

ASINKRONI STROJEVI I POGONI

Komentirao: venomX

Izv. prof. dr. sc. Damir Žarko

Strojevi izmjenične struje

Strojevi izmjenične struje se dijele na:

Sinkrone,

Asinkrone i

Izmjenične kolektorske (komutatorske). 

Nikola Tesla je 1888. god. patentirao i javnosti prikazao svoj novo izumljeni motor (patentno ime, “Electro-Magnetic Motor”) u kojemu prvi puta objašnjava stvaranje i primjenu okretnog magnetskog polja.

Sinkroni i asinkroni električni strojevi rade na principu okretnog magnetskog polja.

Osnovne podjele asinkronih strojeva

■ Prema obliku gibanja

Rotirajući (engl. rotating machines),

Linearni (engl. linear machines).

■ Prema izvedbi rotora

Asinkroni strojevi s kaveznim rotorom (engl. squirrel-cage rotor induction motors) , 

Asinkroni strojevi s kliznokolutnim (namotanim) rotorom (engl. wound rotor induction motors or slipring induction motors), 

Asinkroni strojevi s masivnim rotorom (engl. massive rotor induction motors).

■ Prema broju faza i priključku na izvor napona

Trofazni, dvofazni i jednofazni (za male snage). 

■ Prema veličini nazivnog napona

Visokonaponski (iznad 1000V do 15000 V) i niskonaponski (do 1000V).

■ Prema pretvorbi energije

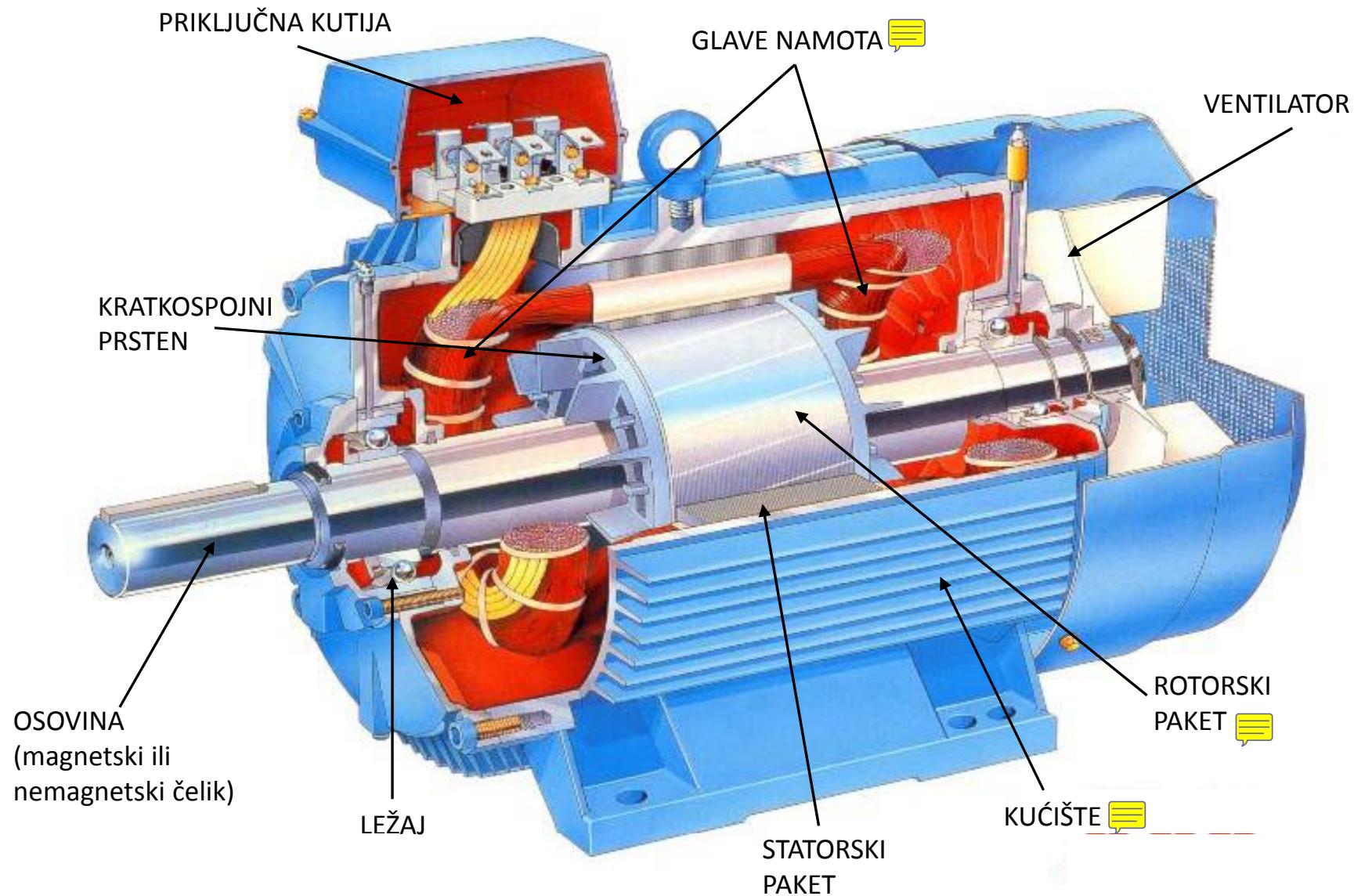
Asinkroni motori,

Asinkroni generatori. 

Suvremene izvedbe asinkronih strojeva i pogona

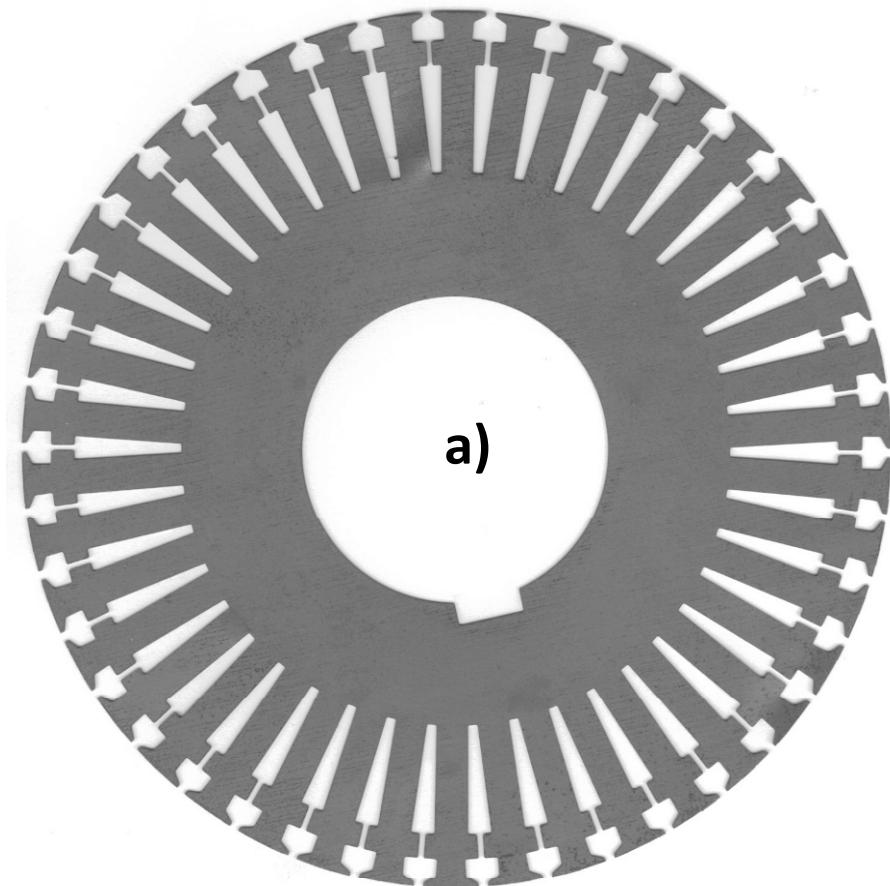
- Današnji asinkroni strojevi se po konstrukciji i tehnologiji bitno razlikuju od strojeva iz vremena Nikole Tesle, Ferarisa i Dobrovoljskog. Princip rada je ostao isti.
- Neke suvremene industrijske izvedbe kompletног asinkronog stroja ili njegovih dijelova su prikazani na sljedećim slajdovima.

Suvremeni asinkroni kavezni motor s aluminijskim kavezom na rotoru

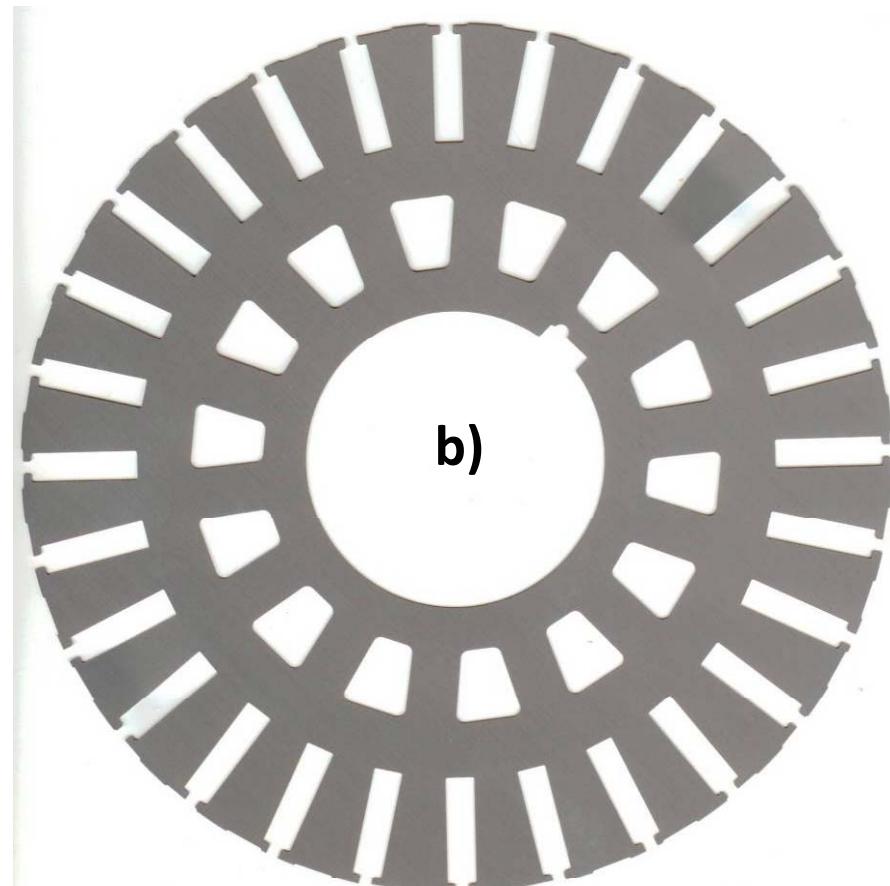


Rotorski lim asinkronog kavezognog motora

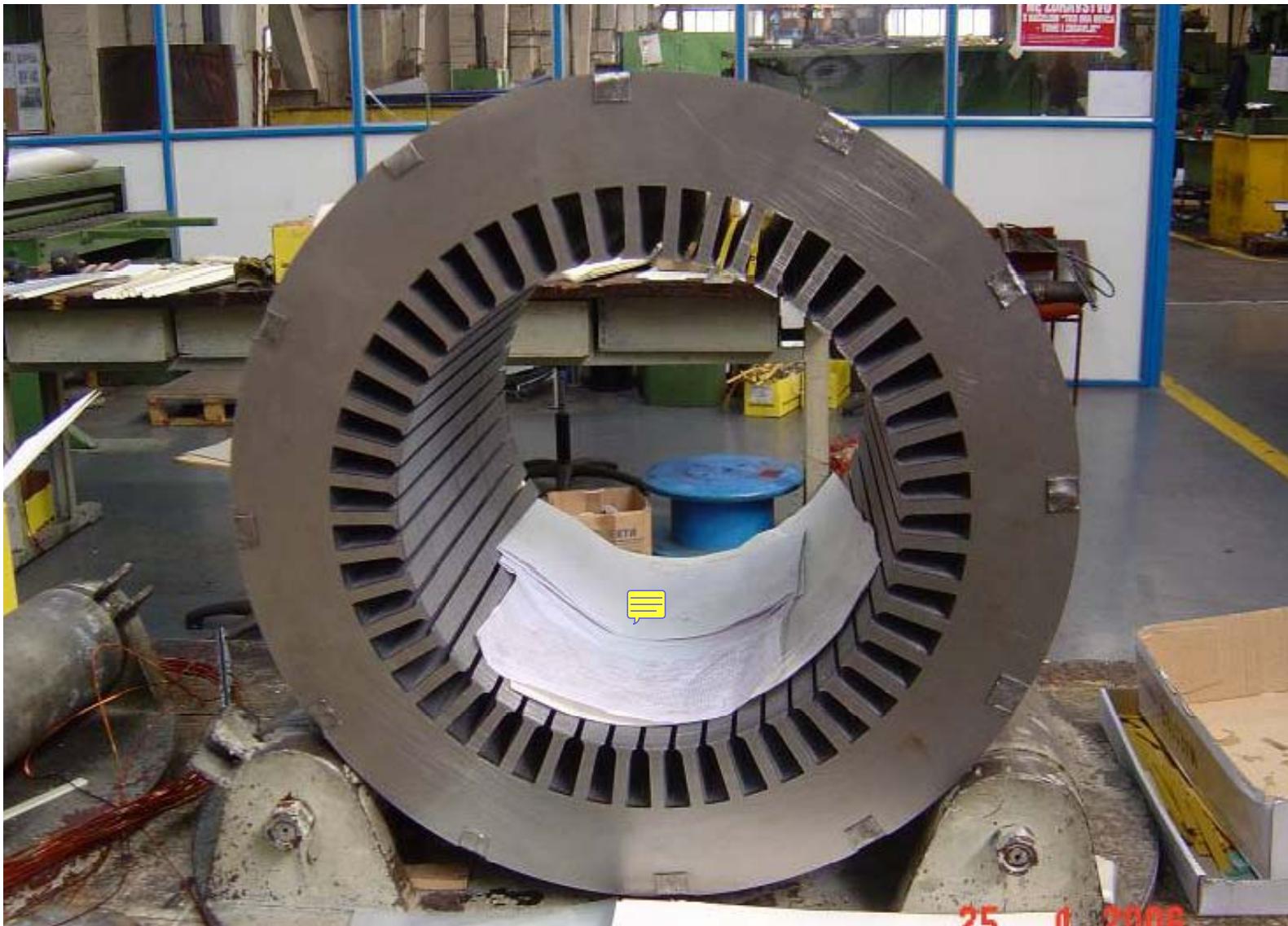
a) aluminijski dvokavezni rotor



b) bakreni kavez



Statorski paket (jezgra) trofaznog asinkronog motora pripremljen za ulaganje namota



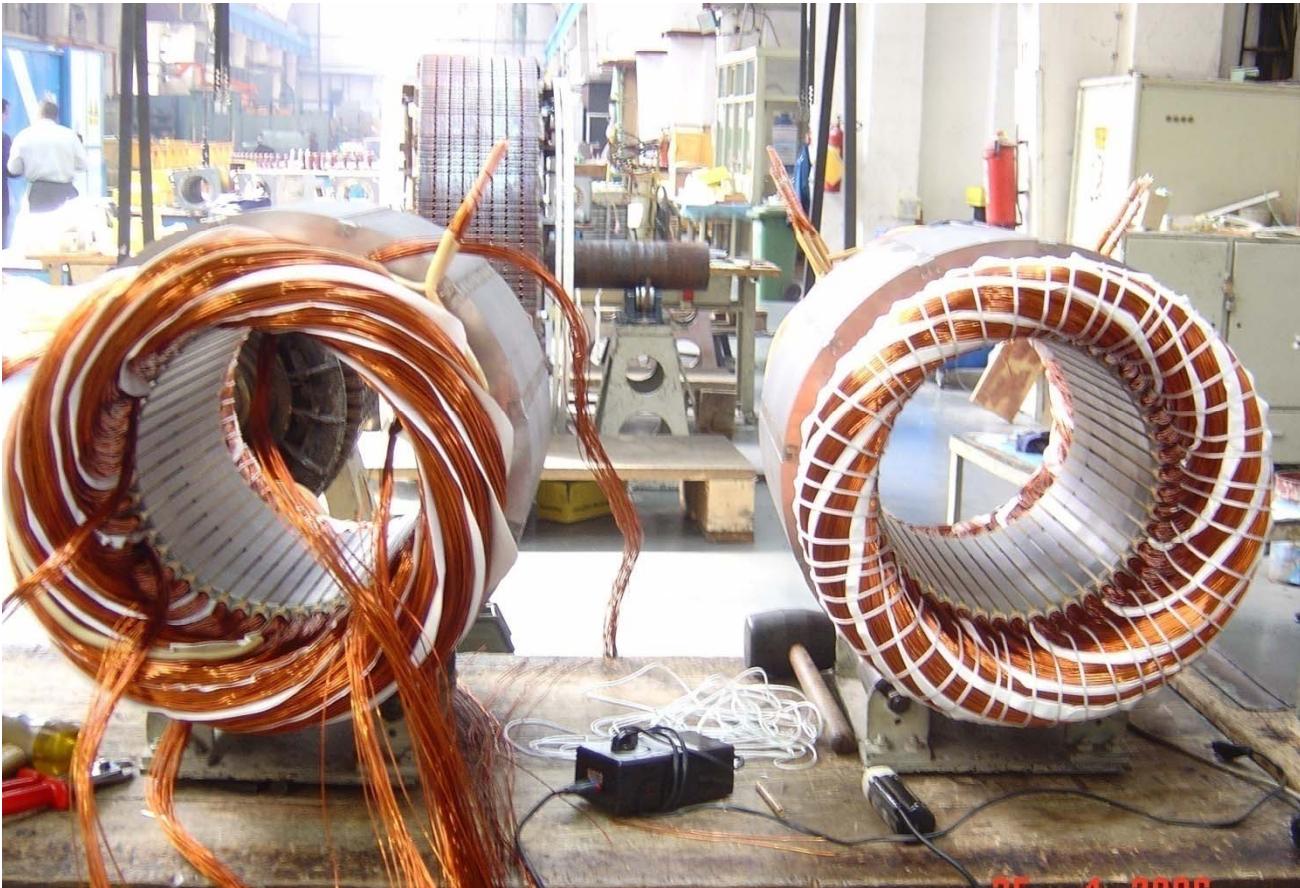
Stator novog asinkronog motora za visoki napon (6 -10 kV, 50 Hz)



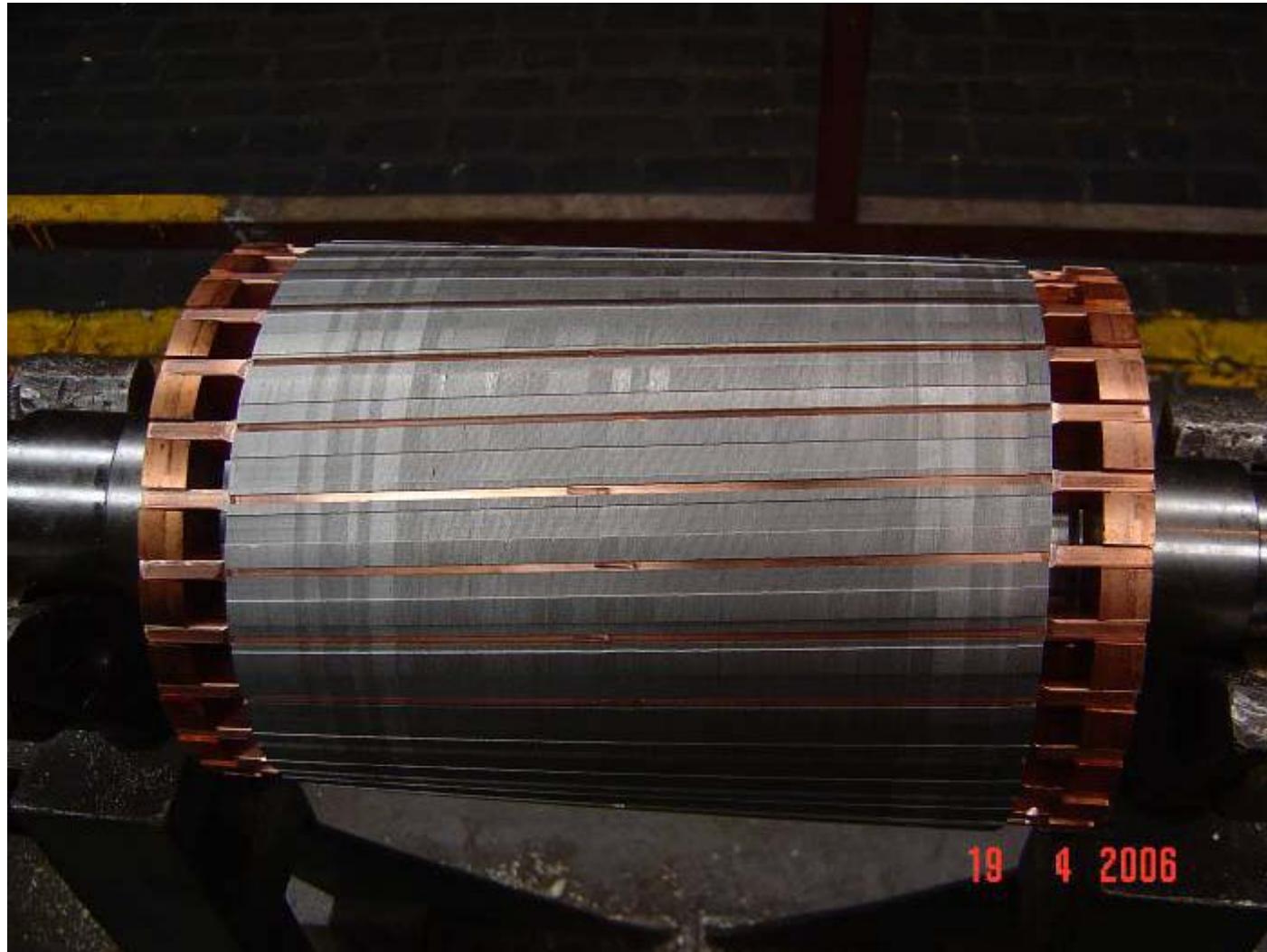
Pogled na glave namota i izvode do priključne kutije



