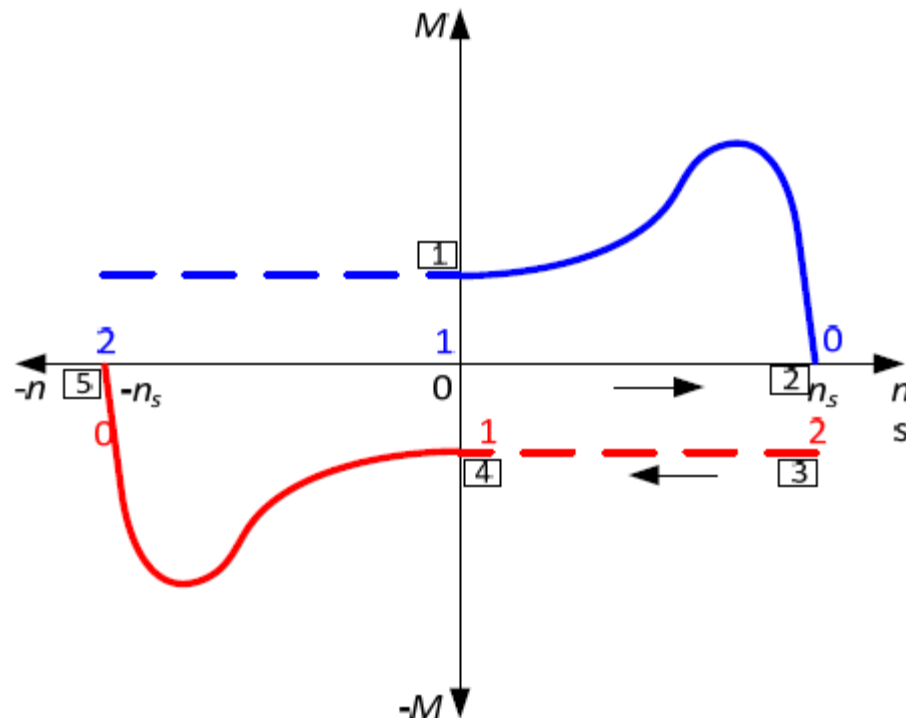
PROMENA SMERA OBTANJA ASINHRONOG MOTORA



Rotor AM prati smer obrtnog polja. Smer obrtnog polja određen je redosledom faza. Ako je potrebno promeniti smer obrtanja AM dovoljno je međusobno zameniti priključke 2 od 3 fazna namota trofaznog motora. Reverziranje – promena smer obrtanja AM se može realizovati upotrebom kontaktora.

PROMENA SMERA OBRATANJA ASINHRONOG MOTORA

Momentna karakteristika AM u procesu reverziranja.



1 – Motor kreće iz mirovanja ($s=1$)

2 – Motor se zaleće do približno sinhronne brzine obrtanja ($s \ll 1$)

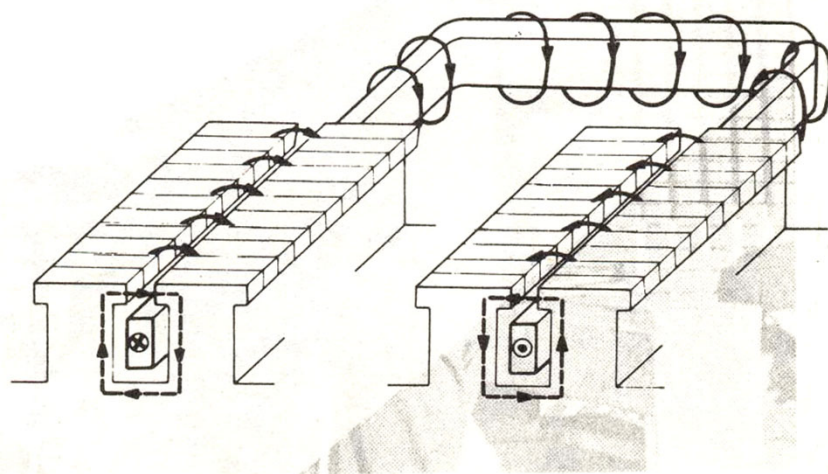
3 – Uz beznaponsku pauzu vrši se zamena redosleda faza, motor prelazi u protivstrujno kočenje ($s=2$)

4 – Motor koči do brzine 0 ($s=1$)

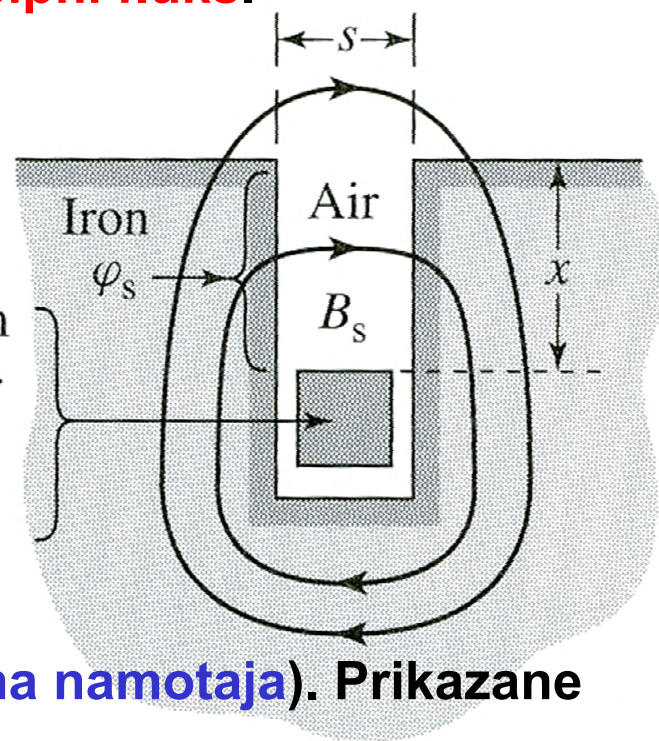
5 – Motor se zaleće do približno sinhronne brzine obrtanja u suprotnom smeru ($s \ll 1$)