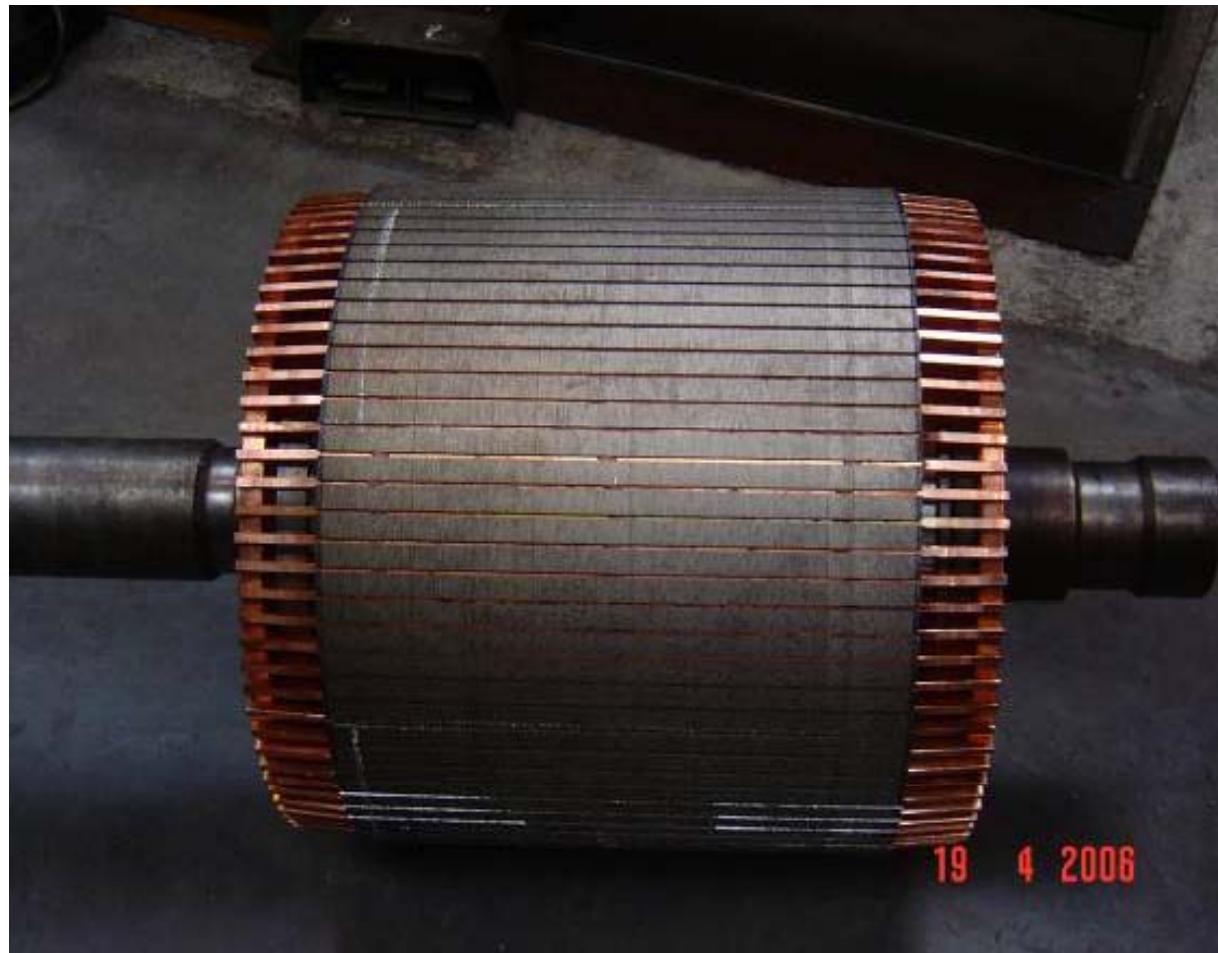
Ulaganje namota u statorski paket trofaznog asinkronog motora (400 V, 50 Hz)



Kavezni rotor trofaznog asinkronog motora u fazi završne izrade (motor za električnu vuču)



Kavezni rotor trofaznog asinkronog motora opće namjene nakon završne obrade

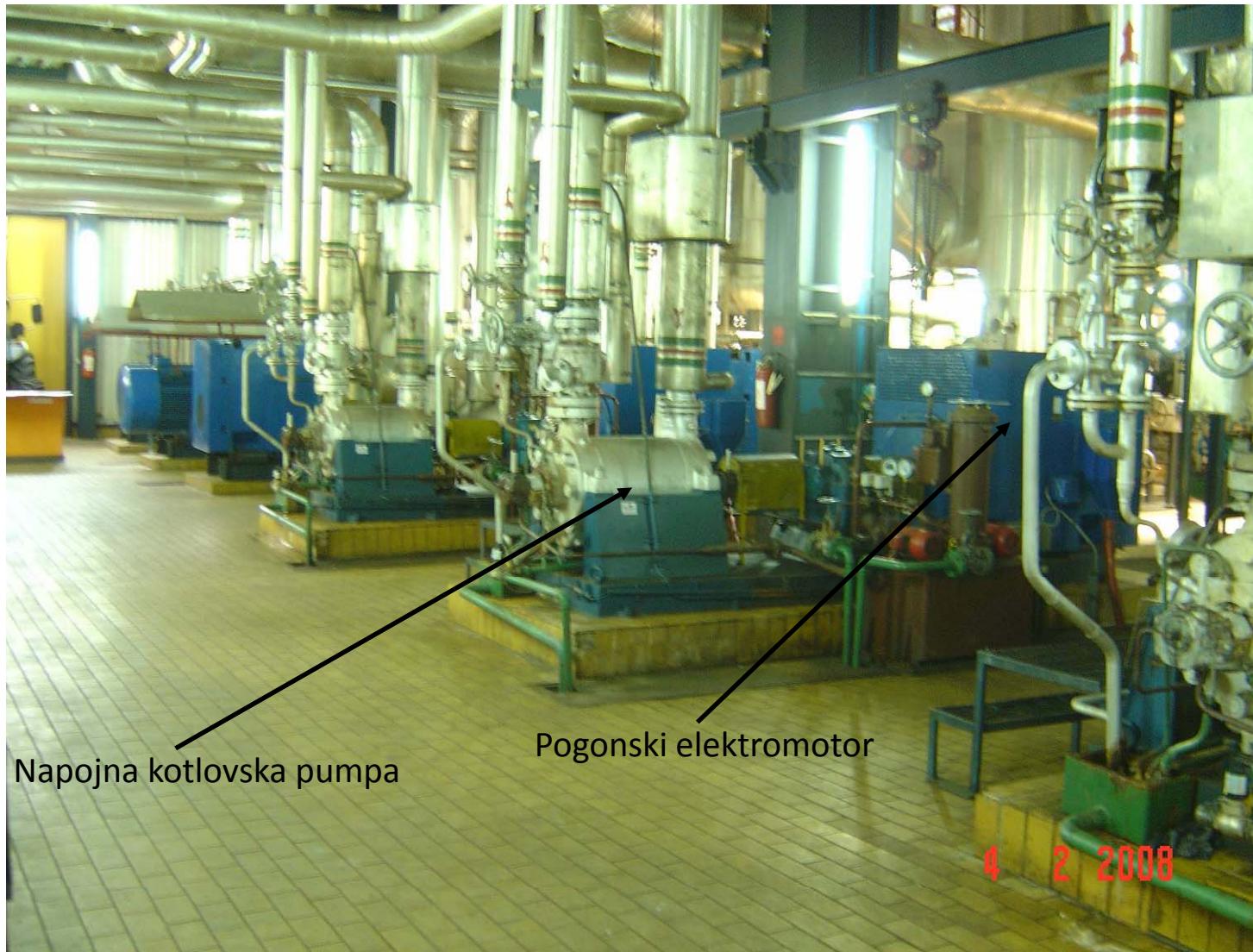


Rotor trofaznog asinkronog motora s kliznim kolutima



Neke tipične primjene asinkronih strojeva

Strojarnica u TE-TO Osijek



Motori naftovodnih pumpi u terminalu Omišalj, 6000 V, 50 Hz (Protueksploziska zaštita oklapanjem)

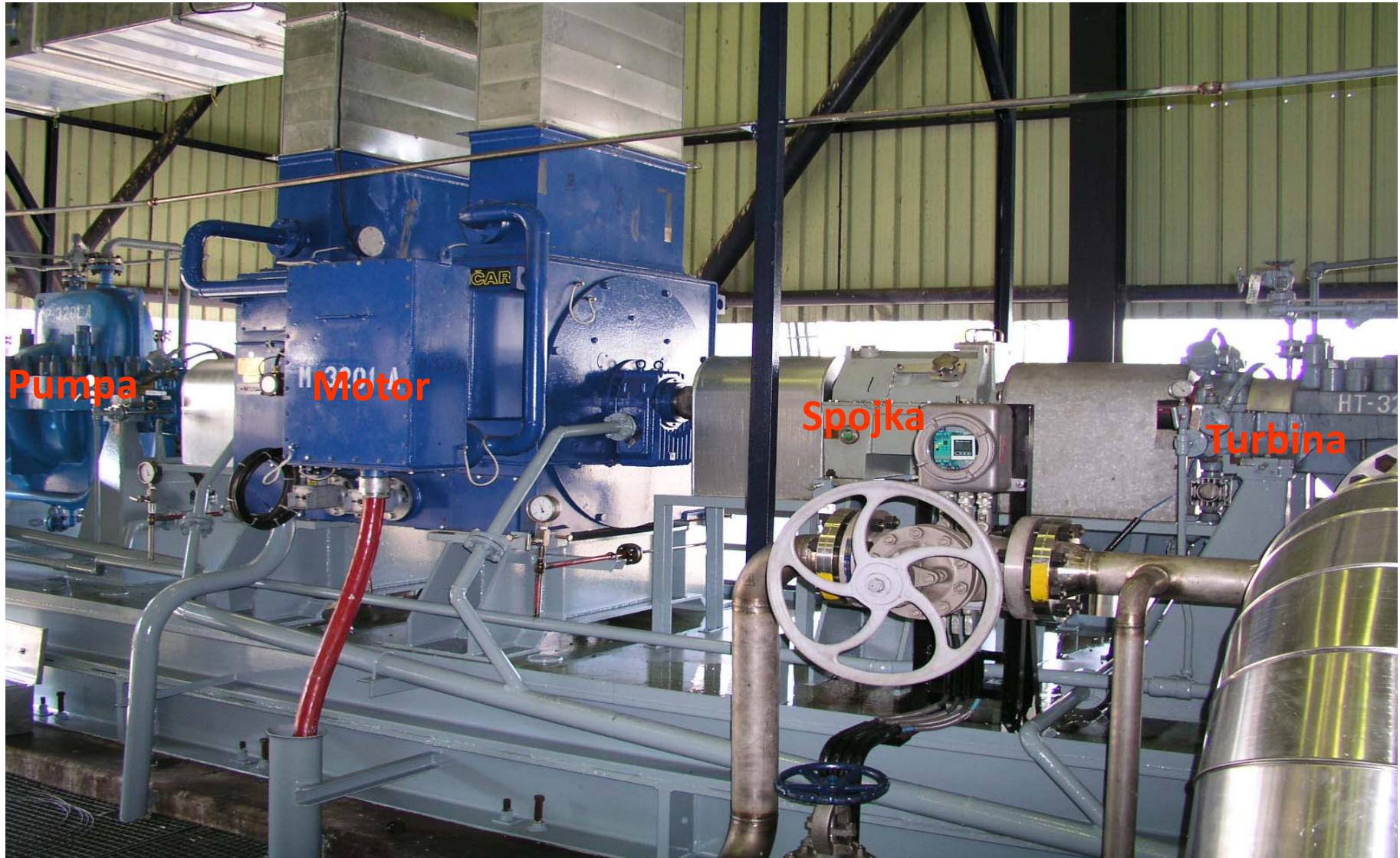


Naftovodni terminal Omišalj

Asinkroni motori povećane sigurnosti, Terminal Sisak 1900 kW, 6000 V, 50 Hz, 2p=2



Elektromotorni pogon procesne pumpe, motor 1800 kW, 2p=2, frekvencijski reguliran



Asinkroni motor 350 kW, 2p=2, 400V, za pogon vijčanog kompresora na plinskoj bušotini



Električna vuča - pogon tramvaja TMK2200

Pogonski asinkroni motor

Snaga: **85 kW**

Napon: **400 V**

Brzina vrtnje pri 400 V: **2125 min⁻¹**

Nazivna struja: **150 A**

Maksimalna struja: **300 A**

Maksimalna brzina: **4580 min⁻¹**

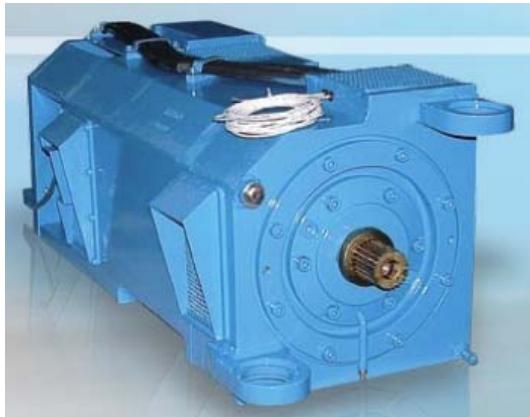
Klasa izolacije: **200**

Mehanička zaštita: **IP 20**

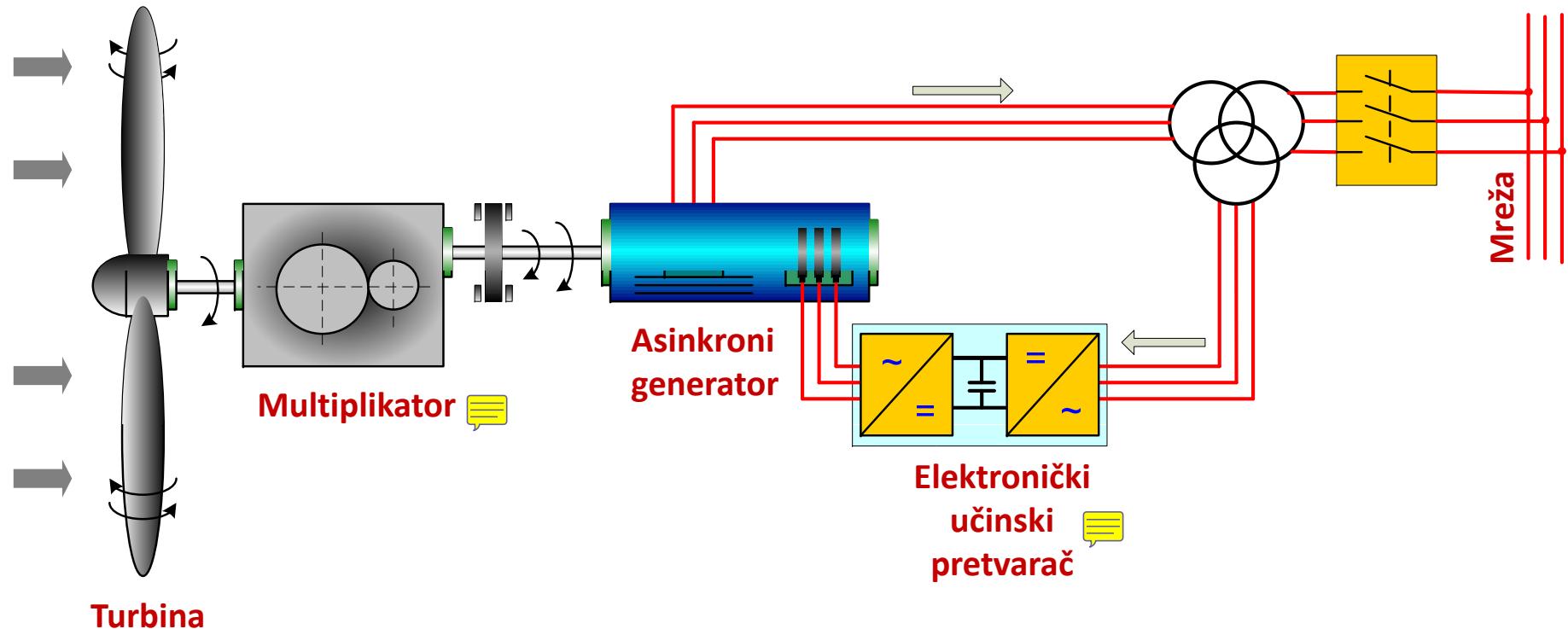
Hlađenje: **IC01**

Masa: **350 kg**

Standard: **IEC 60349-2**



Dvostrano napajani asinkroni generator (DFIG) vjetroagregata promjenljive brzine vrtnje



Okretno magnetsko polje (1)

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

Ako su prostorni pomaci između potpuno simetričnih faznih namota jednaki vremenskim pomacima između potpuno simetričnih faznih struja koje kroz njih teku, stvarat će se simetrično (kružno) okretno magnetsko polje.

Ako postoje prostorni pomaci između namota i vremenski pomaci između struja, stvarat će se okretna protjecanja koja nisu simetrična (kružna) nego su nesimetrična (eliptična).

Da li će motor raditi kao sinkroni ili asinkroni zavisi o tome kako mu je izведен rotor. Statori sinkronog i asinkronog motora se ne razlikuje. U njemu struje trebaju stvoriti okretno magnetsko polje.

Okretno magnetsko polje (2)

Okretno magnetsko polje stvoreno u statorskim namotima protjecanima izmjeničnim fazno pomaknutim strujama vrti se sinkronom brzinom vrtnje:

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

gdje je f_s frekvencija struja, a p broj pari polova motora.

Okretno magnetsko polje inducira u vodičima rotora napone koji kroz namot rotora protjeraju struje. Interakcijom struja rotora i okretnog mag. polja stvara se sila na vodiče rotora koja zakreće rotor u smjeru vrtnje okretnog polja.

Ako je moment svih sila na vodiče rotora veći od momenta otpora vrtnji, rotor će se vrtjeti brzinom koja je uvijek različita od brzine vrtnje okretnog polja, te se zbog toga motor zove **asinkroni***.

*asinkrono – koje nije sinkrono, nije istovremeno
sinkrono – koje je s nečim ili nekim sinkrono, istovremeno

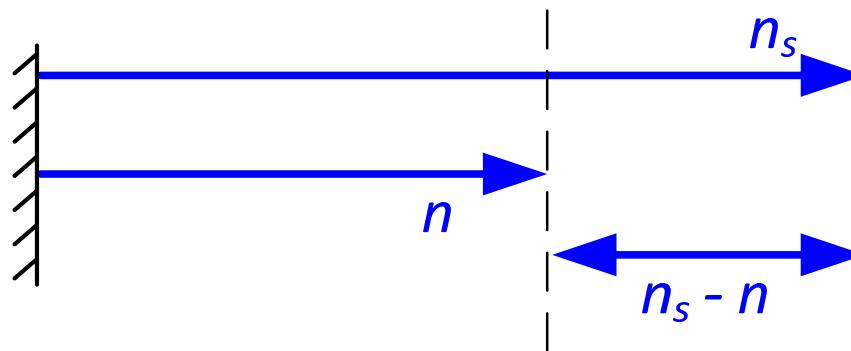
Pojam klizanja asinkronog stroja (1)

- Okretno polje se vrti u odnosu na stator sinkronom brzinom 

$$n_s = 60f/p, \text{ o/min}$$

- Rotor se vrti brzinom vrtnje n , o/min
- Razlika brzine vrtnje rotora (mehaničke brzine) i brzine vrtnje okretnog polja naziva se **klizanje** i računa se prema izrazu:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

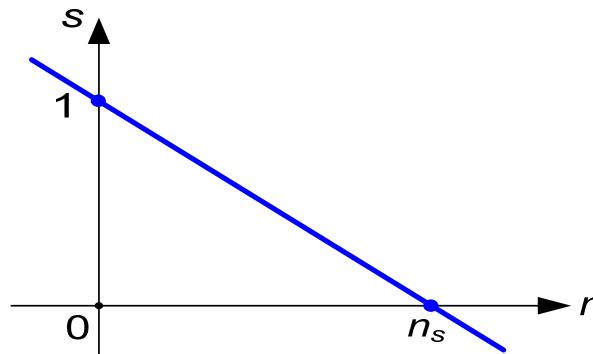


Pojam klizanja asinkronog stroja (2)

- Brzina vrtnje rotora je nakon definicije klizanja s :

$$n = n_s (1 - s) = \frac{60 f}{p} (1 - s)$$

- Brzina vrtnje rotora može teoretski biti bilo koja vrijednost, pa odnosi između nje i klizanja s izgledaju kao na slici.



- rotor se vrti sinkronom brzinom $\rightarrow s = 0$
- dok rotor stoji (zakočen) $\rightarrow s = 1$
- brzina vrtnje rotora manja od sinkrone $\rightarrow s > 0$
- rotor se vrti brže od okretnog polja $\rightarrow s < 0$
- rotor se vrti u suprotnom smjeru ($n < 0$) od okretnog polja $\rightarrow s > 1$

Pojam klizanja asinkronog stroja (3)

- Klizanje u tehnički prihvatljivim iznosima mora biti sasvim mala veličina (zbog utjecaja na gubitke energije) te se zbog toga iskazuje u postocima.
- Klizanje se obično kreće između 0.1 i 5 %. Veća vrijednost odnosi se na motore manjih snaga (do oko 1 kW).
- Primjer iz kataloga:

Motor snage 180 W, 400 V, 50 Hz, $2p = 2$ ima brzinu vrtnje pri nazivnom opterećenju 2900 o/min. 

Klizanje je

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{3000 - 2900}{3000} \cdot 100 = 3,33\%$$

- Motor snage 1 MW, 10 kV, 50 Hz, $2p = 4$, nazivna brzina vrtnje $n = 1491$ o/min

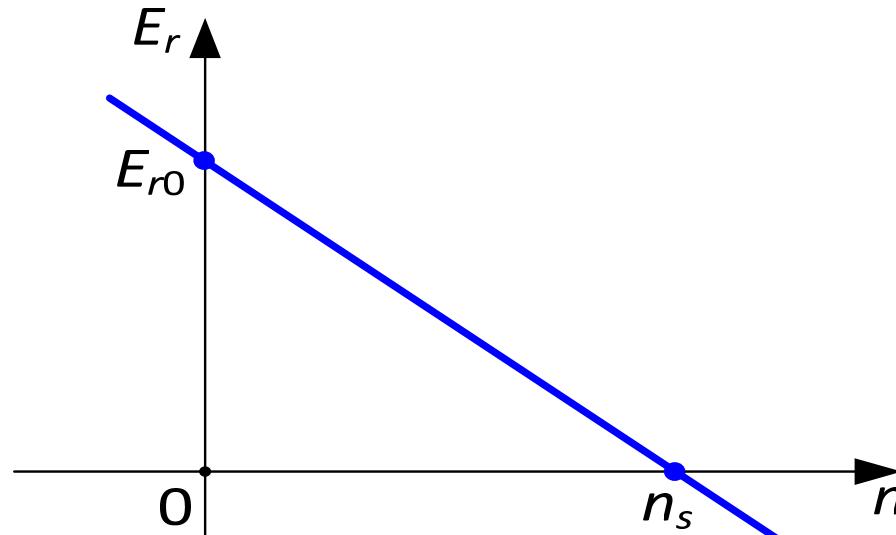
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1491}{1500} \cdot 100 = 0,6\%$$

Rotorski napon

- Dok rotor miruje ($s=1$) u njemu okretno polje inducira napon E_{r0} .
- Nakon što se rotor počne vrtjeti, mijenja se relativna brzina okretnog polja statora prema rotoru, a napon E_r se mijenja prema izrazu:

$$E_r = E_{r0} s$$

- 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 vrtnje okretnog polja i rotora postoji inducirani napon, struje u rotoru i elektromagnetski moment. Zbog toga je naziv asinkroni motor.



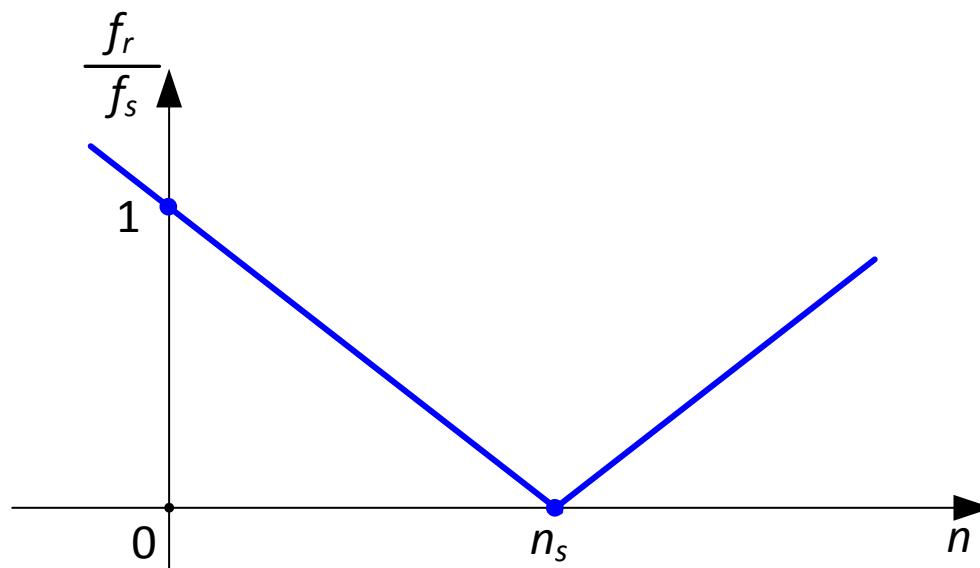
Frekvencija rotorskih struja

Inducirani napon i struja rotora imaju frekvenciju

$$f_r = \frac{p(n_s - n)}{60} = s f_s$$



Ovu frekvenciju nazivamo **frekvencija klizanja**. Teoretski ona može imati bilo koju vrijednost.



Elektromehanička pretvorba energije posredstvom okretnih magnetskih polja

- Za elektromehaničku pretvorbu energije posredstvom magnetskih polja neophodno je da se statorsko i rotorsko magnetsko polje vrte istom brzinom, odnosno da im relativna brzina bude jednaka nuli. Ukupna brzina vrtanje rotorskog polja u odnosu na jednu fiksnu točku statora je zbroj brzine okretnog polja rotora u odnosu na rotor n_{0r} i brzine rotora n u odnosu na jednu fiksnu točku statora

$$n + n_{0r} = n_s$$

Kod sinkronog stroja na rotoru je istosmjerna uzbudna struja ili su trajni magneti; nema okretnog polja rotorskog struja u odnosu na rotor koji se zbog toga mora vrtjeti sinkronom brzinom vrtanje statorskog polja.

- Kod asinkronog stroja pretvorba je uvijek moguća osim pri vrtanju rotora sinkronom brzinom statorskog polja kada je klizanje jednako nuli.
Asinkroni stroj je pri tome prirodno puno prihvatljiviji za primjenu od sinkronog jer su na raspolaganju velike mogućnosti promjena rotorske brzine vrtanje i frekvencije.

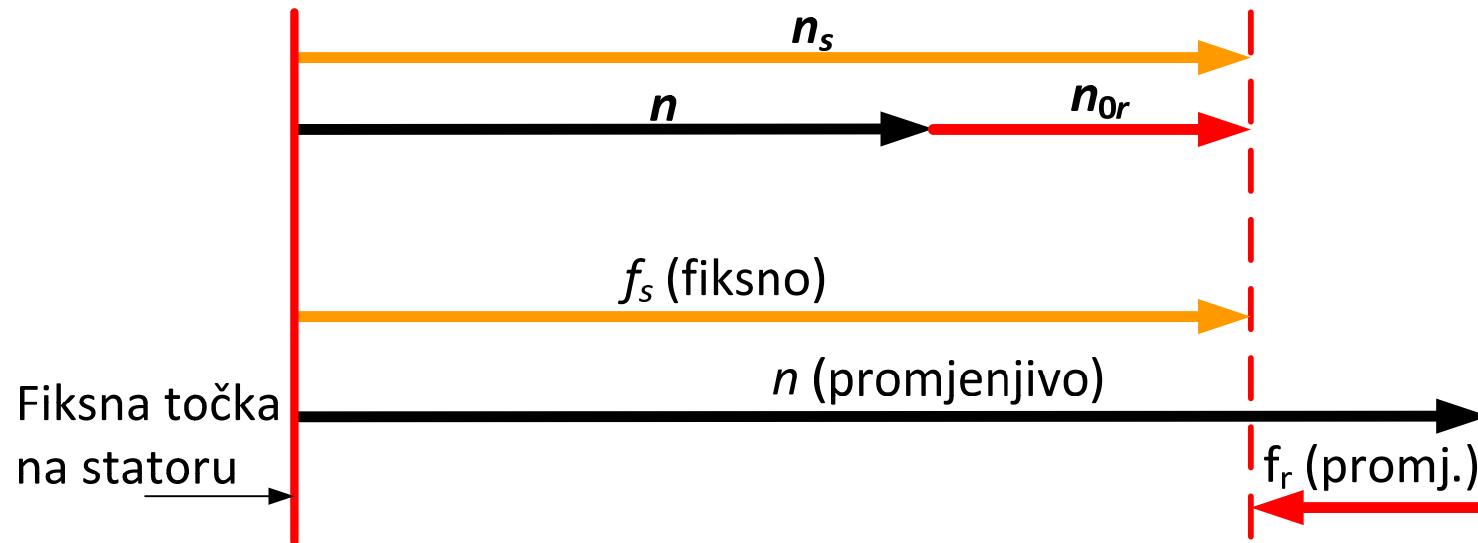
Odnosi brzina vrtnje u asinkronom stroju

n_s - brzina vrtnje statorskog okretnog polja u odnosu na stator

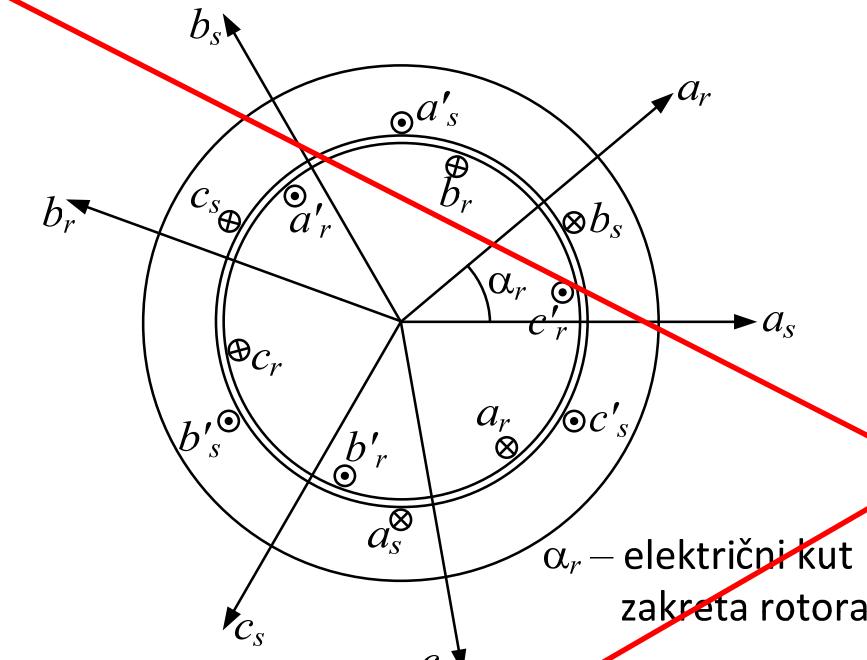
n - brzina vrtnje rotora u odnosu na stator

n_{0r} - brzina vrtnje rotorskog okretnog polja u odnosu na rotor

$$n + n_{0r} = n_s$$



Osnovne jednadžbe asinkronog motora



Osnovni dvopolni prikaz asinkronog motora

R – otpor namota

Ψ - ulančeni tok namota

Naponska jednadžba statora

$$\begin{bmatrix} u_{as} \\ u_{bs} \\ u_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix}$$

Naponska jednadžba rotora

$$\begin{bmatrix} u_{ar} \\ u_{br} \\ u_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix}$$

Osnovne jednadžbe asinkronog motora

Ulančeni tokovi statora

$$\begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{asas} + L_{\sigma s} & L_{asbs} & L_{ascS} \\ L_{bsas} & L_{bsbs} + L_{\sigma s} & L_{bscs} \\ L_{csas} & L_{csbs} & L_{cscs} + L_{\sigma s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{asar}(\alpha_r) & L_{asbr}(\alpha_r) & L_{ascr}(\alpha_r) \\ L_{bsar}(\alpha_r) & L_{bsbr}(\alpha_r) & L_{bscr}(\alpha_r) \\ L_{csar}(\alpha_r) & L_{csbr}(\alpha_r) & L_{cscr}(\alpha_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

Ulančeni tokovi rotora

$$\begin{bmatrix} \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aras}(\alpha_r) & L_{arbs}(\alpha_r) & L_{arcS}(\alpha_r) \\ L_{bras}(\alpha_r) & L_{brbs}(\alpha_r) & L_{brcs}(\alpha_r) \\ L_{cras}(\alpha_r) & L_{crbs}(\alpha_r) & L_{crcs}(\alpha_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{arar} + L_{\sigma r} & L_{arbr} & L_{arcr} \\ L_{brar} & L_{brbr} + L_{\sigma r} & L_{brcr} \\ L_{crar} & L_{crbr} & L_{crcr} + L_{\sigma r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

L_{asbs} – međuinduktivitet (as – namot koji ulančuje tok, bs – namot koji pobuđuje tok)
 L_{σ} - rasipni tok namota

Jednadžbe asinkronog motora u stacionarnom stanju

Primjenom kompleksnih vektora šest naponskih jednadžbi statora i rotora reduciraju se na samo dvije jednadžbe.

U stacionarnom stanju brzina vrtnje je konstantna pa se vektorske jednadžbe mogu zamijeniti fazorskima.

U fazorskoj domeni naponske jednadžbe statora i rotora glase:

$$U_s = (R_s + j\omega_s L_{\sigma s}) I_s + j\omega_s L_m (I_s + I'_r)$$

$$U'_r = [R'_r + j(\omega_s - \omega) L'_{\sigma r}] I'_r + j(\omega_s - \omega) L_m (I_s + I'_r)$$

ω – električna kutna brzina vrtnje rotora ($\omega = p\omega_m$)

ω_m – mehanička kutna brzina vrtnje rotora

Rotorska jednadžba se množi s $\frac{\omega_s}{\omega_s - \omega} = \frac{1}{s}$ (s je klizanje).

$$\frac{U'_r}{s} = \left[\frac{R'_r}{s} + j\omega_s L'_{\sigma r} \right] I'_r + j\omega_s L_m (I_s + I'_r)$$

$$L_m = \frac{3}{2} L_{xsx}, \quad x = a, b \text{ ili } c$$

$$\omega_s = 2\pi f_s$$

$$U'_r = \frac{N_s f_{ns}}{N_r f_{nr}} U_r$$

$$I'_r = \frac{m_r}{m_s} \frac{N_r f_{nr}}{N_s f_{ns}} I_r$$

$$R'_r = \frac{m_s}{m_r} \left(\frac{N_s f_{ns}}{N_r f_{nr}} \right)^2 R_r$$

$$L'_{\sigma r} = \frac{m_s}{m_r} \left(\frac{N_s f_{ns}}{N_r f_{nr}} \right)^2 L_{\sigma r}$$

Nadomjesna električna shema asinkronog stroja

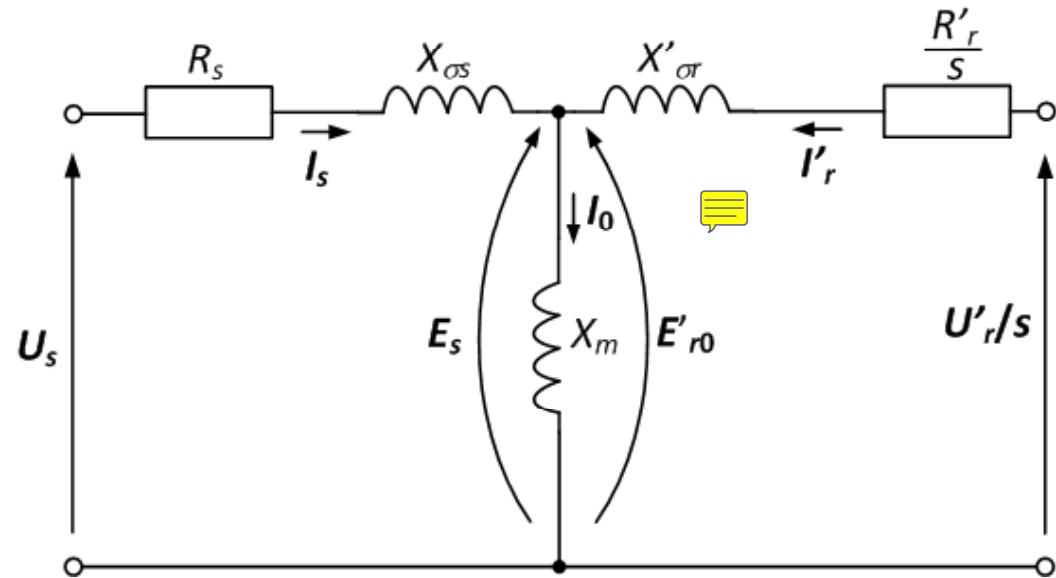
$$U_s = (R_s + jX_{\sigma s})I_s + jX_m(I_s + I'_r)$$

$$\frac{U'_r}{s} = \left[\frac{R'_r}{s} + jX'_{\sigma r} \right] I'_r + jX_m(I_s + I'_r)$$

$$X_m = L_m \omega_s$$

$$X_{\sigma s} = L_{\sigma s} \omega_s$$

$$X'_{\sigma r} = L'_{\sigma r} \omega_s$$



R_s i $X_{\sigma s}$ statorski otpor i rasipna reaktancija

X_m reaktancija magnetiziranja (predstavlja ulančeni magnetski tok stator-rotor)

R'_r i $X'_{\sigma r}$ rotorski otpor i rasipna reaktancija preračunati na statorsku stranu

E_s inducirani fazni napon statora

E'_{r0} inducirani fazni napon rotora u mirovanju preračunat na statorsku stranu

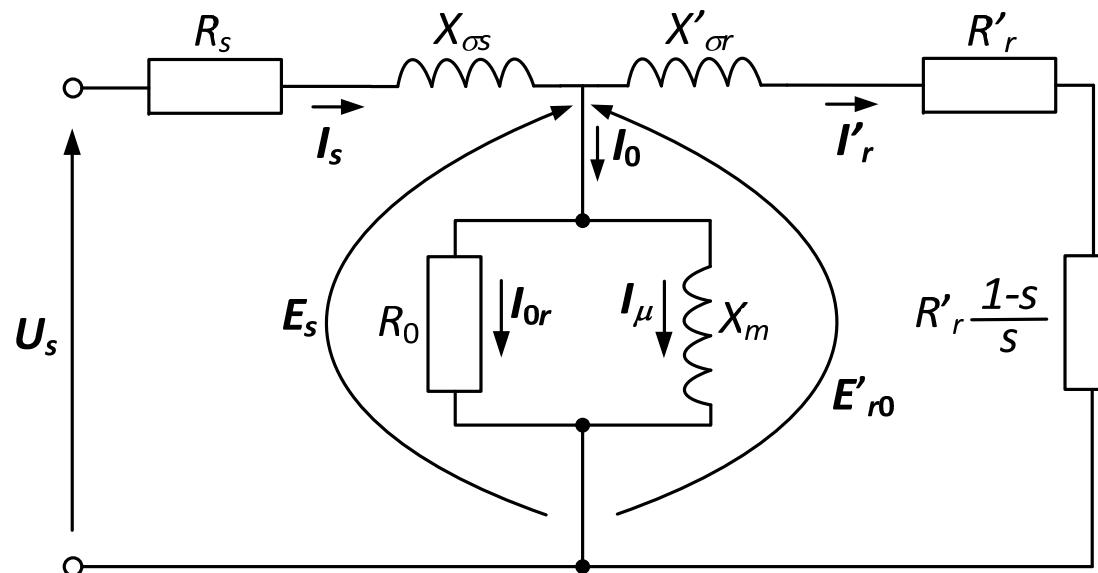
U'_r/s rotorski napon na kliznim kolutima u ovisnosti o klizanju preračunat na statorsku stranu

Nadomjesna električna shema asinkronog stroja

Slično transformatoru, asinkroni motor možemo prikazati električnom nadomjesnom shemom (modelom). Na slici je shema za kavezni motor.

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.

Referentni smjer struje I'_r se može odabrati proizvoljno. Kada je rotor kratko spojen, obično se uzima smjer struje rotora kao na slici.



Struje, snage i momente možemo računati primjenom nadomjesne sheme za bilo koje stacionarno pogonsko stanje.

Inducirani napon u asinkronom stroju

Asinkroni stroj u mirovanju ($s = 1$) možemo razmatrati i koristiti kao specijalnu izvedbu transformatora (zakretni transformator):

$$\frac{E_{r0}}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \frac{f_{nr}}{f_{ns}} \frac{f_r}{f_s}$$

Zbog jednakosti frekvencija statora i rotora u mirovanju ($f_r = f_s$) vrijedi

$$\frac{E_{r0}}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \frac{f_{nr}}{f_{ns}} \Rightarrow E'_{r0} = \frac{N_s f_{ns}}{N_r f_{nr}} E_{r0} = \frac{N_s f_{ns}}{N_r f_{nr}} E_s \frac{N_r}{N_s} \frac{f_{nr}}{f_{ns}} = E_s$$

E_s – napon faze statora

E_{r0} – napon faze rotora u mirovanju

E'_{r0} – napon faze rotora u mirovanju preračunat na statorskiju stranu

N_r i N_s – brojevi zavoja po fazu statorskog i rotorskog namota

f_{ns} i f_{nr} – faktori namota statora i rotora

Za kavezni rotor faktor namota je 1, a broj zavoja po fazu je 1/2.

Rotorska struja

Struju u rotoru određuju inducirani napon E_r i impedancija rotora Z_r

$$I_r(s) = \frac{E_r}{Z_r} = \frac{sE_{r0}}{\sqrt{R_r^2 + X_{\sigma r}^2(s)}}$$

U mirovanju je $f_r = f_s \rightarrow s = 1$

$$E_r = E_{r0}$$

$$X_{\sigma r0} = 2\pi f_r L_{\sigma r} = 2\pi f_s L_{\sigma r} \quad X_{\sigma r0} \rightarrow \text{rasipna reaktancija rotora u mirovanju}$$

U vrtnji je $E_r = sE_{r0}$

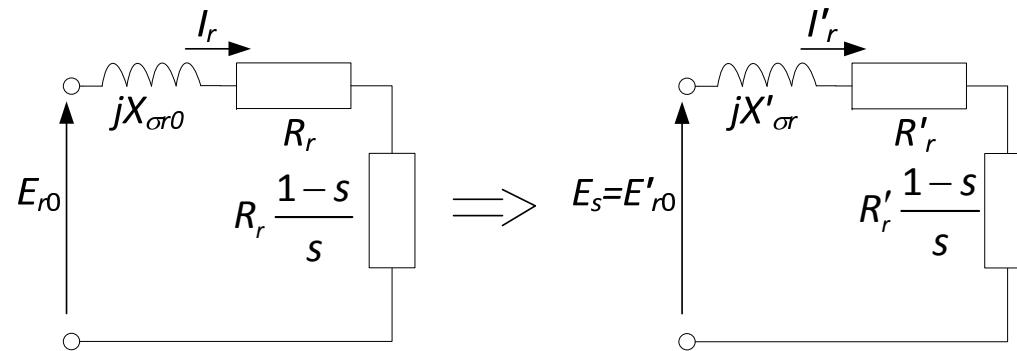
$$X_{\sigma r}(s) = 2\pi f_s s L_{\sigma r} = s X_{\sigma r0}$$

Stoga je

$$I_r(s) = \frac{sE_{r0}}{\sqrt{R_r^2 + (sX_{\sigma r0})^2}} = \frac{E_{r0}}{\sqrt{\left(\frac{R_r}{s}\right)^2 + X_{\sigma r0}^2}}$$

Za $s = 0$, struja $I_r(s) = 0$.