Uticaj oblika žlebova rotora na mehaničku karakteristiku AM

Termogena otpornost namota može se izračunati iz specifične provodnosti, preseka i ukupne dužine. Ovim je definisana termogena otpornost namota za prolaz jednosmerne struje. Međutim, otpornost naizmeničnoj struji prividno raste zbog pojave potiskivanja struje. Oko provodnika kroz koji prolazi struja zatvara se fluks, a deo tog fluksa ne zatvara se kroz glavno magnetno kolo – **rasipni fluks**.



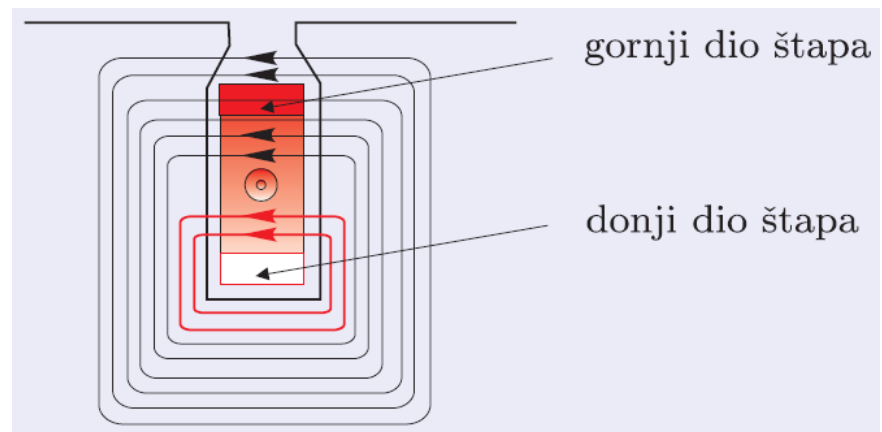
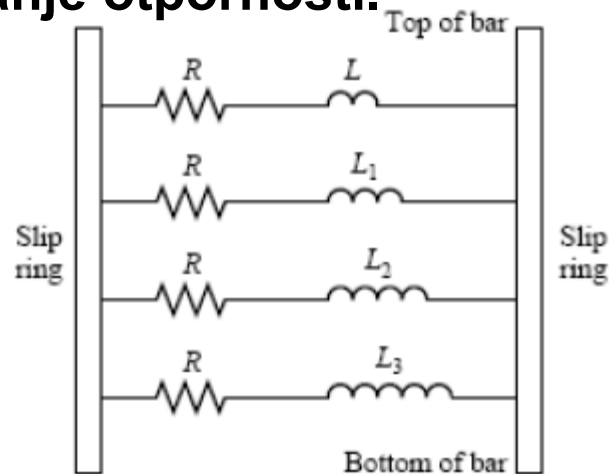
Cross section
of conductor
carrying
current i



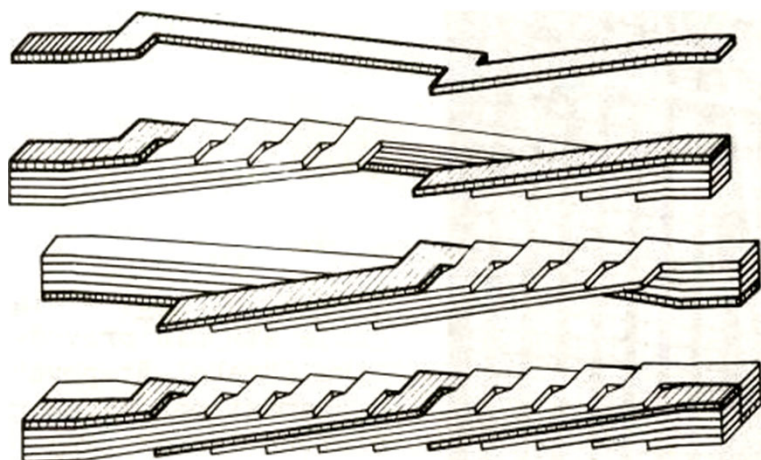
Ilustracija za rasipni fluks (**žlebni** i na **glavama namotaja**). Prikazane silnice odnose se na rasipni fluks.