Rotorski strujni krug asinkronog stroja preračunat na statorsku stranu



$$\boxed{\begin{aligned} E'_{r0} &= E_{r0} \frac{N_s f_{ns}}{N_r f_{nr}} \\ I'_r X'_{\sigma r} &= I_r \frac{m_r}{m_s} \frac{N_r f_{nr}}{N_s f_{ns}} X_{\sigma r} \frac{m_s}{m_r} \left(\frac{N_s f_{ns}}{N_r f_{nr}} \right)^2 = I_r X_{\sigma r} \frac{N_s f_{ns}}{N_r f_{nr}} \\ I'_r \frac{R'_r}{s} &= I_r \frac{m_r}{m_s} \frac{N_r f_{nr}}{N_s f_{ns}} \frac{R_r}{s} \frac{m_s}{m_r} \left(\frac{N_s f_{ns}}{N_r f_{nr}} \right)^2 = I_r \frac{R_r N_s f_{ns}}{s N_r f_{nr}} \end{aligned}}$$

$R'_r \rightarrow$ otpor rotora preračunat na statorsku stranu

$R'_r \frac{1-s}{s} \rightarrow$ ekvivalent mehaničkog rada

$X'_{\sigma r} \rightarrow$ rasipna reaktancija rotora preračunata na statorsku stranu

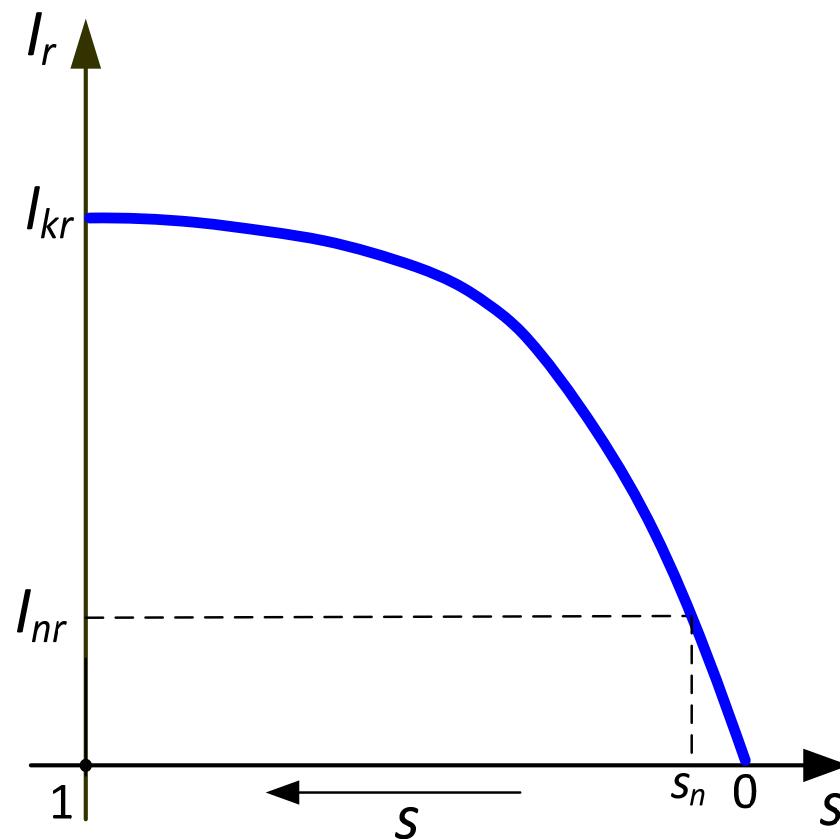
$$X'_{\sigma r} = L'_{\sigma r} \omega_s$$

Rotorska struja u ovisnosti o klizanju



I_{kr} – struja uz zakočeni rotor

I_{nr} - nazivna struja



Energetska bilanca asinkronog stroja

Prema nadomjesnoj shemi za stacionarno stanje:

Iz mreže motor uzima

$$P_s = P_1 = m_s U_s I_s \cos \varphi_s$$

m_s i m_r – broj faza statora i rotora

φ_s – fazni pomak struje i napona statora

Na radnom otporu statora se troši snaga

$$P_{sel} = m_s I_s^2 R_s$$

U željezu statora (na R_0) se troši snaga

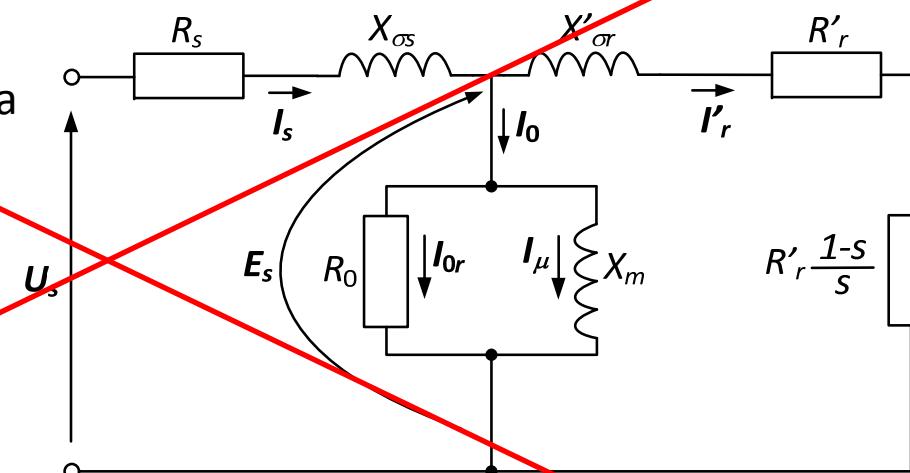
$$P_{sFe} = m_s E_s^2 / R_0 = m_s I_{0r}^2 R_0$$

Snaga okretnog mag. polja

$$P_{okr} = P_s - P_{sel} - P_{sFe}$$

$$P_{okr} = m_r I_r^2 R_r / s = m_r I_r^2 R_r + m_r I_r^2 R_r (1-s) / s$$

$$= m_s I'_r^2 R'_r / s = m_s I'_r^2 R'_r + m_s I'_r^2 R'_r (1-s) / s$$



Energetska bilanca asinkronog stroja

Gubici u željezu rotora se mogu zanemariti zbog male frekvencije u rotoru $f_r \ll$. Stoga je

$$\cancel{P_{okr} = P_{rel} + P_{meh}}$$

- snaga okretnog polja

$$\cancel{P_{rel} = m_r I_r^2 R_r = m_s I'_r^2 R'_r}$$

- gubici u namotu rotora

$$\cancel{P_{meh} = m_r I_r^2 R_r (1-s)/s = m_s I'_r^2 R'_r (1-s)/s}$$

- razvijena mehanička snaga

Odnos električnih gubitaka u rotoru i razvijene mehaničke snage je

$$\frac{P_{rel}}{P_{meh}} = \frac{m_r I_r^2 R_r}{m_r I_r^2 R_r \frac{1-s}{s}} = \frac{m_s I'_r^2 R'_r}{m_s I'_r^2 R'_r \frac{1-s}{s}} = \frac{s}{1-s}$$

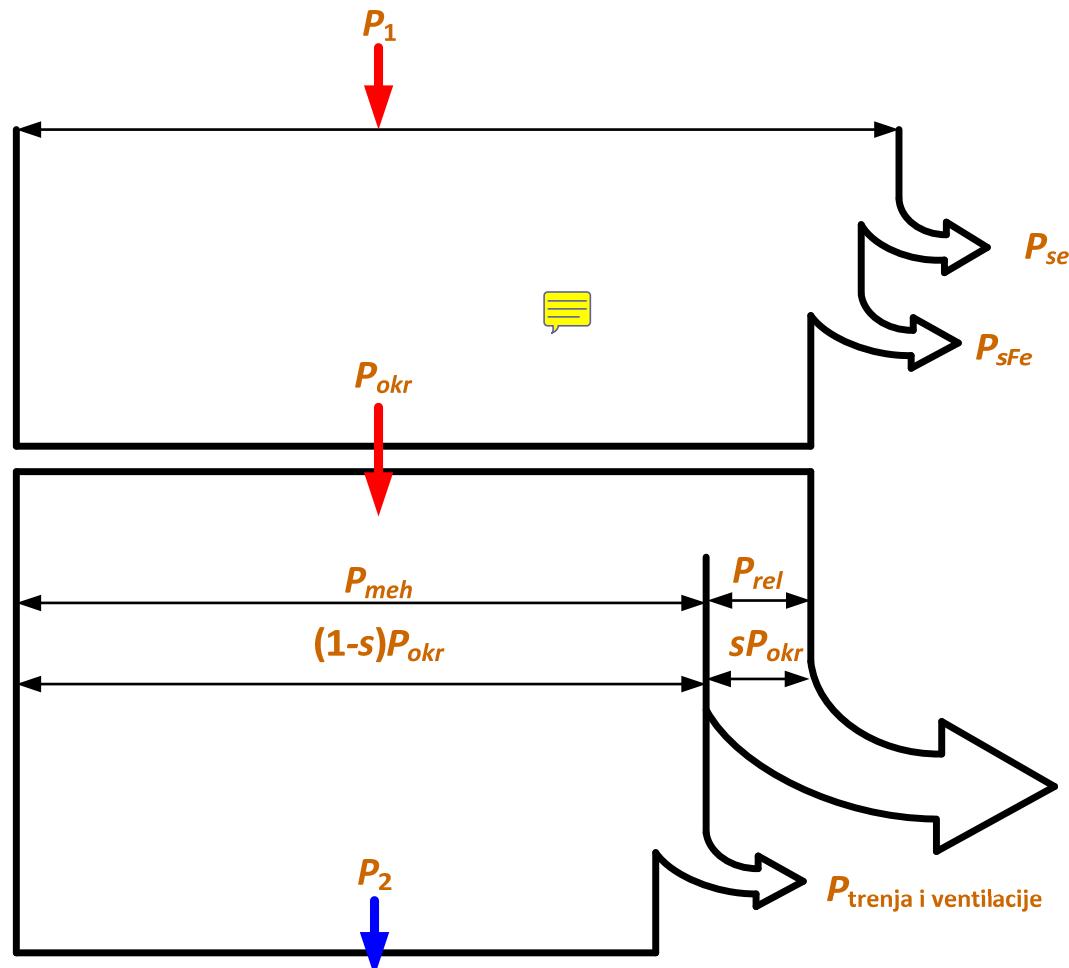
$$P_{rel} = s P_{okr}$$

$$P_{meh} = (1-s) P_{okr}$$

Električni gubici u rotoru su izravno proporcionalni klizanju, stoga klizanje mora biti što manje za prihvatljivu korisnost pretvorbe energije. Klizanje je obično (0,5-5 %). Na primjer

- mali motori	< 20 kW	$s = 3 - 5 \%$
- srednji motori	< 500 kW	$s = 1 - 1,5 \%$
- veliki motori	> 1000 kW	$s = 0,5 - 1 \%$

Tok snage i gubici asinkronog motora (bilanca snage)



P_2 je mehanička snaga na osovini motora, korisnost motora $\eta = \frac{P_2}{P_1}$

Radna, jalova i prividna snaga

Za stvaranje okretnog mag. polja asinkroni stroj uzima iz mreže jalovu (reaktivnu) snagu

$$Q_s = m_s U_s I_s \sin \varphi_s$$

Prividna snaga motora uzeta iz mreže je

$$S = P_s + jQ_s = m_s (U_s I_s \cos \varphi_s + jU_s I_s \sin \varphi_s)$$

Motor je uvijek definiran radnom snagom na osovini. To je njegova nazivna snaga P_2 .

Ako stroj radi u generatorskom režimu rada ($s < 0$), i tada mu je potrebna jalova snaga iz mreže ili kondenzatorske baterije.

Primjer nazivnih podataka motora:

Proizvođač: XXYY

Asinkroni trofazni motor, snaga 1000 kW, napon 6000 V, 50 Hz,
nazivna struja 115 A, $\cos \varphi = 0,88$, brzina vrtnje 1485 o/min, 📈
godina proizvodnje 2005.

Momentna karakteristika asinkronog motora

U nadomjesnoj shemi promatrajmo samo rotorski krug (zanemarena impedancija statora)

$$M = \frac{P_2 + R_{tr,v}}{\omega_m} = \frac{P_{meh}}{\omega_m} = \frac{(1-s) P_{okr}}{(1-s) \omega_{sm}} = \frac{P_{okr}}{\omega_{sm}} = \frac{m_r I_r^2 R_r}{\omega_{sm} s} = \frac{m_s I_r'^2 R'_r}{\omega_{sm} s}$$



$$= \frac{m_r E_{r0}^2}{\omega_{sm} \left[\left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + X_{\sigma r0}^2 \right]} \frac{R_r}{s} = \frac{30 m_r E_{r0}^2 R_r}{n_s \pi \left[\left(\frac{R_r}{s} \right)^2 + X_{\sigma r0}^2 \right]} \frac{1}{s}$$

$$= \frac{30 m_s E_{r0}'^2 R'_r}{n_s \pi \left[\left(\frac{R'_r}{s} \right)^2 + X'_{\sigma r}^2 \right]} \frac{1}{s}, \text{ Nm}$$

ω_m – mehanička kutna brzina vrtnje rotora
 ω_{sm} – mehanička kutna brzina vrtnje okretnog polja

Zanemarili smo u nadomjesnoj shemi statorsku impedanciju $Z_s = R_s + jX_{\sigma s}$. Razvijeni moment je ovisan samo o klizanju uz ostale parametre sheme prepostavljene nepromjenljivima. Ako se uzme potpuna nadomjesna shema, dobiju se točniji izrazi za moment, kako slijedi:

Točniji izraz za elektromagnetski moment

Struja rotora preračunata na statorsku stranu

$$I'_r = \frac{U_s}{\sqrt{\left(R_s + \sigma_1 \frac{R'_r}{s}\right)^2 + \left(X_{\sigma s} + \sigma_1 X'_{\sigma r}\right)^2}}$$

$$\sigma_1 = 1 + \frac{X_{\sigma s}}{X_m} \quad - \text{faktor rasipanja}$$

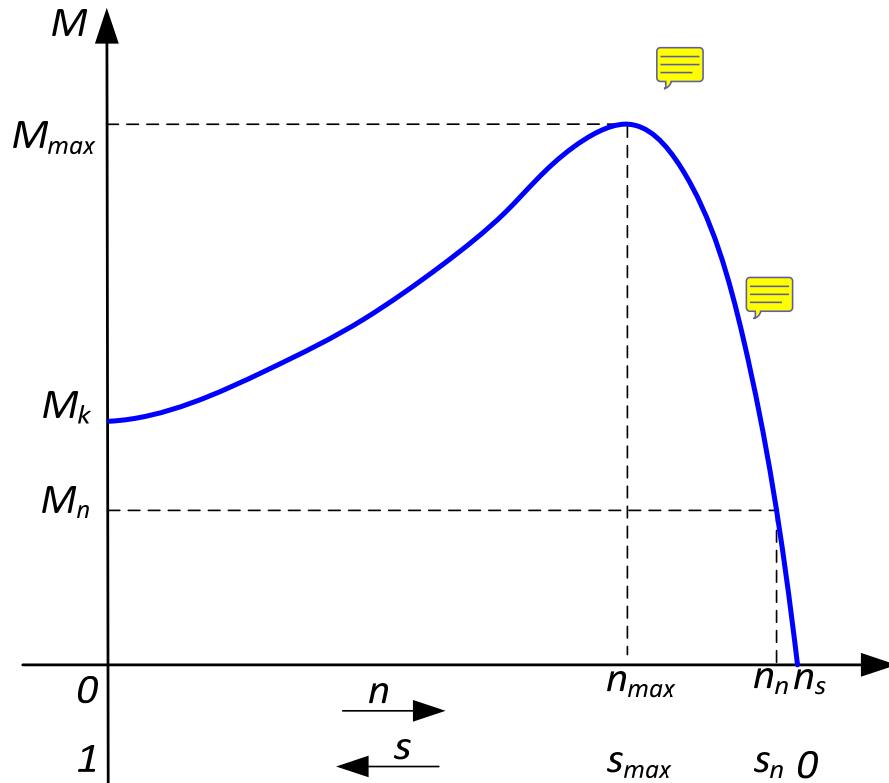
Električna snaga pretvorena u mehanički rad je P_{meh} , a razvijeni elektromagnetski moment

$$\begin{aligned} M &= \frac{P_{meh}}{\omega_m} = \frac{m_s I'^2 R'_r}{\omega_{sm} s} = \frac{m_s}{\omega_{sm}} \frac{U_s^2}{\left(\left(R_s + \sigma_1 \frac{R'_r}{s}\right)^2 + \left(X_{\sigma s} + \sigma_1 X'_{\sigma r}\right)^2\right)} \frac{R'_r}{s} \\ &= \frac{pm_s}{\omega_s} \frac{U_s^2}{\left(\left(R_s + \sigma_1 \frac{R'_r}{s}\right)^2 + \left(X_{\sigma s} + \sigma_1 X'_{\sigma r}\right)^2\right)} \frac{R'_r}{s} \end{aligned}$$

ω_s – električna kutna brzina
vrtnje okretnog polja

Momentna karakteristika

Grafički, momentna karakteristika najčešće se crta samo za motorski rad i označava prema slici.



Na momentnoj karakteristici ključne su 3 točke:

- | | | |
|------------------|---------------|--|
| • $s = 1,$ | $n = 0$ | - potezni moment ili moment kratkog spoja (pokretanja) |
| • $s = s_n,$ | $n = n_n$ | - nazivni moment |
| • $s = s_{max},$ | $n = n_{max}$ | - maksimalni moment |

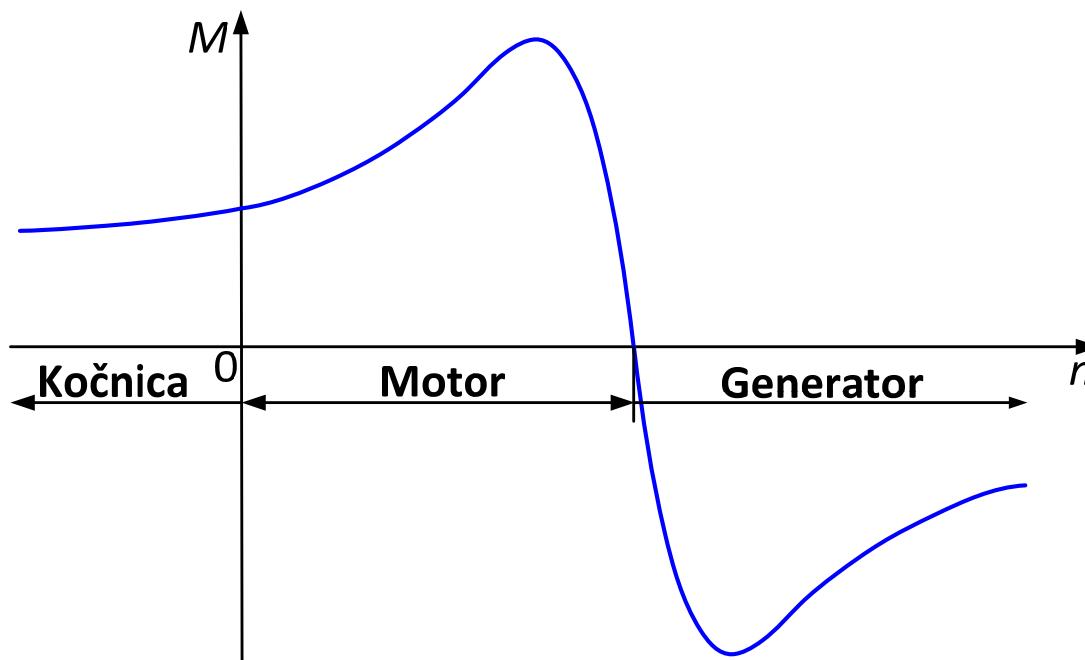
Momentna karakteristika pri svim brzinama vrtnje

Bitno je istaknuti da je moment pri svakoj brzini ovisan o kvadratu narinutog napona:

$$M = f(U^2)$$

Općenito momentna karakteristika izgleda prema slici. Na njoj su karakteristična područja:

- | | |
|-----------------------|--|
| od $s = 1$ do $s = 0$ | - motorsko područje rada, energija se uzima iz mreže, |
| za $s \leq 0$ | - generatorski rad, energija se vraća u mrežu |
| za $s \geq 1$ | - protustrujno kočenje, energija se uzima iz mreže i kinetička energija radnih mehanizama koči rotor i predaje mu energiju |



Maksimalni ili prekretni moment

Za primjene je važan maksimalni ili prekretni moment motora.

Derivacijom izraza za moment na slajdu 52 i izjednačavanjem s nulom dobije se klizanje s_{\max} kod kojeg motor razvija najveći moment (maksimalni ili prekretni moment).

Iz $\frac{dM}{ds} = 0$ slijedi

$$s_{\max} = \pm \frac{\sigma_1 R'_r}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + \sigma_1 X'_{\sigma r})^2}}$$

i uvrštenjem u izraz za moment dobiva se

$$M_{\max} = \pm \frac{m_s U_s^2}{2 \omega_{sm} \sigma_1 \left[\pm R_s + \sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + \sigma_1 X'_{\sigma r})^2} \right]}$$

Predznak (+) je za motorski rad, a (-) za generatorski rad.

Klossove formule

U praksi koristimo analitičke izraze za momentnu karakteristiku poznate kao Klossove formule. Dobijemo ih ako se izraz za moment podijeli s izrazom za maksimalni moment u obliku

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{\frac{2 + \beta}{S_{\max} + \frac{S_{\max}}{S} + \beta}}{\beta} \quad \beta = \frac{2R_s}{\sqrt{R_s^2 + (X_{\sigma s} + \sigma_1 X'_{\sigma r})^2}}$$

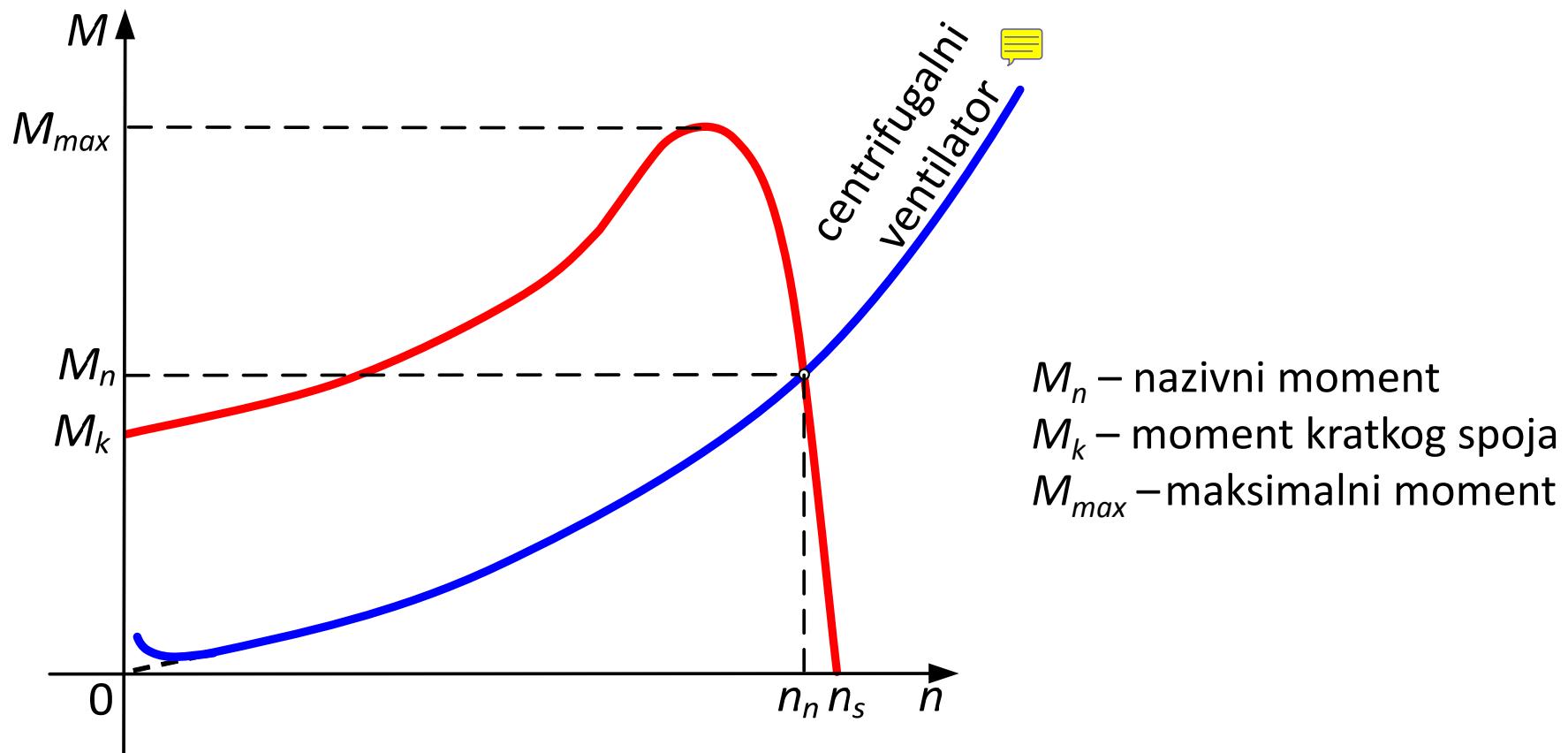
Za manje točna računanja može se primijeniti pojednostavljena Klossova formula dobivena zanemarenjem statorske impedancije u obliku

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{S}{S_{\max}} + \frac{S_{\max}}{S}}$$