Uticaj oblika žlebova rotora na mehaničku karakteristiku AM

Kada bi magnetna provodnost gvožđa bila beskonačna sve silnice fluksa zatvarale bi se idući ispod žleba kao na slici. Oni delovi provodnika koji se nalaze pri dnu žleba obuhvaćeni su većim fluskom – rasipnim nego oni delovi koji su bliži otvoru (vrhu) žleba. Rasipna induktivnost dubljih slojeva veća je nego rasipna induktivnost gornjih slojeva, jer su donji slojevi obuhvaćeni većim rasipnim fluksom. Svi slojevi su paralelni u električnom smislu. Rezultantno ekvivalentno kolo za šipku smeštenu u žlebu rotora prikazno je na slici. Pojava potiskivanja struje se manifestuje kao istiskivanje struje iz donjeg dela žleba koji je obuhvaćen sa dosta rasipnog fluksa u gornji deo žleba koji je obuhvaćen sa manjim rasipnim fluksom. Kako struja teče pretežno kroz gornji deo, onda jedan deo preseka provodnika (pri dnu žleba) ostaje neiskorišćen. Struja prolazi kroz smanjen presek, a smanjen presek znači efektivno povećanje otpornosti.



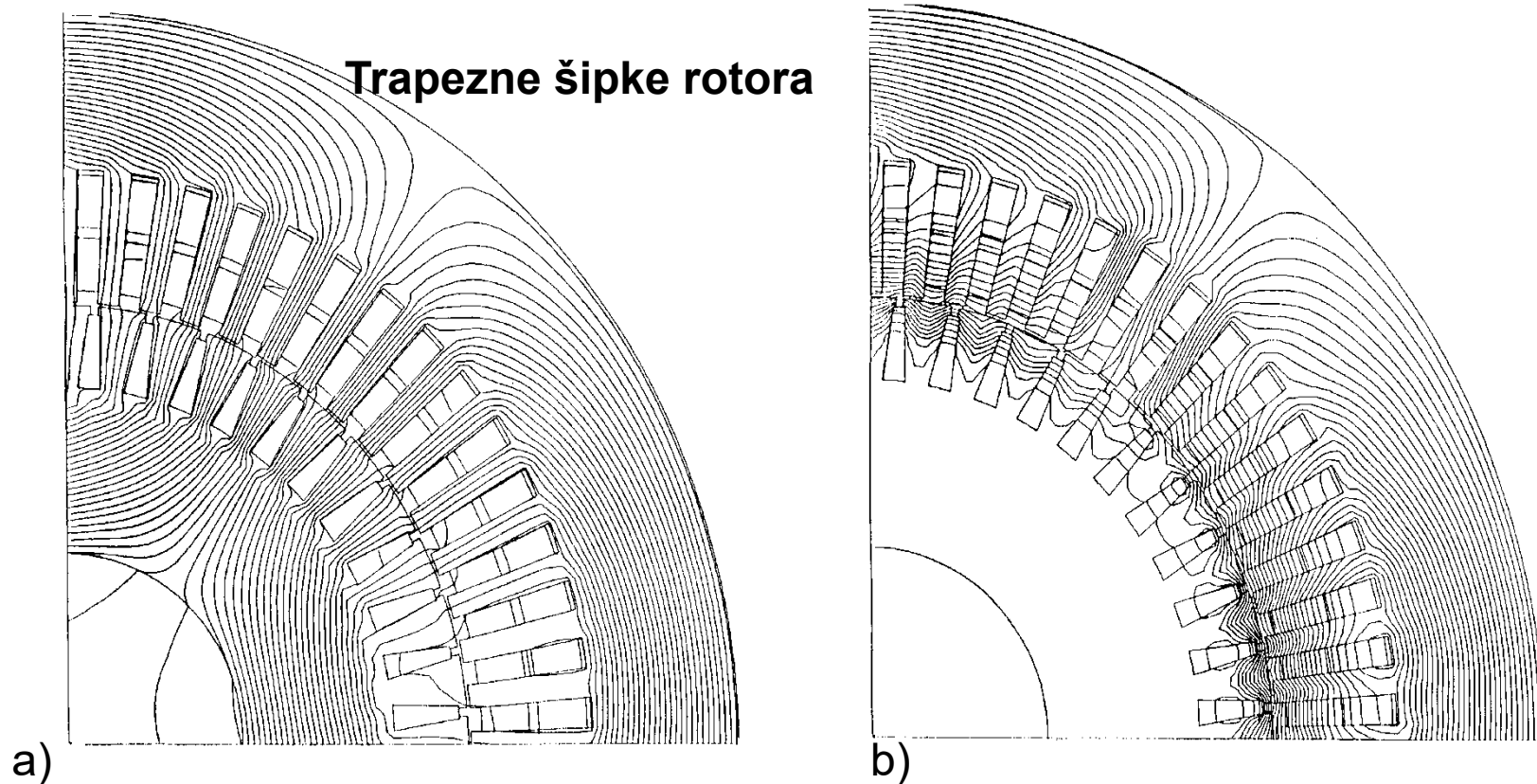
Uticaj oblika žlebova rotora na mehaničku karakteristiku AM
Zbog toga je visina provodnika kod AC struje ograničena na $4\div 6\text{mm}$. Da bi se i pored ovog dobili provodnici potrebnog preseka za potrebnu struju radi se namot sa paralelnim granama. Za još veće preseke upotrebljavaju se Rebel štapovi. Ti se štapovi sastoje od više profilne žice koje su po dužini međusobom izolovane. Profilna žica u štapu je tako transponovana da svaka podjednako prolazi i gornjim i donjim delom žleba. **Za provodnik na statoru provode se mere za suzbijanje efekta potiskivanja.**



←Konstrukcije provodnika za suzbijanje potiskivanja struje (“Rebel-štap”)

Uticaj oblika žlebova rotora na mehaničku karakteristiku AM

Linije fluksa dobijene konačnim elementima. Magnetna provodnost Fe je konačna.