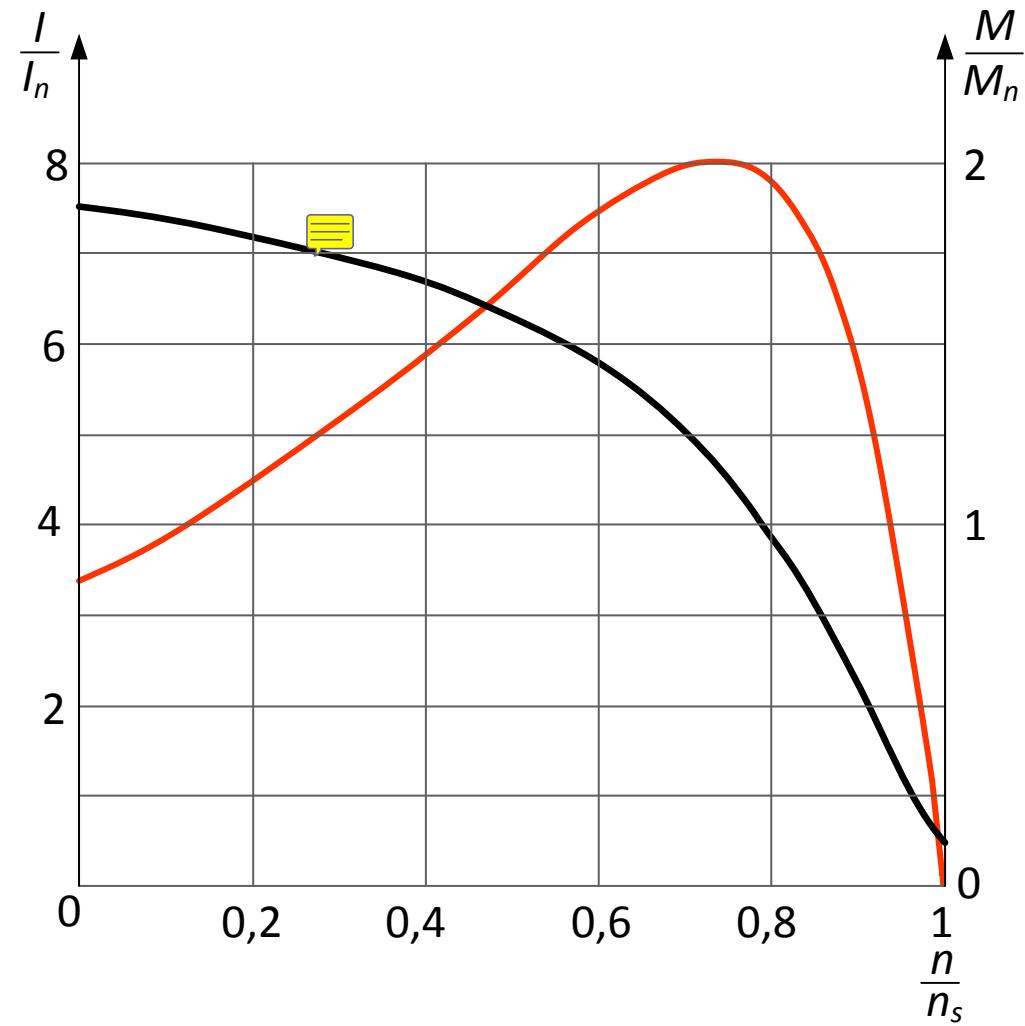
Momentna karakteristika motora i tereta

Primjer: Mehanička karakteristika asinkronog motora i centrifugalnog ventilatora, pogonska radna točka

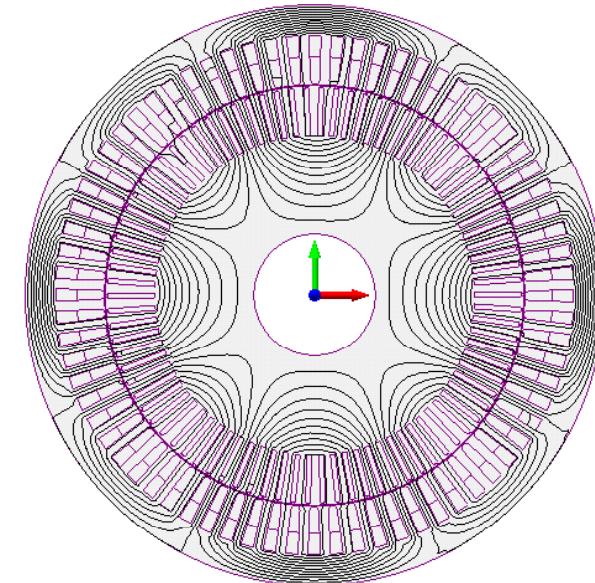
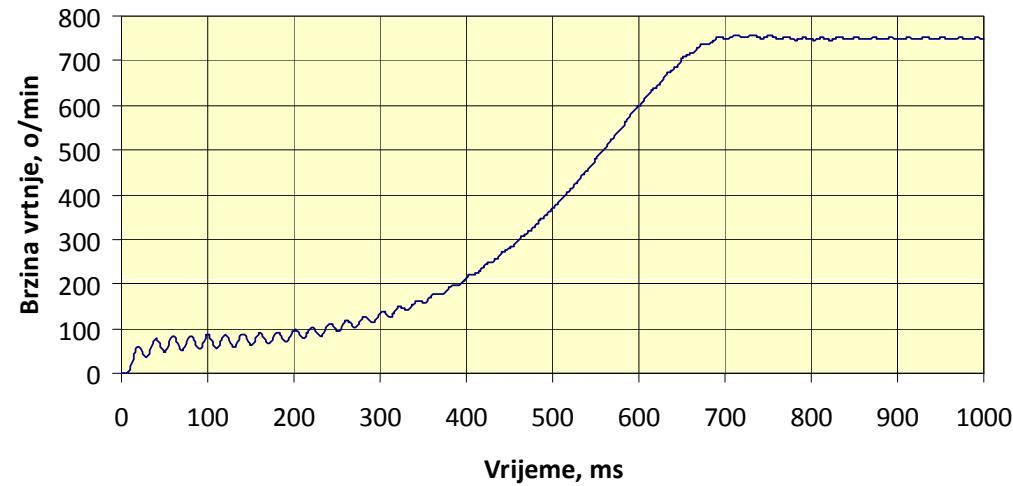
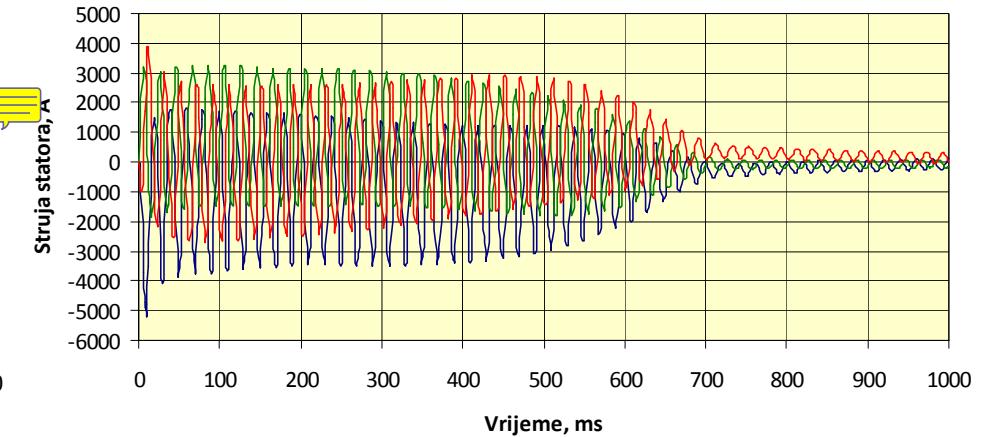
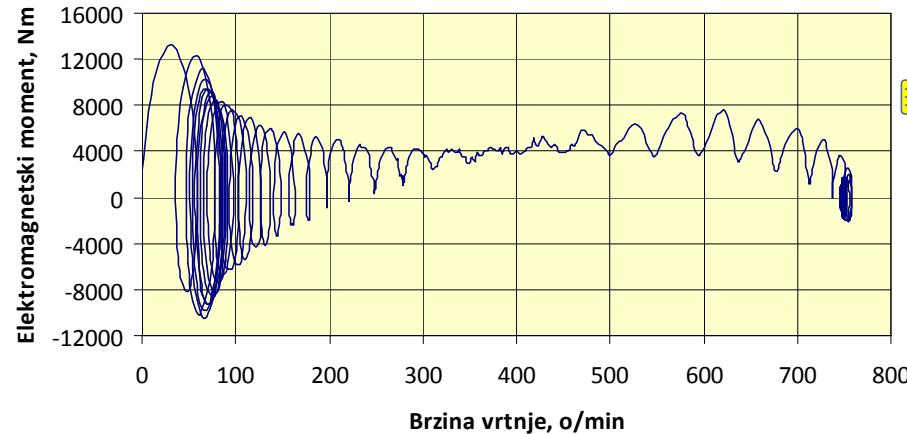


Moment i struja u zaletu asinkronog motora (prikaz dobiven iz modela za stacionarno stanje)

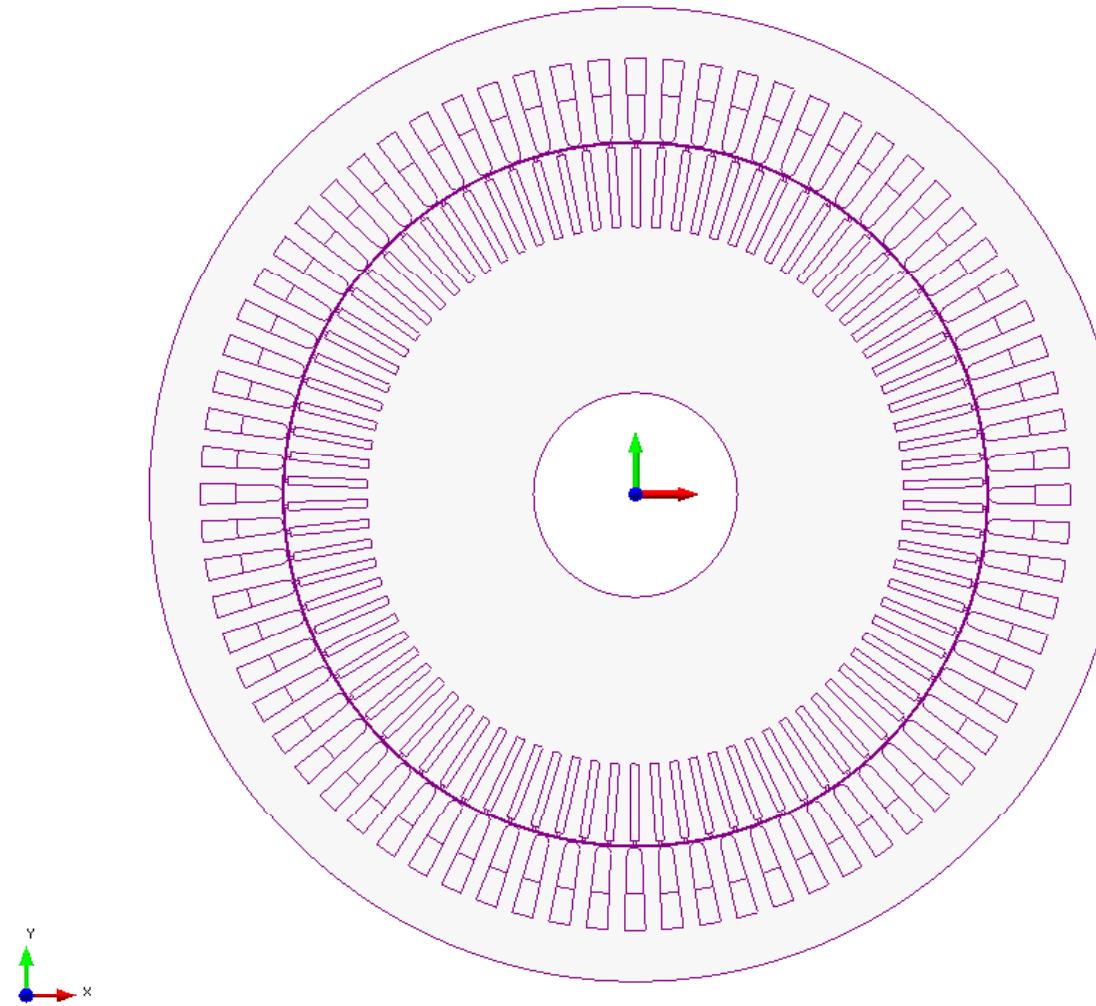
Kod asinkronog motora problem su velike struje pri pokretanju motora.



Moment, struja i brzina vrtnje u zaletu asinkronog motora (pričaz dobiven iz modela za stvarno dinamičko stanje)



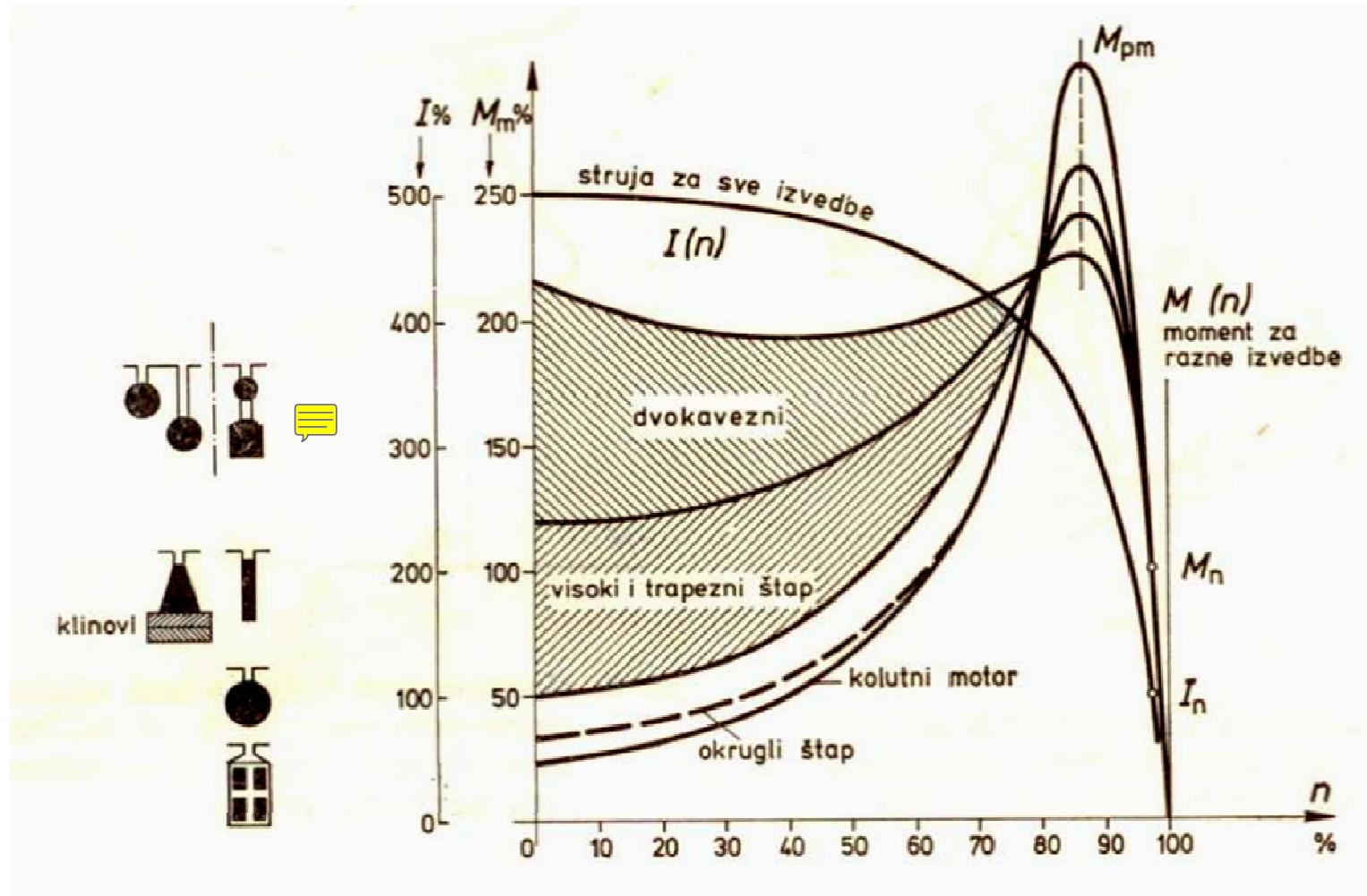
Magnetsko polje tijekom zaleta asinkronog motora



Različiti oblici momentne karakteristike trofaznih asinkronih motora

Oblik momentne karakteristike ovisi o odnosima induktivnih i radnih otpora.

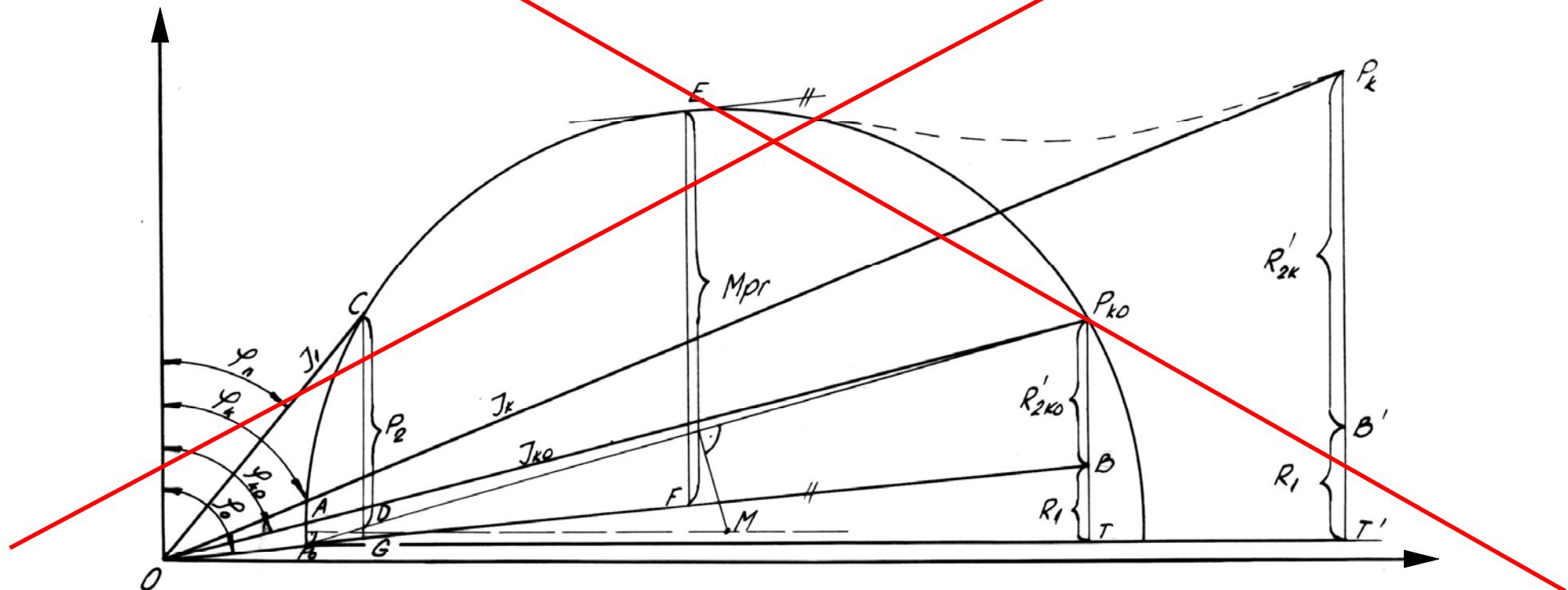
Konstrukcijom rotorskog utora se utječe na oblik momentne karakteristike.



Kružni dijagram asinkronog stroja

Crtanjem kružnog dijagrama na osnovi nadomjesne sheme motora se grafički dobivaju podaci o radnim karakteristikama stroja. Primjena kružnih dijagrama nije aktualna nakon što su se pojavile mogućnosti brzog analitičkog računanja svih karakteristika motora prema nadomjesnoj shemi pomoću računala.

Detalji o kružnim dijagramima → u knjizi R. Wolf: Osnove električnih strojeva, str. 186-196.

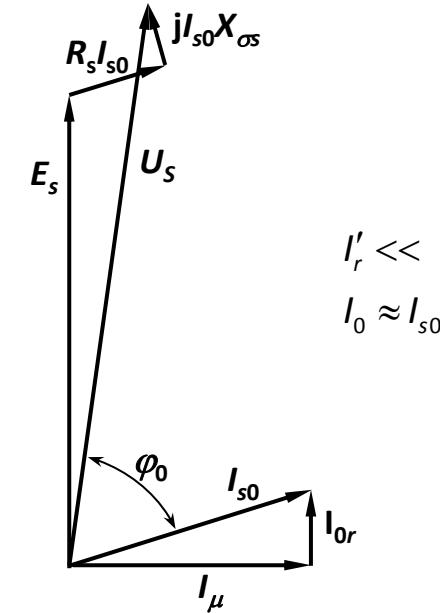
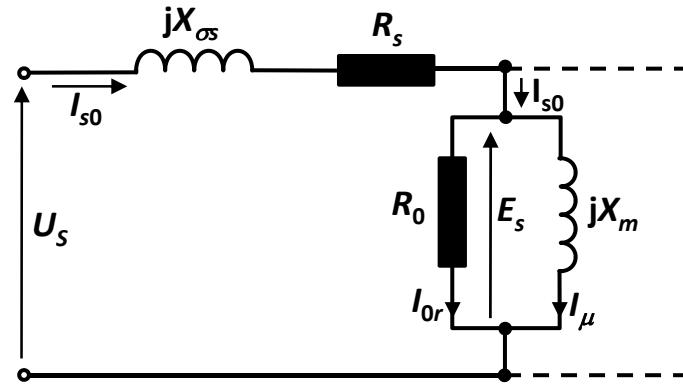


Pogonska stanja asinkronog stroja



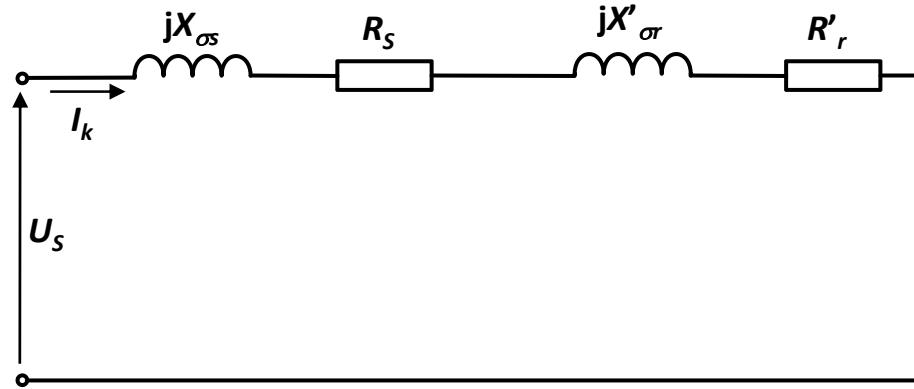
- **Prazni hod motora** – na osovini nema opterećenja, klizanje $s <<, R_r/s >>$, struja praznog hoda I_0 mala (10 – 25 % nazivne)
- **Kratki spoj motora** – rotor zakočen (miruje), klizanje $s = 1$, Z_k prema shemi, struja kratkog spoja I_k vrlo velika (5 – 8 puta veća od nazivne)
- **Opterećenje na osovini** – klizanje malo (1 – 5 %), struja iz mreže ovisna o opterećenju

Nadomjesna shema i fazorski dijagram asinkronog stroja u praznom hodu



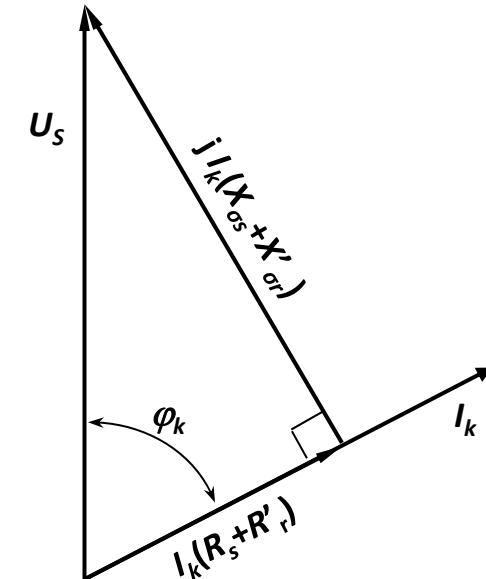
Za računanje se može zanemariti rotorski dio nadomjesne sheme zbog $I_r' \ll$