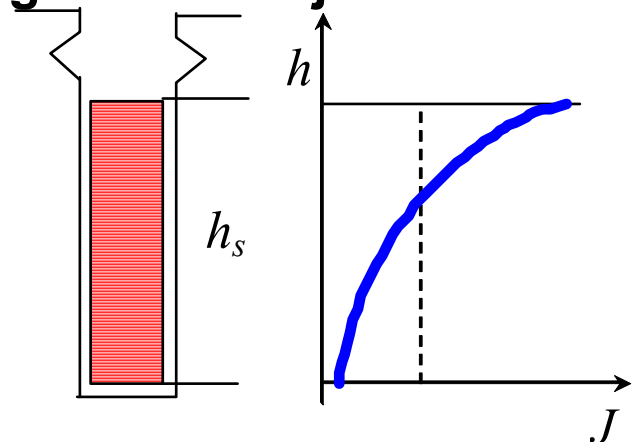
- a) Prazan hod: Frekvencija rotorskih struja ≈ 0 : **Nema efekta potiskivanja struje.**
- b) Zakočen rotor ($s = 1$): Frekvencija rotorskih struja = frekvenciji na statoru: **Izražen efekat potiskivanja**. Rotor current phase opposite to stator current; flows mainly in upper part of rotor bars, **repulses stator field to air gap.**

Uticaj oblika žlebova rotora na mehaničku karakteristiku AM

U provodniku sa naizmeničnom strujom postoji **nejednaka gustina struje** po dubini provodnika. Ova pojava se manifestuje kao povećanje termogne otpornosti provodnika. Koeficijent povećanja otpornosti zbog nejednake gustine struje:

$$K_R = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} = \frac{R_{ac}}{R_{dc}}$$

$$K_L = \frac{3}{2\xi} \frac{\sinh 2\xi - \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi} = \frac{(L_{\gamma\check{z}})_{ac}}{(L_{\gamma\check{z}})_{dc}}$$



Raspodela gustine struje po dubini žleba.

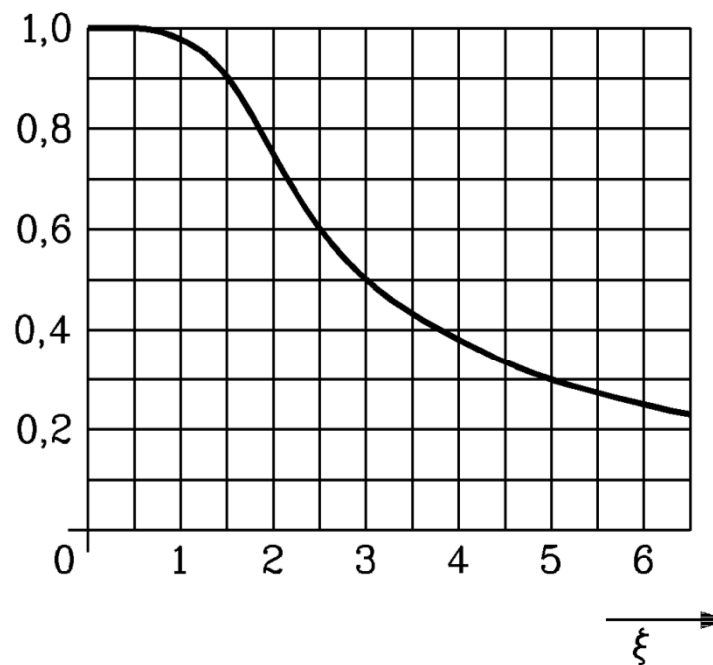
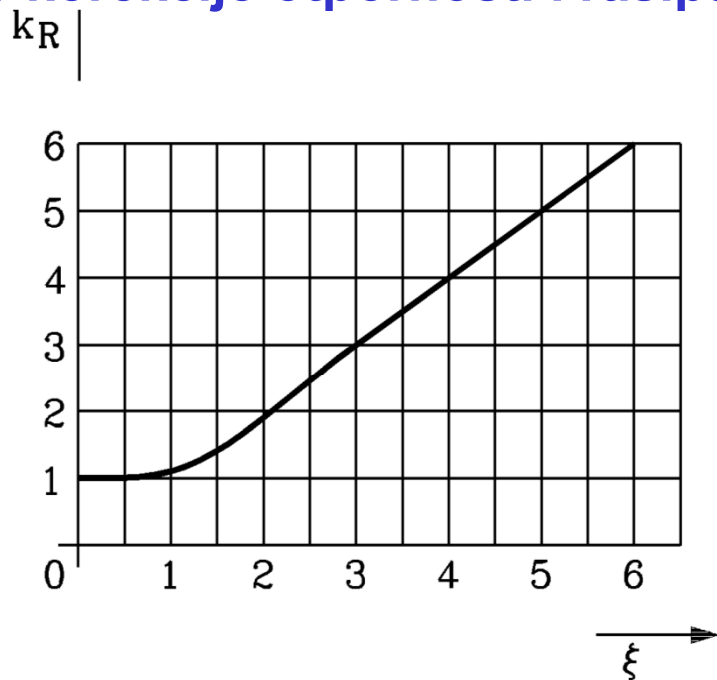
$$\xi = \beta \cdot h_s = \frac{h_s}{\delta_{Cu}} [r \cdot j]; \beta = \frac{1}{\delta_{Cu}} = \sqrt{\frac{s \cdot \omega_1 \cdot \mu_0 \cdot \sigma_{Cu}}{2}}$$

ξ – virtuelna (redukovana) visina provodnika;

δ_{Cu} – dubina prodiranja, visina žleba na kojoj J opadne na $1/e$ vrednosti na površini provodnika.

Koeficijent K_R je poznat kao Fildov sačinilac povećanja gubitaka (otpornosti). Potiskivanjem struje u provodniku menja se i fluks rasipanja odnosno induktivnost rasipanja koja se koriguje sa K_L . Na vrednost Fildovog sačinioca utiče visina provodnika i frekvencija.

Faktor korekcije otpornosti i rasipanja od redukovane visine provodnika



Faktori korekcije su dati za provodnik pravougaonog porečnog preseka u dubokom žlebu. Za uobičajene dubine žlebova veće od 2cm važi da je:

$$K_R = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} \approx \xi$$

$$K_L = \frac{(L_{\gamma\check{z}})_{ac}}{(L_{\gamma\check{z}})_{dc}} \approx \frac{3}{2\xi}$$

PRIMER:

- **Bakarni štap u dubokm žlebu:**

- Na temperaturi 75°C provodnost Cu je $\sigma_{Cu} = 50 \cdot 10^6 \text{ S/m}$.

- Permeabilnost: $\mu_{Cu} = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/(Am)}$

- Za ukočen rotor $s = 1$: Rotor frequency $f_r = 50 \text{ Hz}$

- Visina štapa: $h_s = 3 \text{ cm}$

$$\xi = h_s \sqrt{\frac{s \cdot \omega_1 \cdot \mu_0 \cdot \sigma_{Cu}}{2}} = 3 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{1 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 50 \cdot 10^6}{2}} = 2,98 \approx 3$$

Sa krive $k_R(\xi)$ se dobija: $k_R(3) = 3$ i sa $k_L(\xi)$ sledi: $k_L(3) = 0,5$.

- **Primedba:** Na 50Hz koeficijent povećanje otpornosti bakarnog štapa je: $k_R = h_s [\text{cm}]$

- **Zaključak 1:**

- Otpornost rotorskog štapa je uvećana **3-puta u odnosu na otpornost DC struji!**

- Induktivnost rasipanja rotorskog štapa je **smanjena za 50%.**

- **Zaključak 2:**

- **Rr raste** a **Xγ opada** kako raste dubina žleba, čime se smanjuje polazna struja a povećava polazni momenat.

Uticaj oblika žlebova rotora na mehaničku karakteristiku AM

Pojava potiskivanja struje dolazi naročito do izražaja kod struja viših frekvencija gde je poznata kao skin efekat.

Efekat povećanja termogene otpornosti naročito je bitan kod kaveznih AM a kod specijalnih oblika žlebova rotora efekat je iskorišćen za značajno povećanje polaznog momenta. **Efekat potiskivanja je izraženiji što je žleb dublji**, zbog toga se izrađuju duboki žlebovi na rotoru AM.

Kako pojava potiskivanja struje zavisi od frekvencije pun efekat se ima u trenutku uključanja AM. Kako tokom pokretanja brzina raste, frekvencija struja u rotoru opada pa potiskivanje iščezava, efektivna vrednost otpornosti rotora se približava vrednosti otporu jednosmerne struje.

Za AM koji će biti napajani iz pretvarača energetske elektronike provode se mere za ograničenje efekta potiskivanja.

It is possible to produce a variable rotor resistance by the use of deep rotor bars or double-cage rotors. The basic concept is illustrated with a deep-bar rotor in Figure 7-27. Figure 7-27a shows a current flowing through the upper part of a deep rotor bar. Since current flowing in that area is tightly coupled to the stator, the leakage inductance is small for this region. Figure 7-27b shows current flowing deeper in the bar. Here, the leakage inductance is higher. Since all parts of the rotor bar are in parallel electrically, the bar essentially represents a series of parallel electric circuits, the upper ones having a smaller inductance and the lower ones having a larger inductance (Figure 7-27c).