Nadomjesna shema i fazorski dijagram asinkronog stroja u kratkom spoju

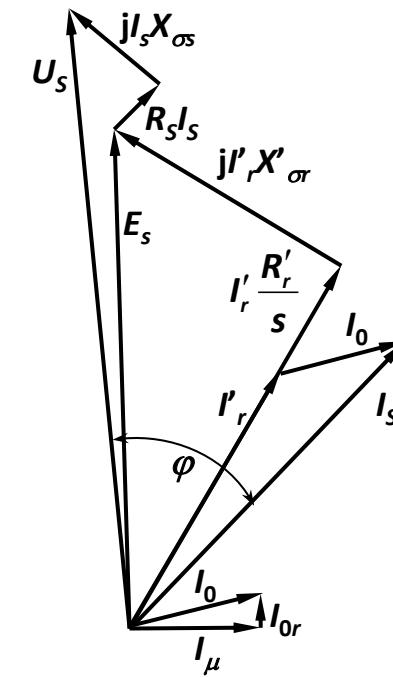
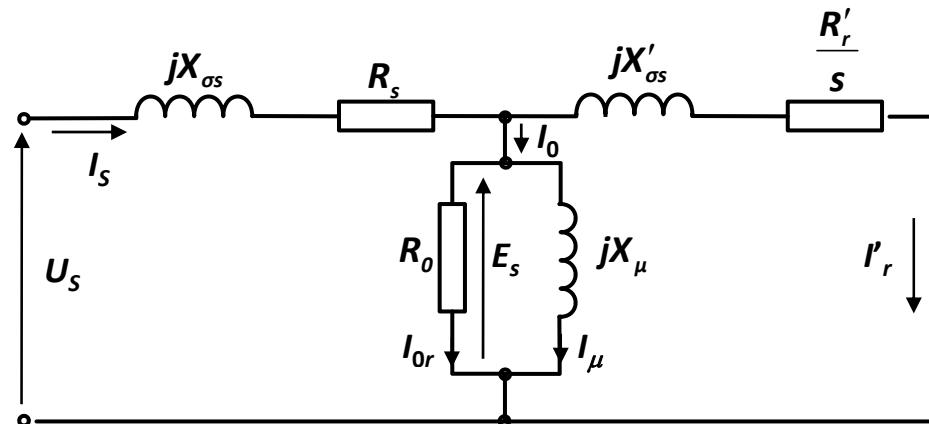


U kratkom spoju možemo zanemariti poprečnu granu nadomjesne sheme i struju računati prema izrazu

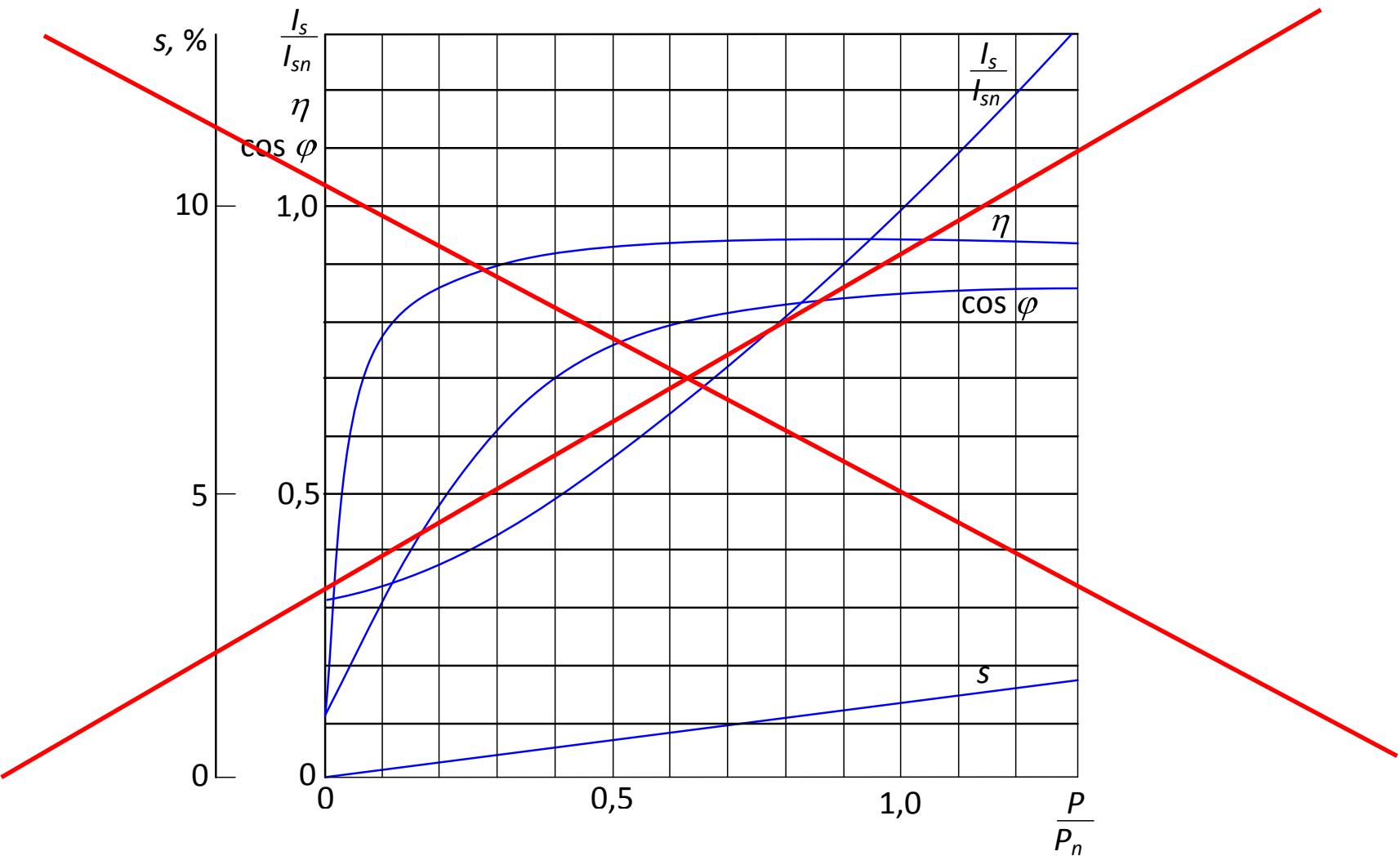
$$I_k = \frac{U_s}{\sqrt{(R_s + R'_r)^2 + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})^2}}$$



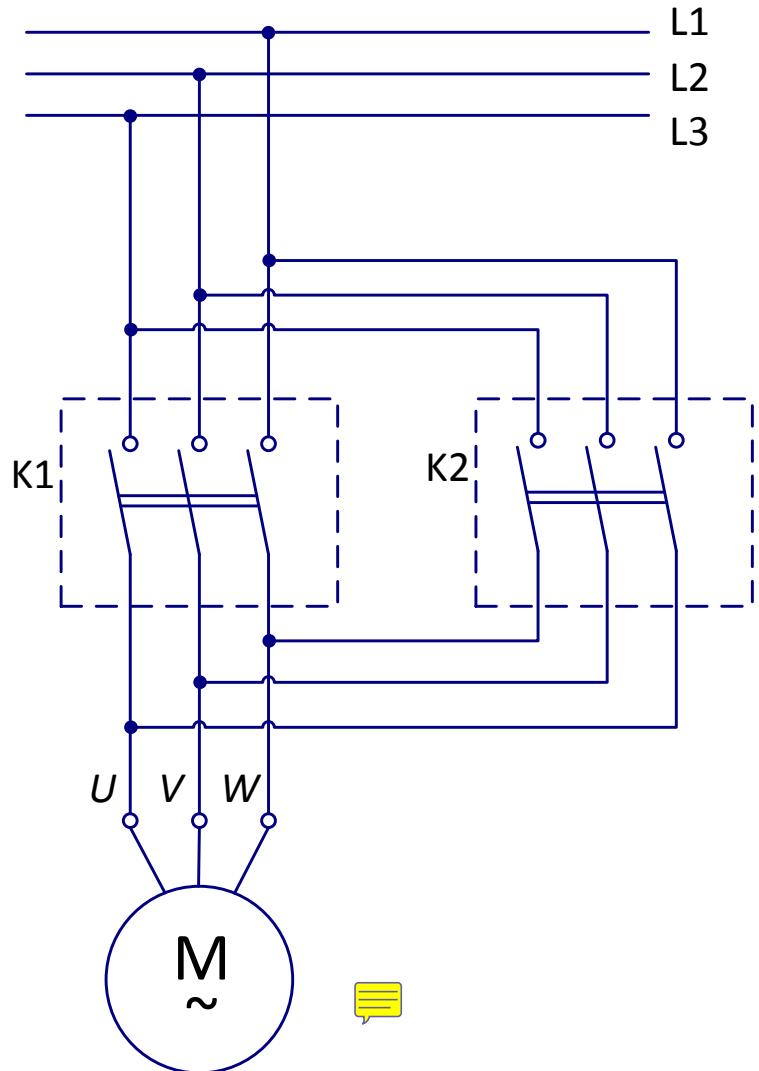
Nadomjesna shema i fazorski dijagram asinkronog stroja u stacionarnom stanju



Radne karakteristike asinkronog motora



Promjena smjera vrtnje asinkronog motora (reverziranje)

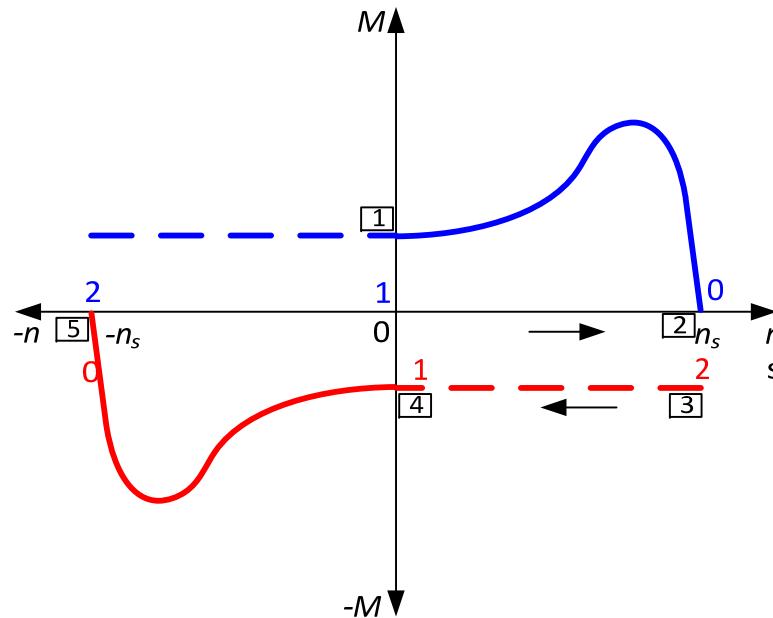


Smjer vrtnje okretnog polja određen je redoslijedom faza. Želimo li ga promijeniti, dovoljno je međusobno zamijeniti priključke 2 od 3 fazna namota trofaznog motora. To se obično radi primjenom kontaktora (sklopnika) i tipkala.

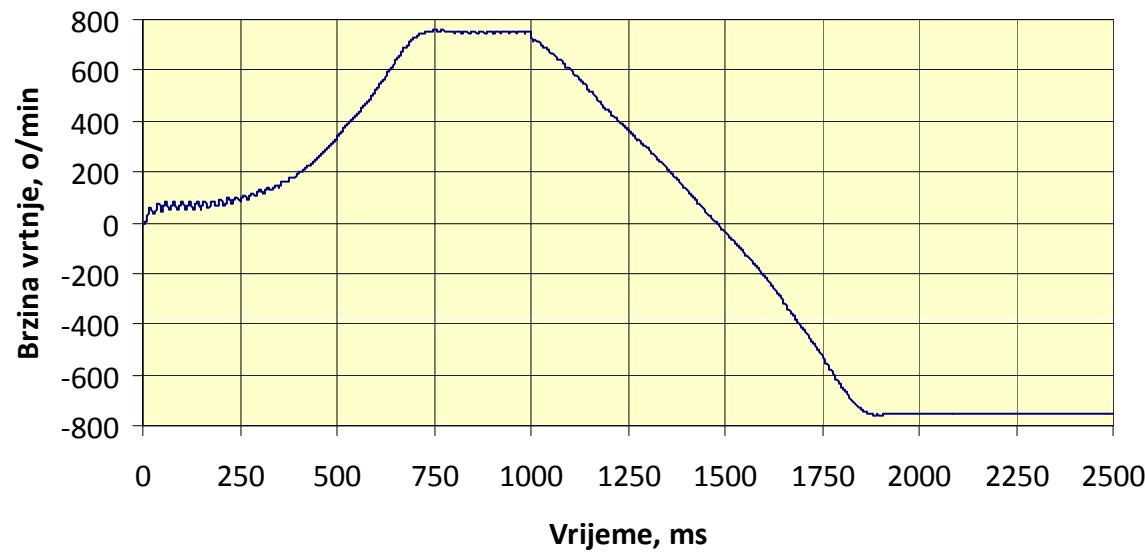
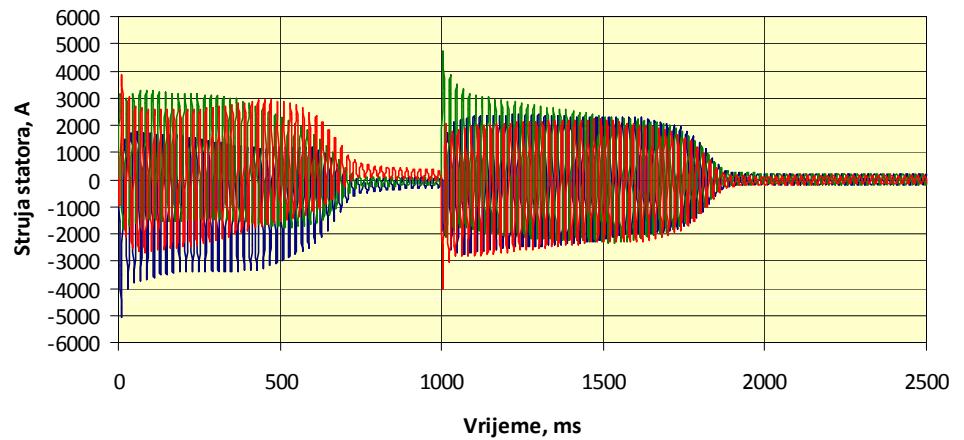
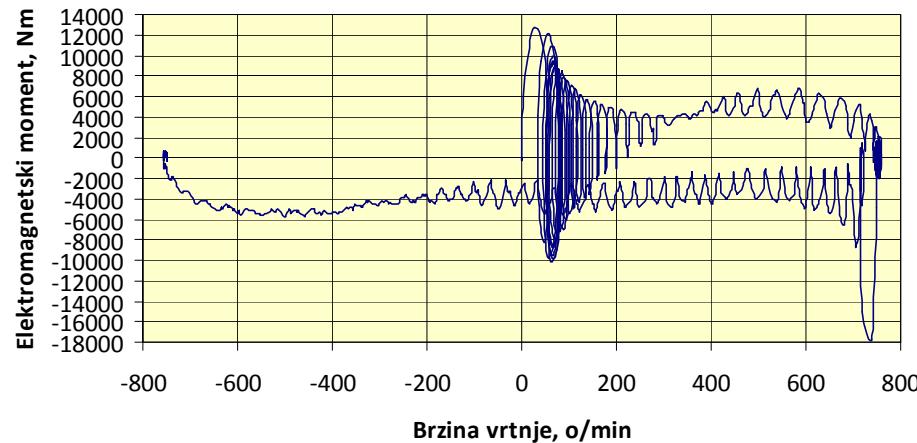
U, V i W – oznake stezaljki motora
L1, L2 i L3 – oznake faza mreže
K1 i K2 – kontaktori (sklopnići)

Momentna karakteristika asinkronog motora u procesu reverziranja (promjene smjera vrtnje)

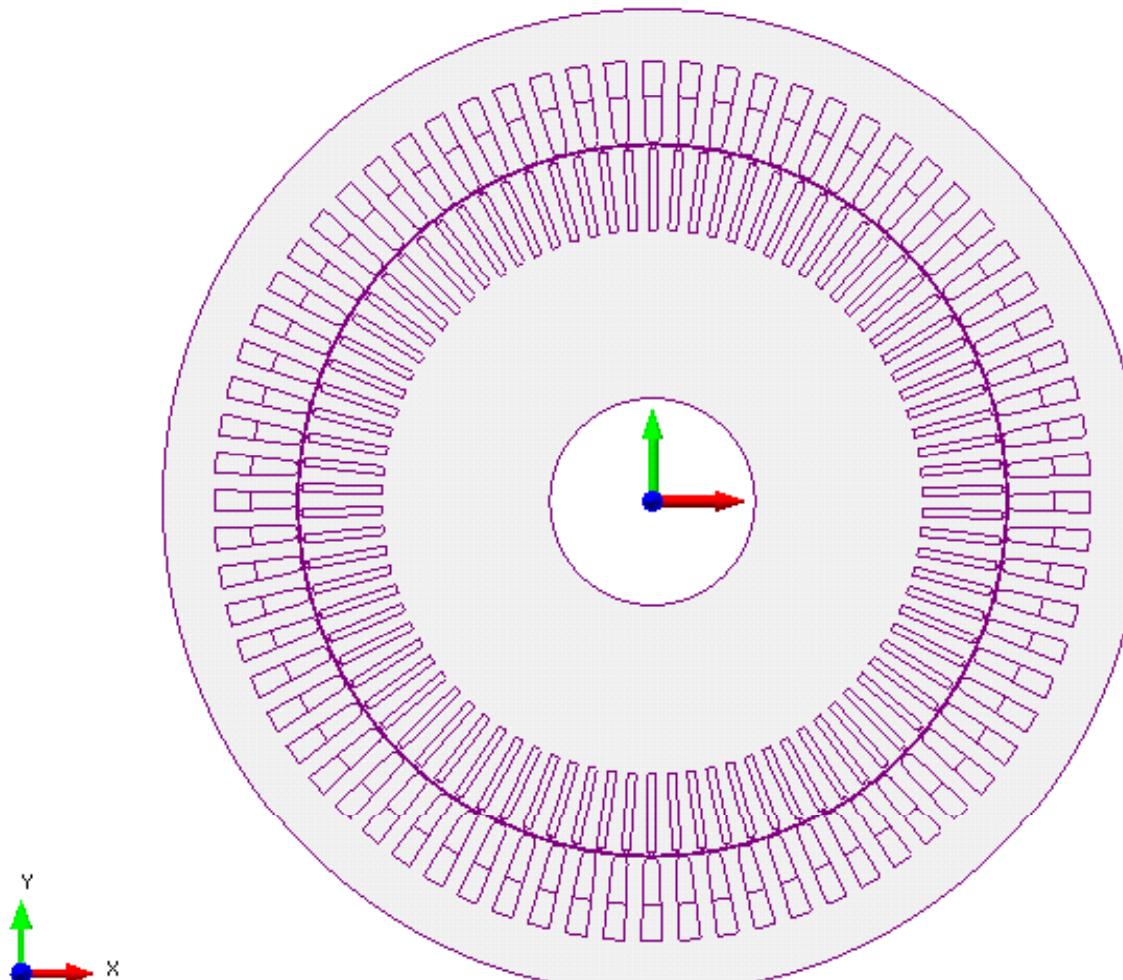
- [1] – Motor kreće iz mirovanja ($s=1$)
- [2] – Motor se zalijeće do približno sinkrone brzine vrtnje ($s<<$)
- [3] – Uz beznaponsku pauzu vrši se zamjena redoslijeda faza, motor prelazi u protustrujno kočenje ($s=2$)
- [4] – Motor koči do brzine 0 ($s=1$)
- [5] – Motor se zalijeće do približno sinkrone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



Moment, struja i brzina vrtnje tijekom reverziranja asinkronog motora (prikaz dobiven iz modela za stvarno dinamičko stanje)



Magnetsko polje tijekom zaleta asinkronog motora



Problemi i tehnike pokretanja asinkronih motora

1. Problemi kod pokretanja asinkronih motora

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

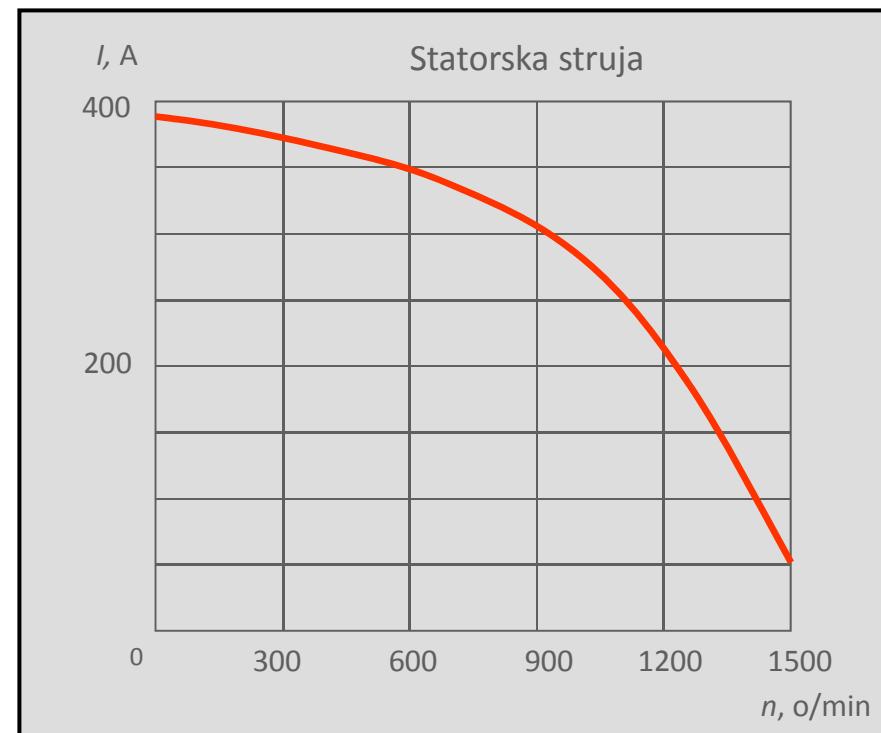
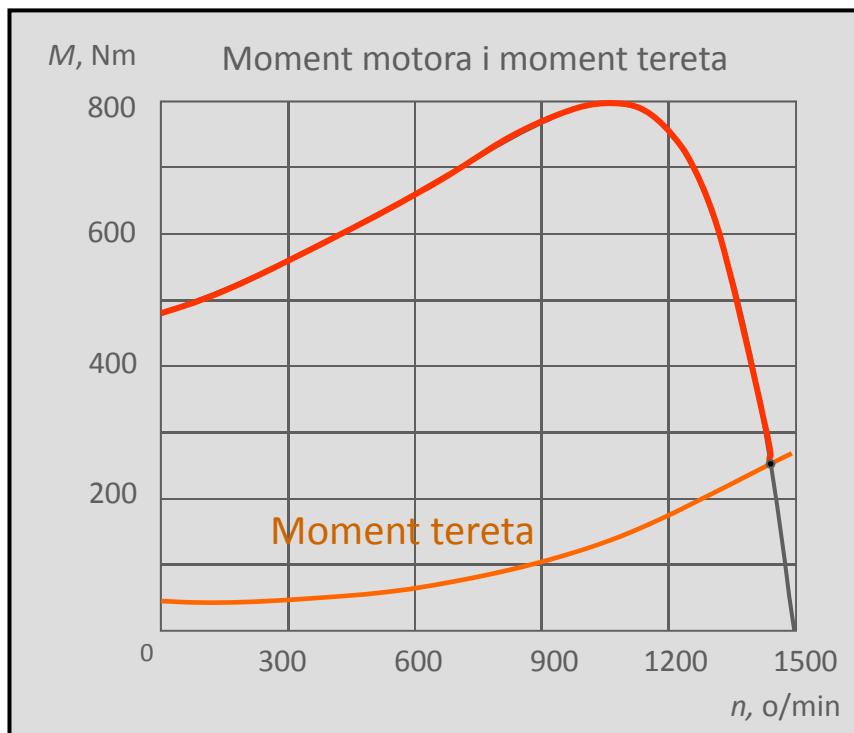
2. Tehnike pokretanja

Najčešće primjenjivane tehnike su:

- Pokretanje direktnim priključkom na mrežu,
- Pokretanje zvijezda-trokut preklopom,
- Pokretanje preko autotransformatora,
- Pokretanje soft-start uređajem,
- Pokretanje pomoću elektroničkog energetskog pretvarača,
- Pokretanje preko hidrauličnih zaletnih spojnica.