At low slip, the rotor's frequency is very small, and the reactances of all the parallel paths through the bar are small compared to their resistances. The impedances of all parts of the bar are approximately equal, so current flows through all parts of the bar equally. The resulting large cross-sectional area makes the rotor resistance quite small, resulting in good efficiency at low slips. At high slip (starting conditions), the reactances are large compared to the resistances in the rotor bars, so all the current is forced to flow in the low-reactance part of the bar near the stator. Since the *effective* cross section is lower, the rotor resistance is higher than before. With a high rotor resistance at starting conditions, the starting torque is relatively higher and the starting current is

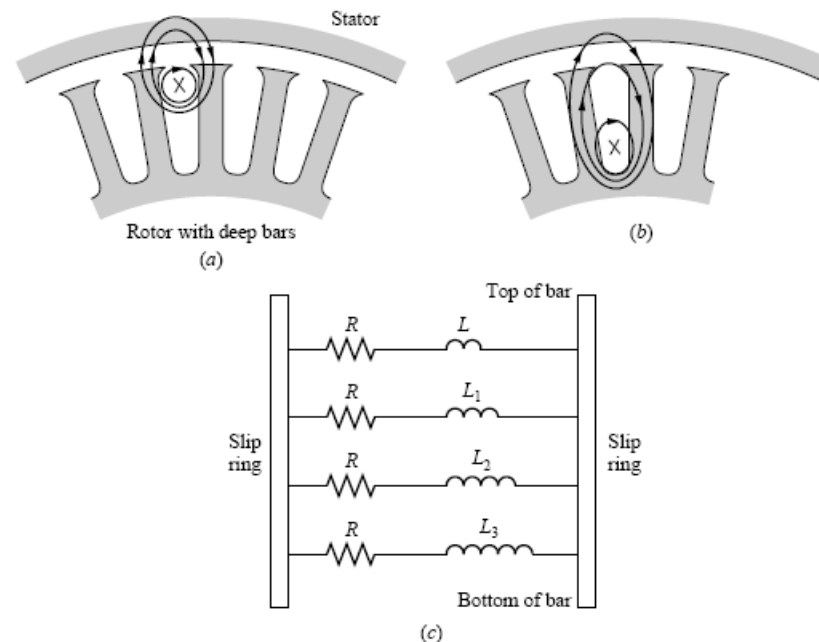


FIGURE 7-27

Flux linkage in a deep-bar rotor. (a) For a current flowing in the top of the bar, the flux is tightly linked to the stator, and leakage inductance is small; (b) for a current flowing in the bottom of the bar, the flux is loosely linked to the stator, and leakage inductance is large; (c) resulting equivalent circuit of the rotor bar as a function of depth in the rotor.

Otpor konture – navojka struji zavisi od njenog karaktera DC ili AC.

Uticaj oblika žlebova rotora na mehaničku karakteristiku AM

U odnosu na AM sa dubokim žlebovima na rotoru dalje smanjenje polazne struje na $I_s/I_n=4\div4,5$ i povećanje polaznog momenta ($M_{pol}>2M_n$) postiže se primenom rotora sa dvostrukim kavezom (Dolivo Dobrovolski i Boucherot). Ovi motori imaju donekle povećano klizanje i nešto lošiju korisnost, ali samo ovim motorima se može postići pokretanje uz $I_s \approx I_{sn}$ (Y/Δ) i $M_{pol} \approx M_n$.

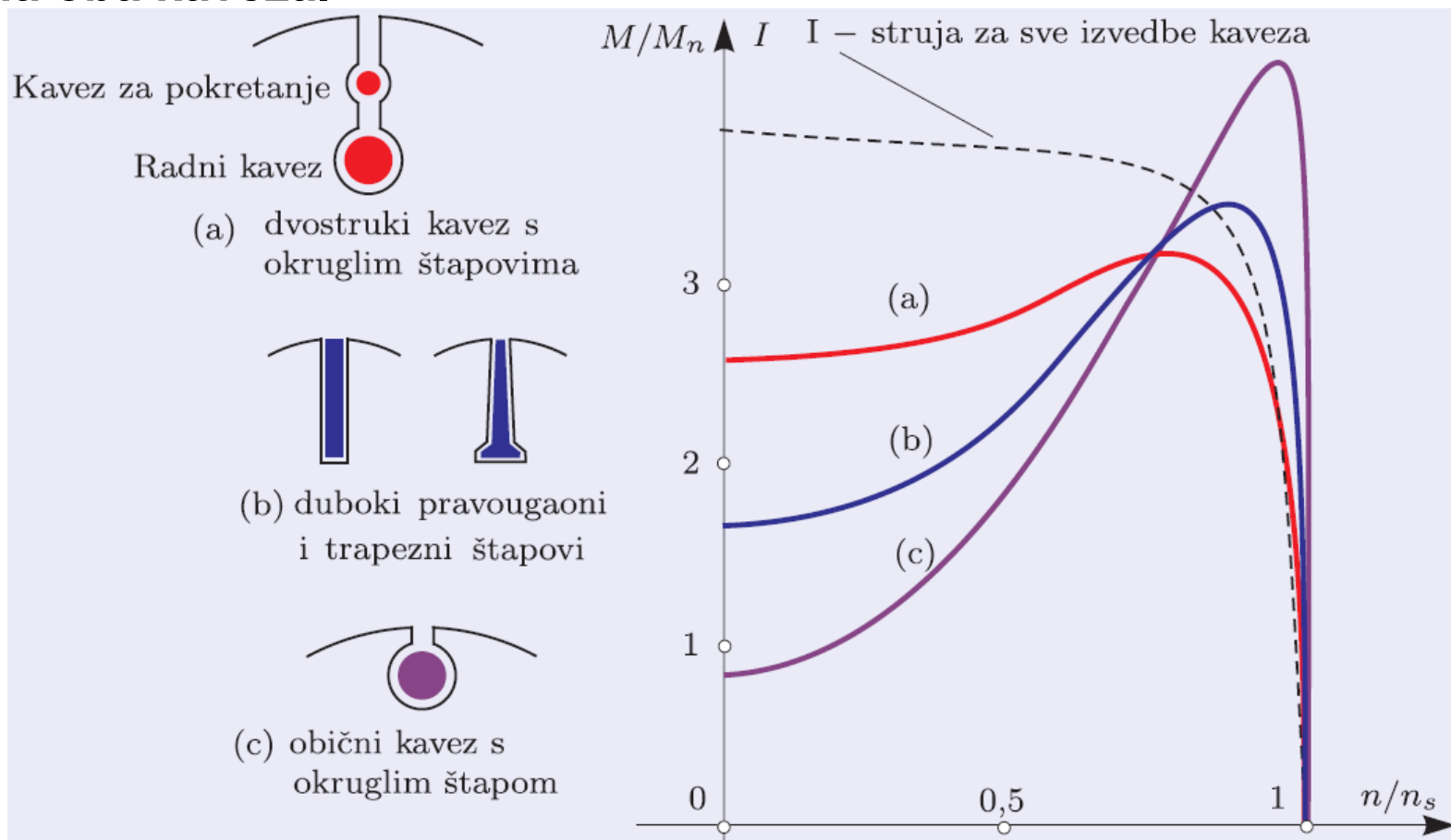
The following list shows examples of LIC motors delivered by ABB recently: LIC-low inrush current