Sve se tehnike svode na to da se izvrši uspješan zalet motora i pogona uz što manje struje zaleta i što kraće trajanje zaleta. Utjecaj na mrežu mora biti u prihvatljivim granicama.

Pokretanje kaveznog asinkronog motora direktnim priključkom na mrežu



Zbog velikih struja pokretanja koje prave probleme u električnoj mreži (padovi napona i preopterećenja sklopnih aparata) koriste se različite tehnike pokretanja.

Direktni start

Pokretanje zvijezda - trokut

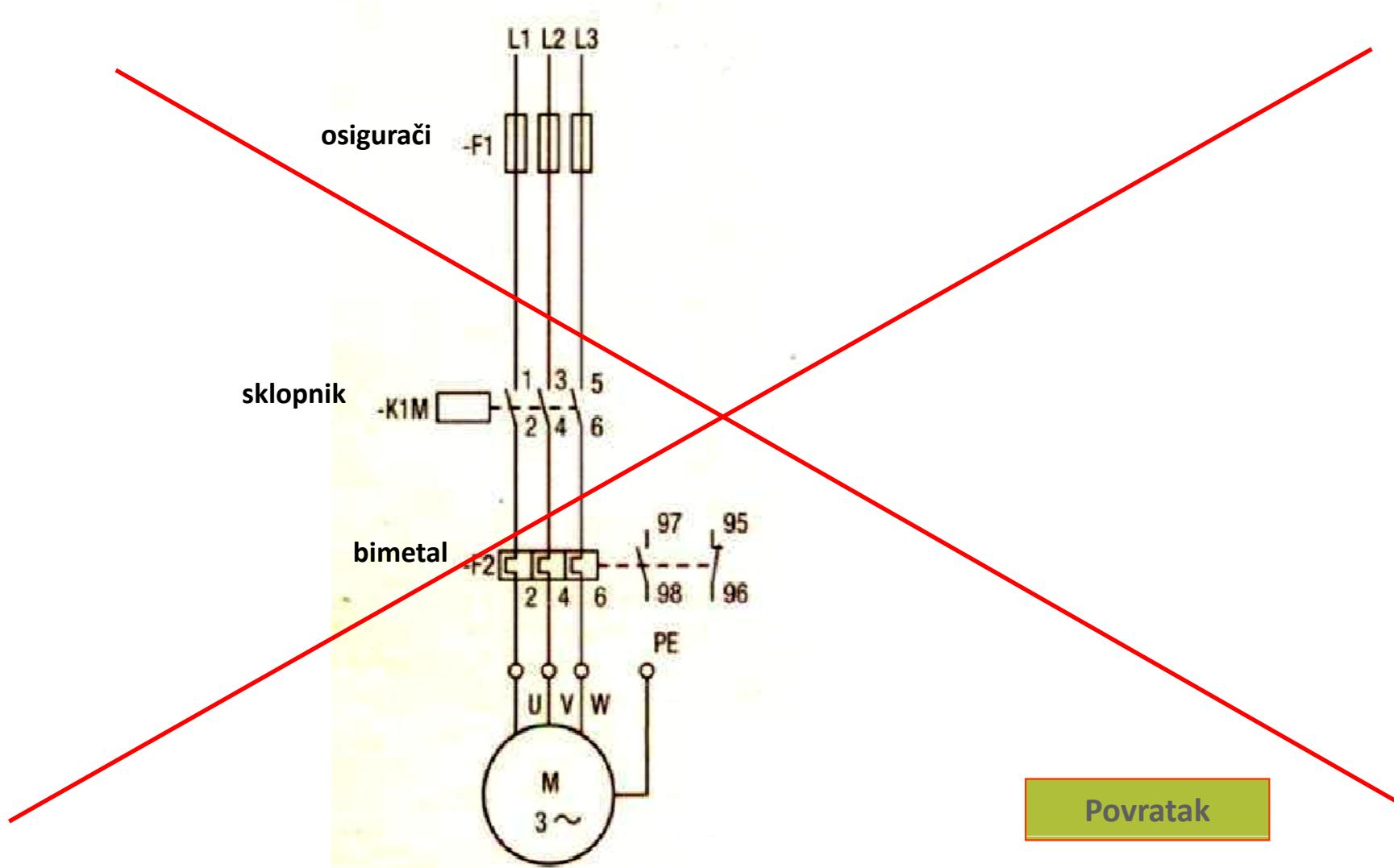
Pokretanje autotransformatorom

Shema

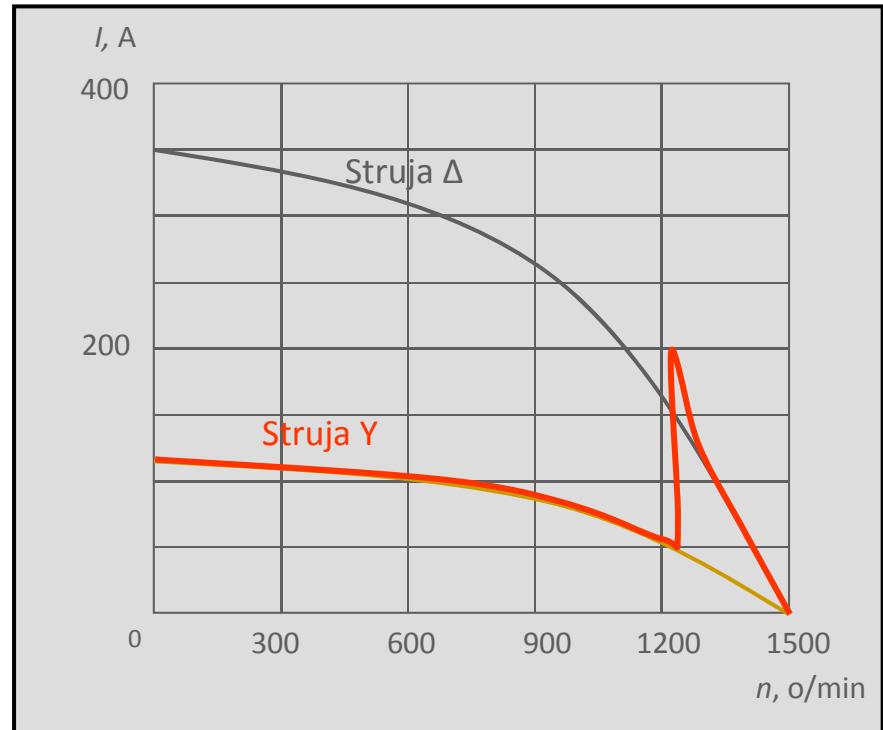
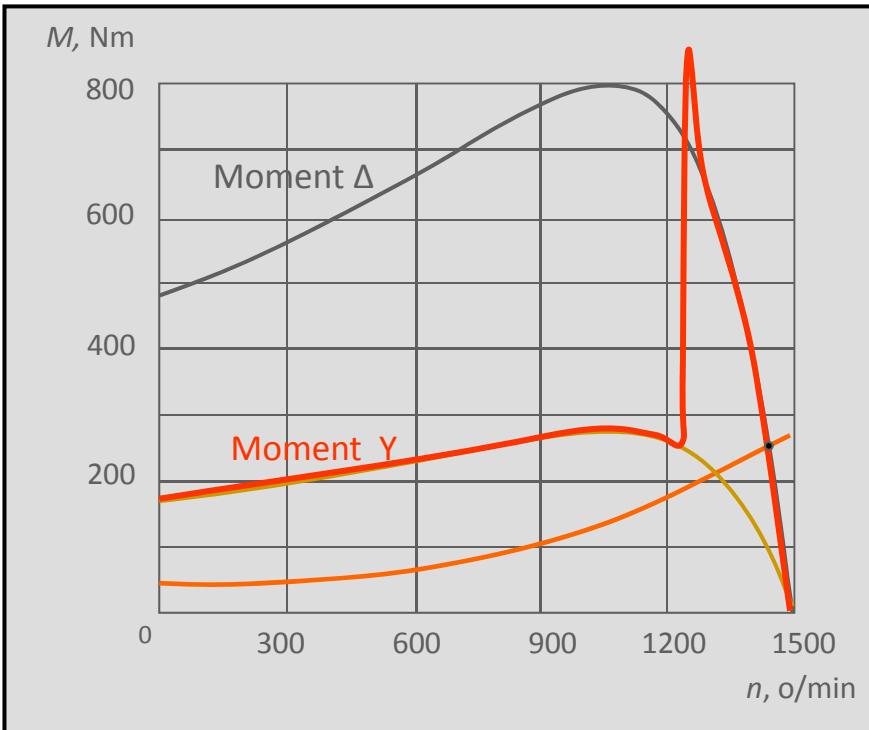
Pokretanje soft-start uređajem

Nastavi prez.

Spojna shema za pokretanje kaveznog asinkronog motora direktnim priključkom na mrežu



Pokretanje kaveznog asinkronog motora preklopkom zvijezda - trokut



$$\frac{M_Y}{M_\Delta} = \left(\frac{U_{SY}}{U_{S\Delta}} \right)^2 = \frac{1}{3}$$

U NAMOTU PREMA MREŽI

$$\frac{I_{SY}}{I_{S\Delta}} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$\frac{I_{SY}}{I_{I\Delta}} = \frac{1}{3}$$

Direktni start

Pokretanje zvijezda - trokut

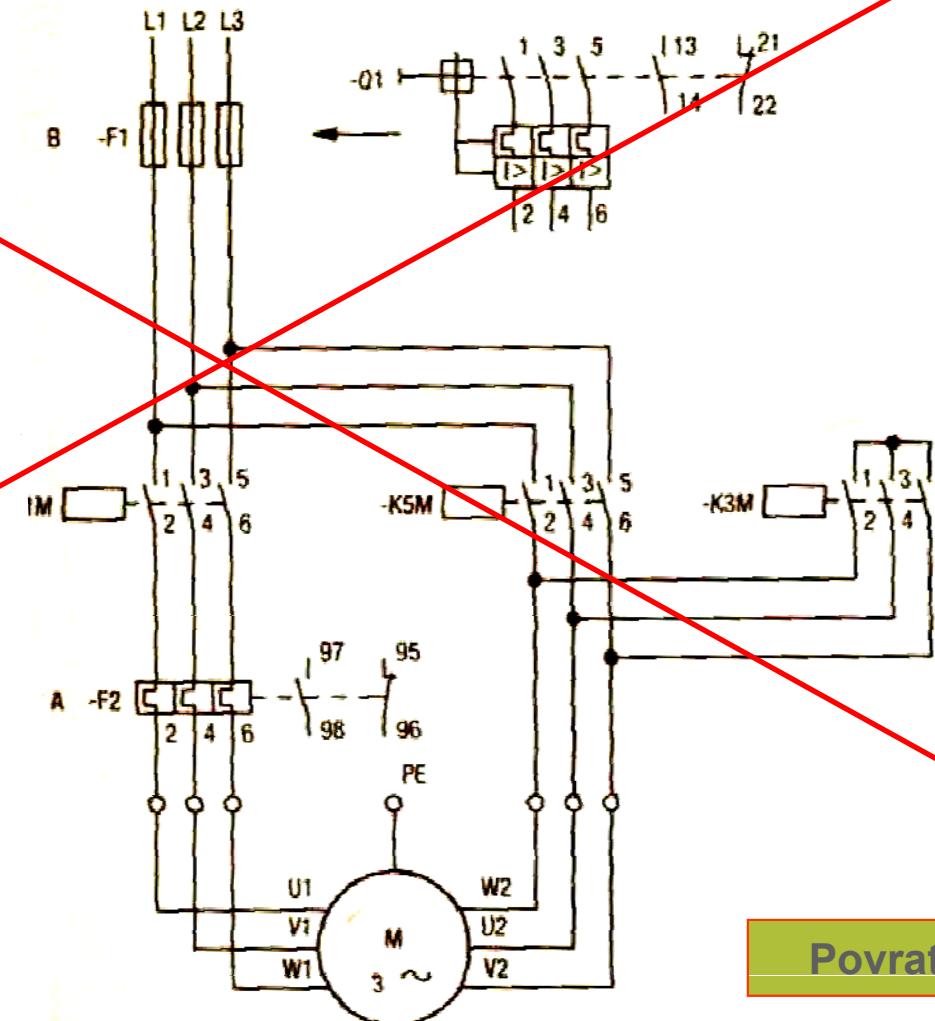
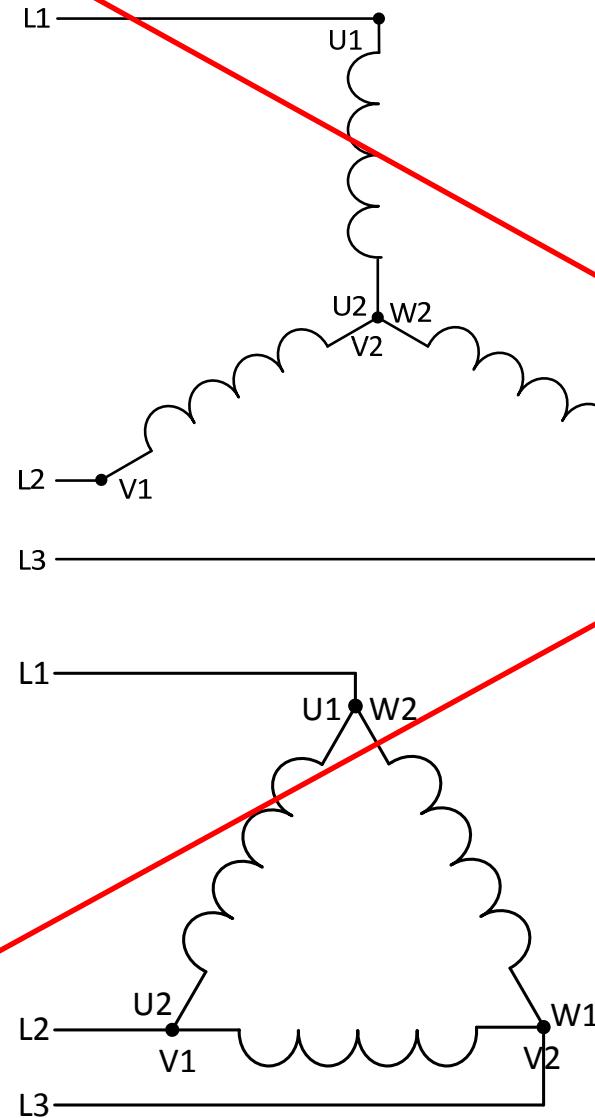
Pokretanje autotransformatorom

Shema

Pokretanje soft-start uređajem

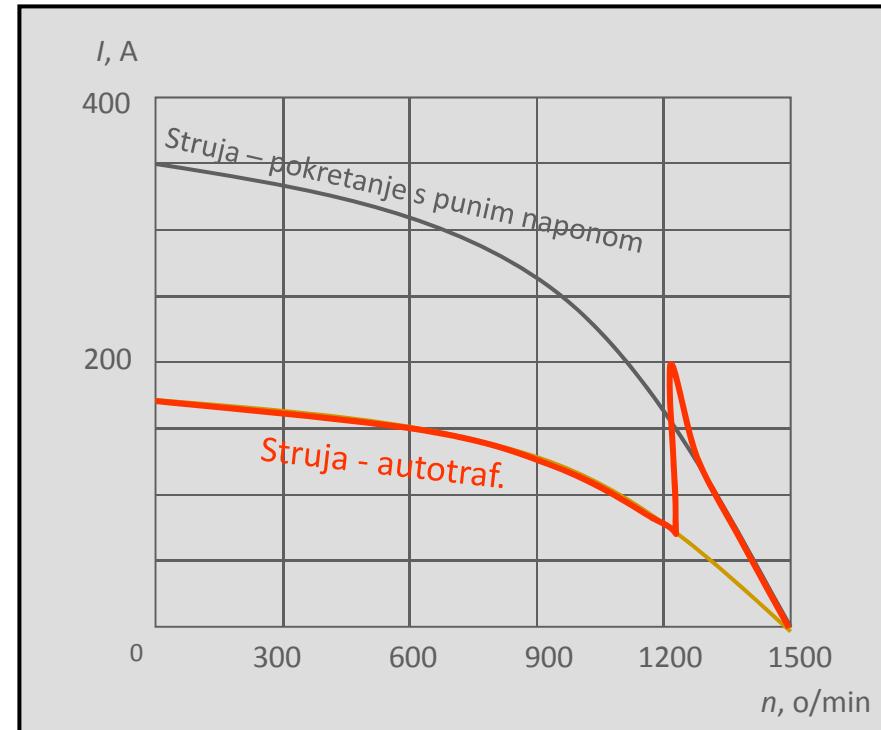
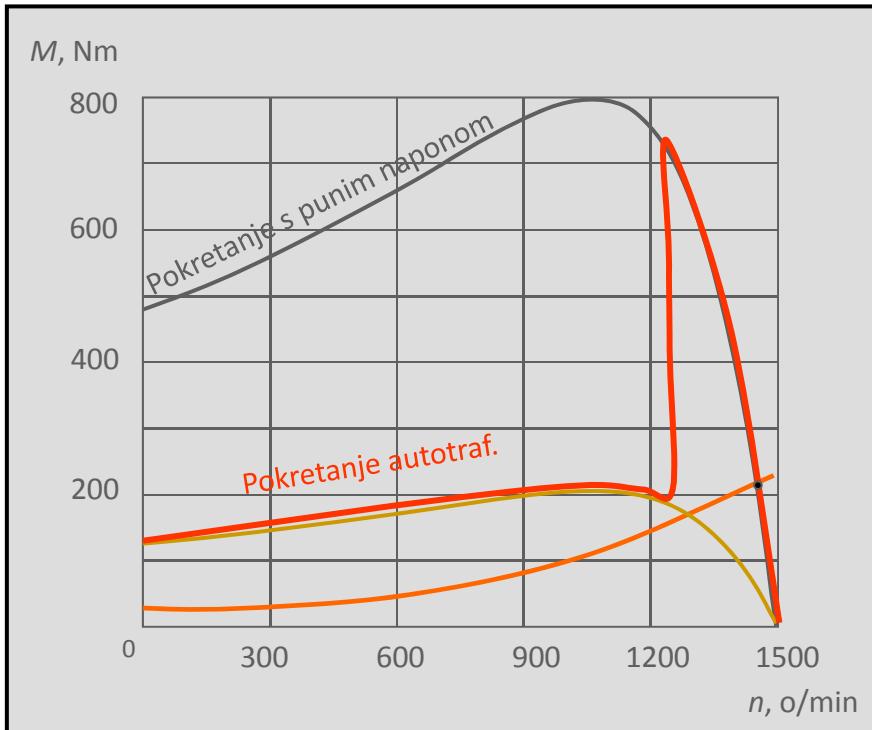
Nastavi prez.

Shema spoja za priključak kavezognog asinkronog motora na mrežu preklopkom zvijezda - trokut



Povratak

Pokretanje kavezognog asinkronog motora autotransformatorom



Shema

Direktni start

Pokretanje zvijezda - trokut

Pokretanje autotransformatorom

Pokretanje soft-start uređajem

Nastavi prez.

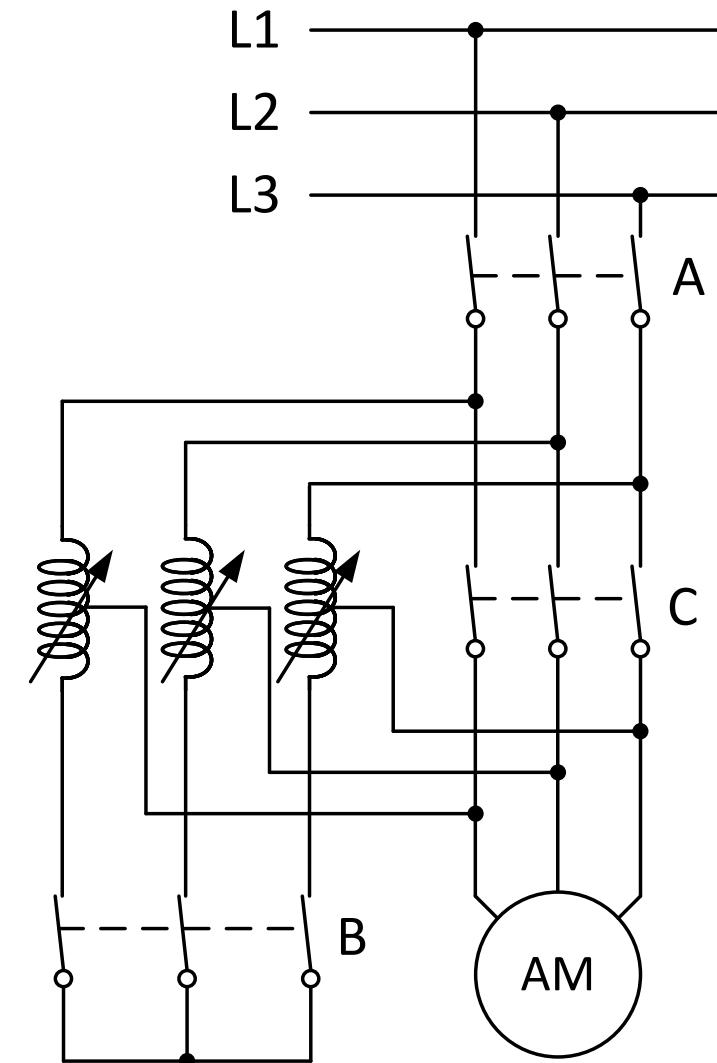
Pokretanje kavezognog asinkronog motora autotransformatorom

Potrebna su tri prekidača i autotransformator.

Struja pokretanja se prilagodi mogućnostima mreže.