Pcs.	I_s / I_n	Product	Power [kW]	Voltage [kV]	Pole number	Application
60	3.5	AMA 450/500	900	4.1 - 7.2	4	Mining Industry
4	3.1	AMC 900	9000	6.6	6	Fan
1	3.6	AMB 710	9000	6.6	4	Compressor
2	4.0	HXR 450	475	6.6	6	Compressor
4	4.0	AMD 500	540	6	4	Compressor
1	3.6	AMA 450	950	6.6	4	Pump
3	4.0	AMD 560	560	11	2	Pump
3	4.0	AMD 630	920	11	2	Pump
2	3.5	AMB 710	8000	10.4	4	Refiner
1	4.0	AMD 630	1980	4.16	4	Pump
5	4.0	AMI710	4000	10.5	4	Pumps

Ilustracija za smanjene struje polaska AM sa dva kaveza.

Uticaj oblika žlebova rotora na mehaničku karakteristiku AM

U žlebove bliže površini smeštaju se provodnici od materijala veće specifične otpornosti nego što je Cu (mesing i bronza). Drugi kavez je smešten u žlebove koji su znatno udaljeni od površine rotora pa usled toga imaju veliku induktivnost rasipanja. Na početku pokretanja zbog potiskivanja struje teku pretežno kroz provodnike spoljnog kaveza, koji imaju veću termogenu otpornost (materijal). Posle zaleta struja se rasporedi na oba kaveza.



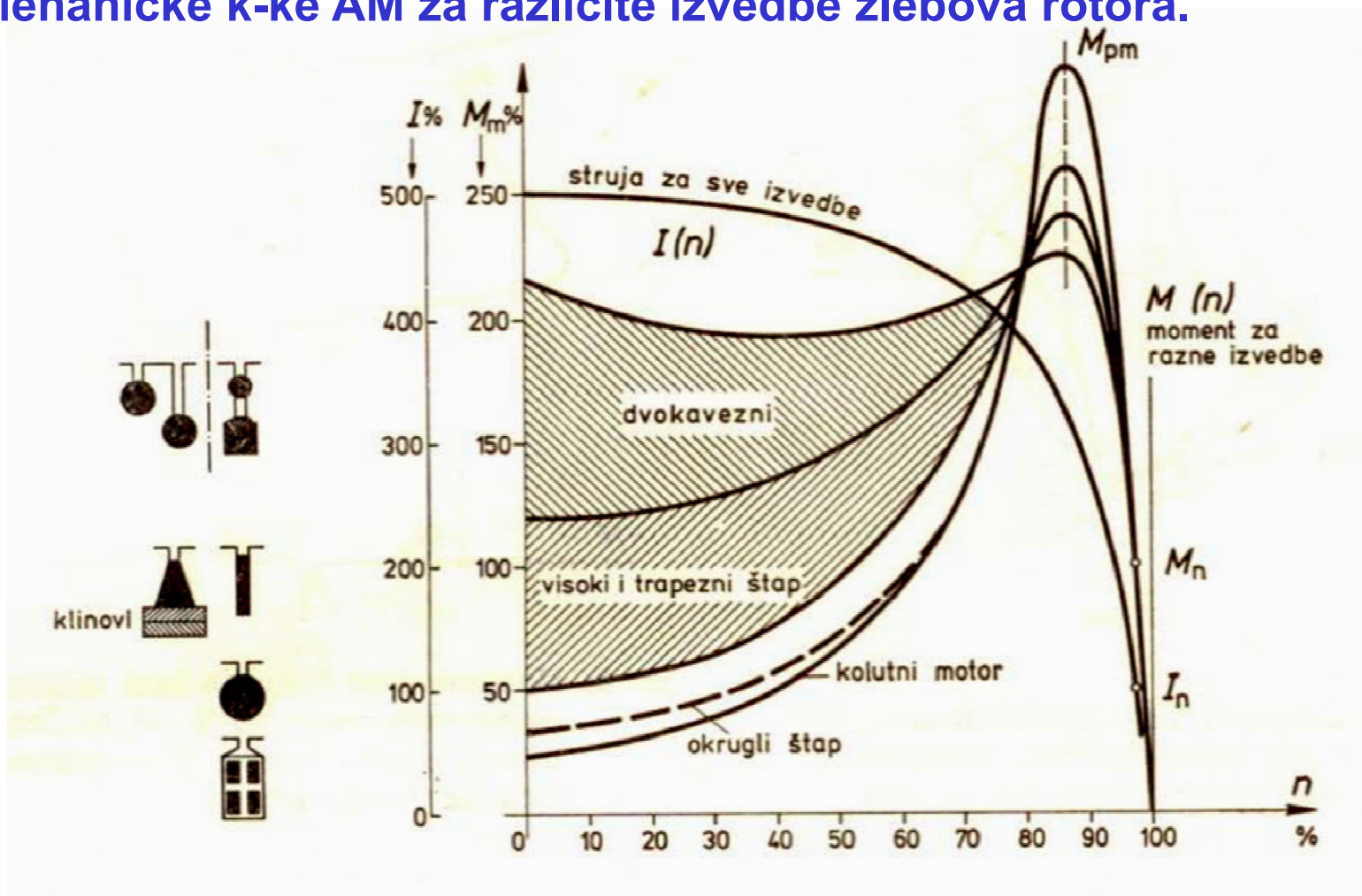
BB3

Momentan k-ka kliznokolutnog AM je niža od k-ke c.

Веран Васић, 22.05.2013.

Uticaj oblika žlebova rotora na mehaničku karakteristiku AM

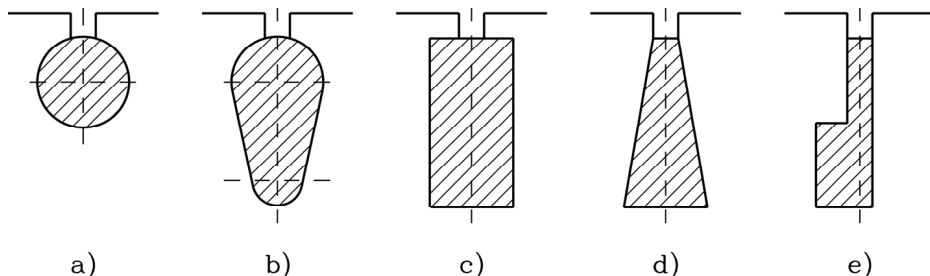
Mehaničke k-ke AM za različite izvedbe žlebova rotora.



Manji motori imaju relativno veći polazni momenat nego veći motori jer imaju relativno veću otpornost rotora. Potiskivanje struje rotorskim štapovima praćeno je smanjivanjem induktivnosti rasipanja rotora što obara prevalni momenat.

Uticaj oblika žlebova rotora na mehaničku karakteristiku AM

Razni oblici preseka žlebova rotora

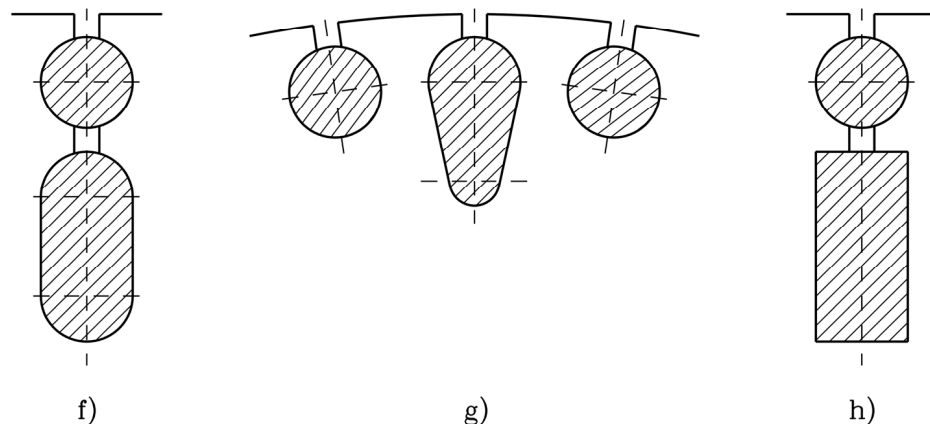


Zanemarljivo potiskivanje struje → M_{pol} malo

a) Okrugao, b) Ovalni

Izraženo potiskivanje struje → povećan M_{pol}

c) Duboki, d) Trapezoidni, e) L



Veoma izraženo potiskivanje → veliki M_{pol}

f) i h) dvostruki kavez

Često se duboki žlebovi rade koso kako ne bi suviše smanjili visinu rotorskog jarma. Duboki žlebovi trapeznog oblika imaju jače izražen efekat potiskivanja struje.

Uticaj oblika žlebova rotora na mehaničku karakteristiku AM