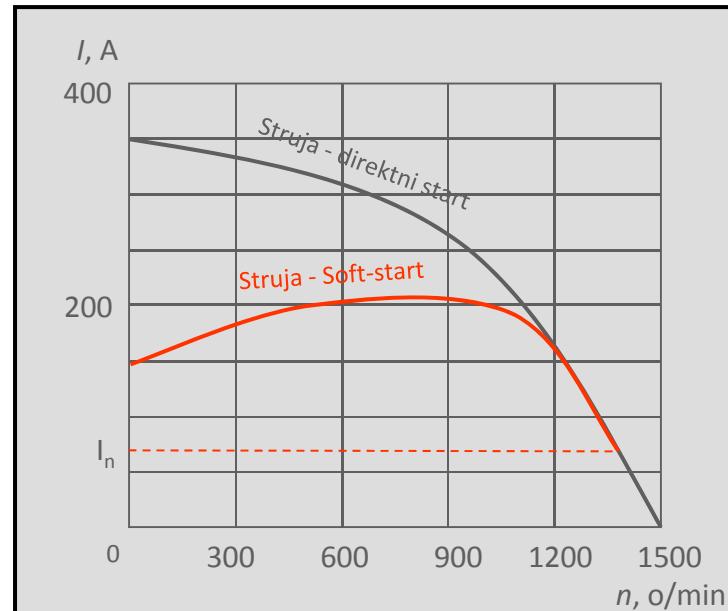
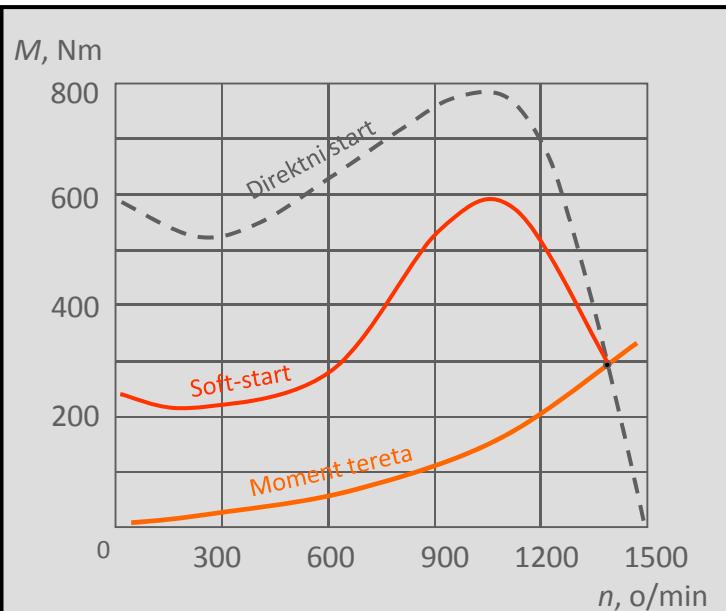
Pokretanje: zatvoreni prekidači (sklopke) A i B

Normalni pogon: zatvoreni prekidači A i C.

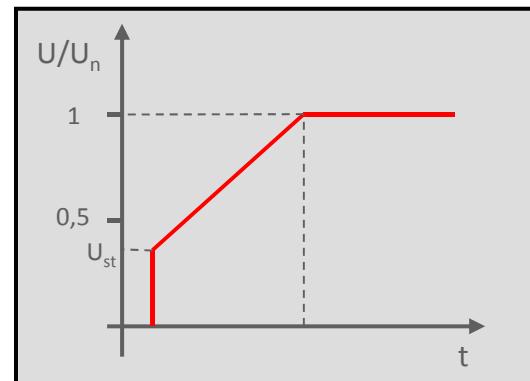


[Povratak](#)

“Soft-start” ili lagano pokretanje



Pokretanje soft-start uređajem



Shema

Direktni start

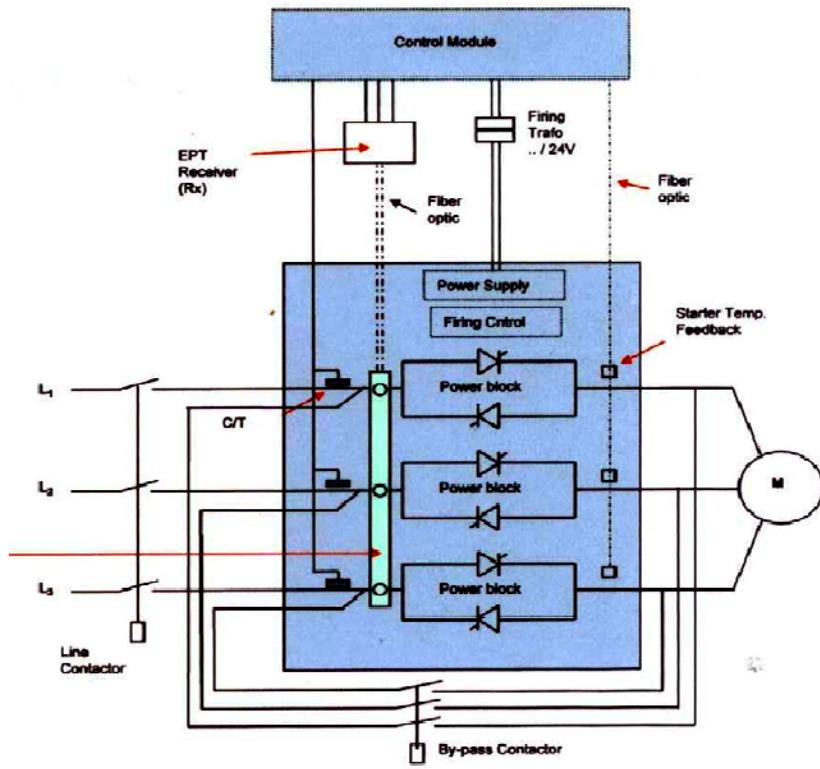
Pokretanje zvijezda - trokut

Pokretanje autotransformatorom

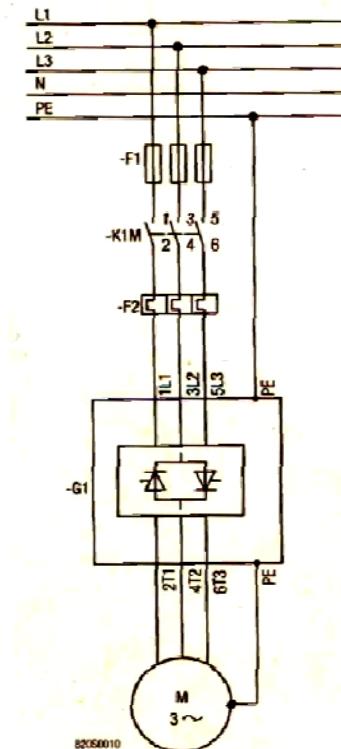
Nastavi prez.

Pokretanje kavezognog asinkronog motora preko “soft-start” uređaja

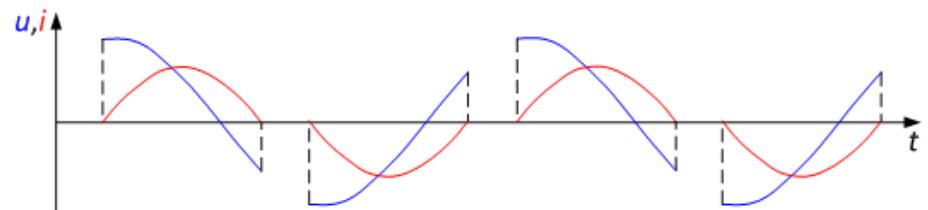
“Soft-starter” je elektronički uređaj kojim se može regulirati napon statora motora da se smanji struja pokretanja na neki dozvoljeni iznos.



Soft-start uređaj s “bajpas sklopnikom”

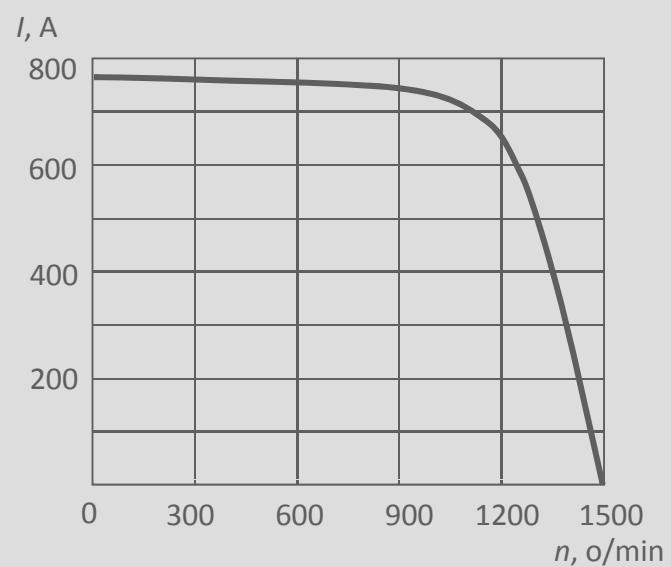
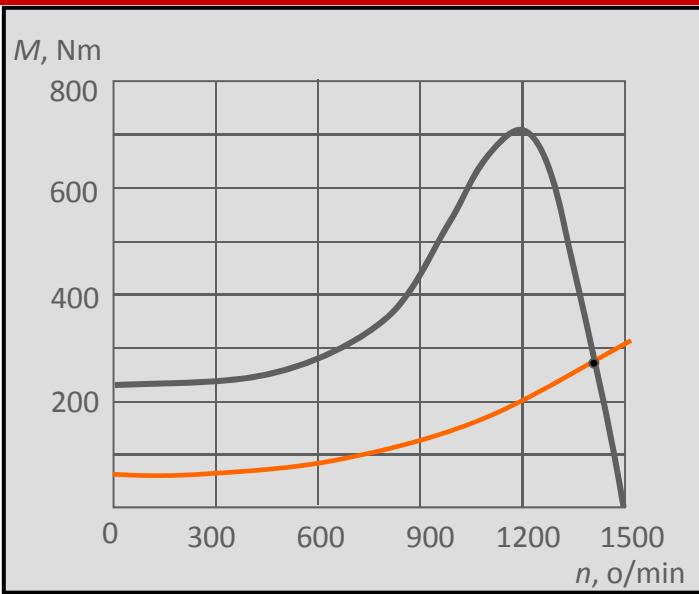


Priklučak na mrežu sa “soft-start” uređajem



Valni oblici napona i struje statora

Pokretanje klizno kolutnog asinkronog motora dodavanjem otpora u rotorski krug



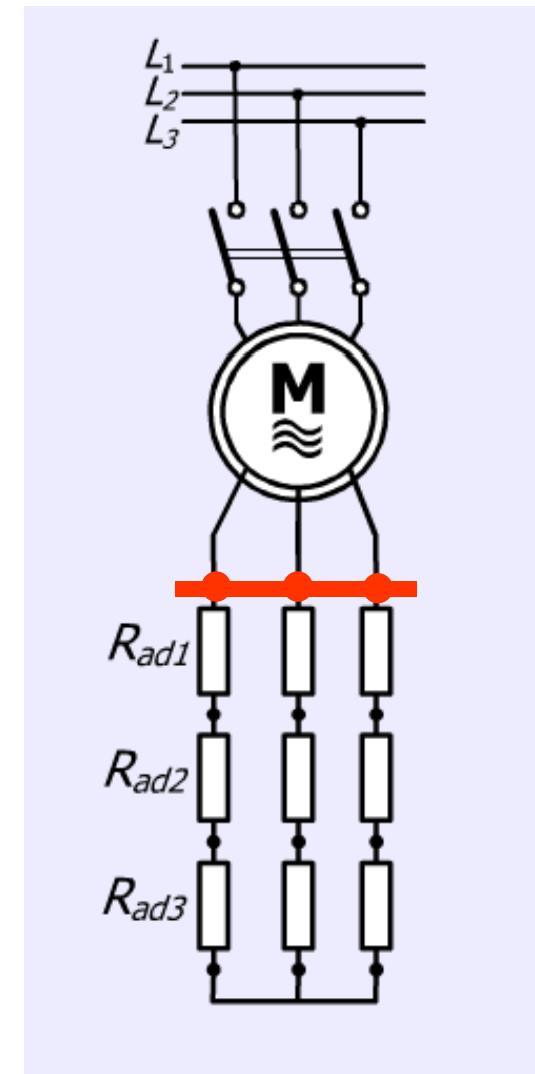
$R_d = 0$

$R_d = Rad1$

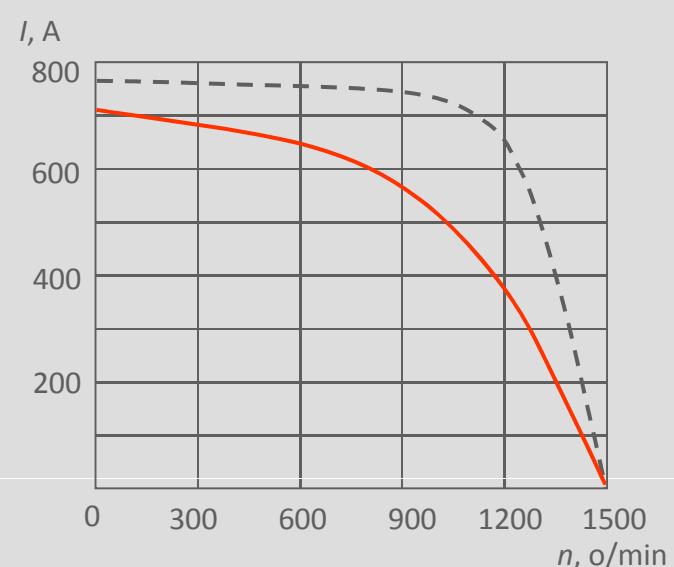
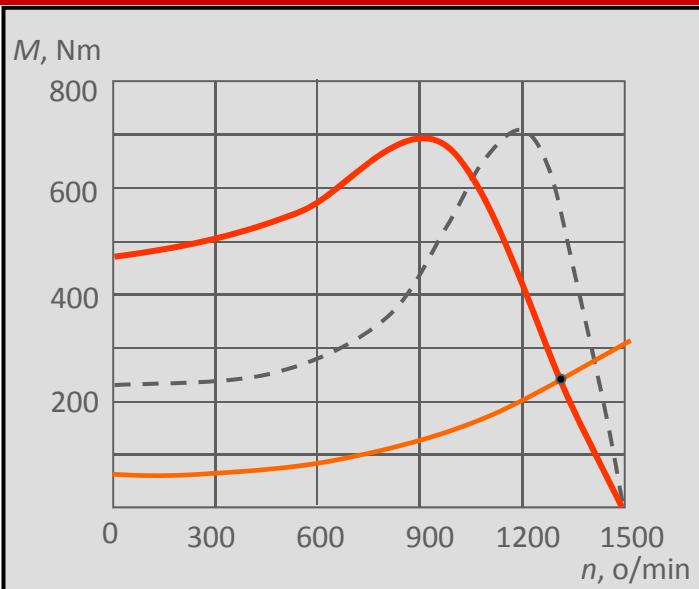
$R_d = Rad1+Rad2$

$R_d = Rad1+Rad2+Rad3$

[Nastavi prezentaciju](#)



Pokretanje klizno kolutnog asinkronog motora dodavanjem otpora u rotorski krug



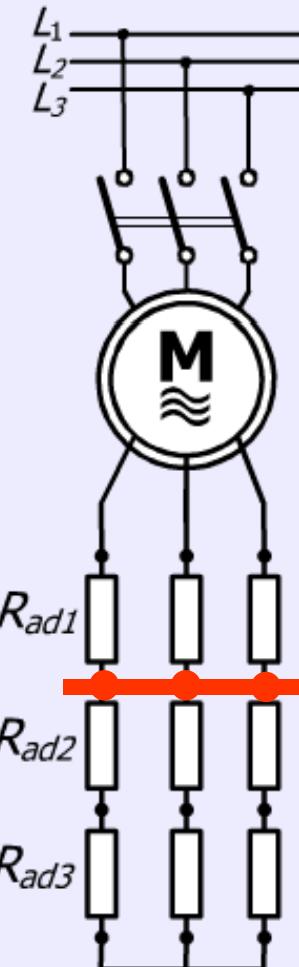
$R_d = 0$

$R_d = Rad1$

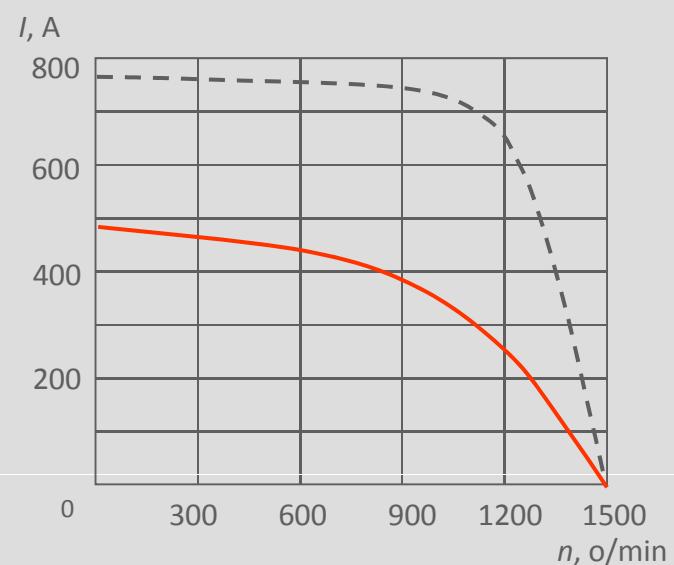
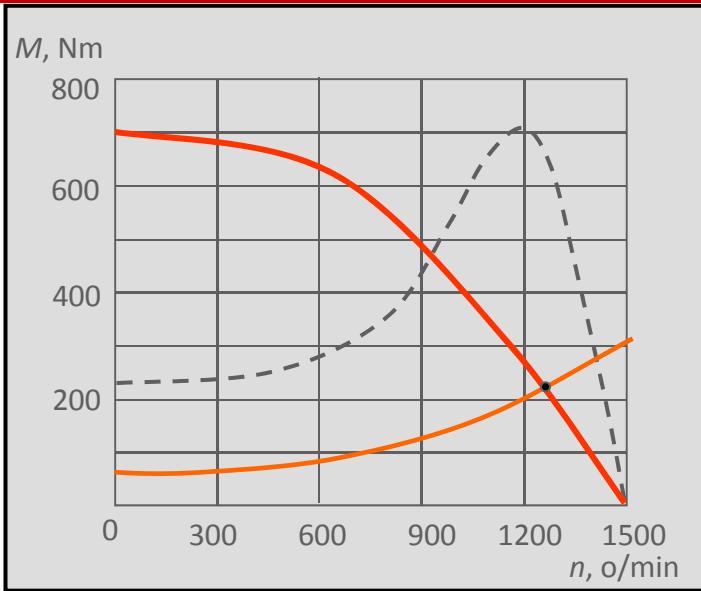
$R_d = Rad1+Rad2$

$R_d = Rad1+Rad2+Rad3$

[Nastavi prezentaciju](#)



Pokretanje klizno kolutnog asinkronog motora dodavanjem otpora u rotorski krug



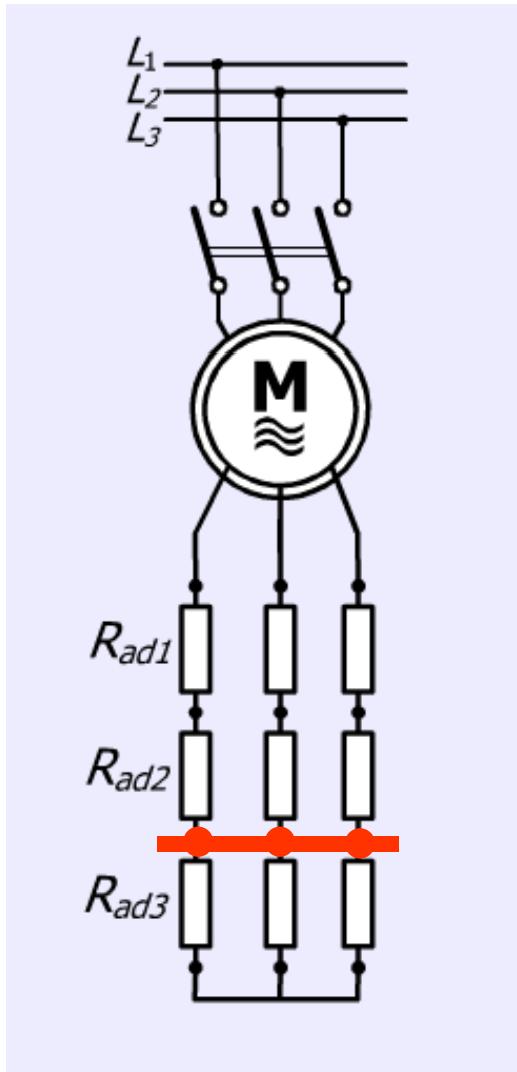
$R_d = 0$

$R_d = Rad1$

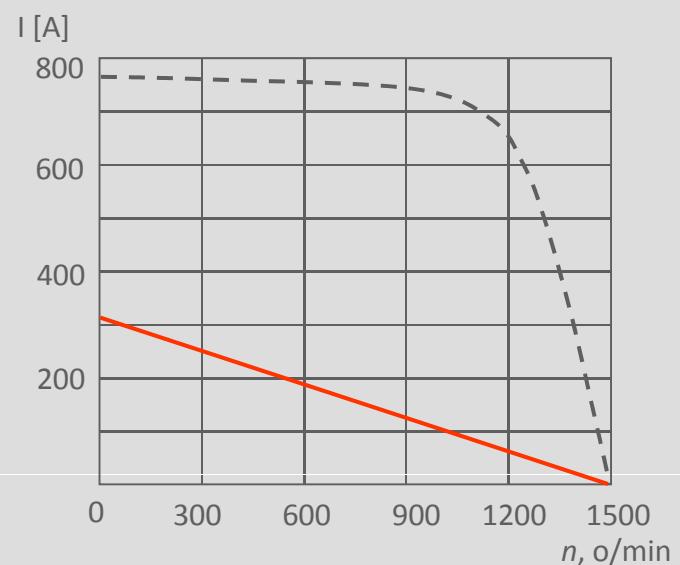
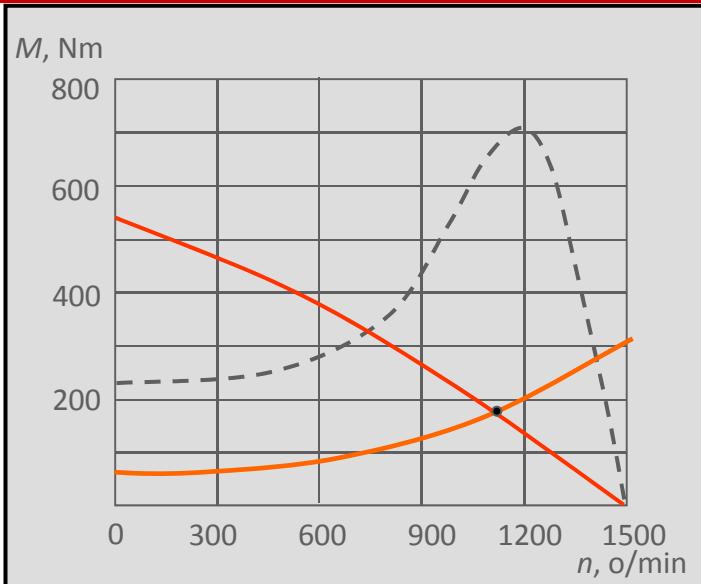
$R_d = Rad1+Rad2$

$R_d = Rad1+Rad2+Rad3$

[Nastavi prezentaciju](#)



Pokretanje klizno kolutnog asinkronog motora dodavanjem otpora u rotorski krug



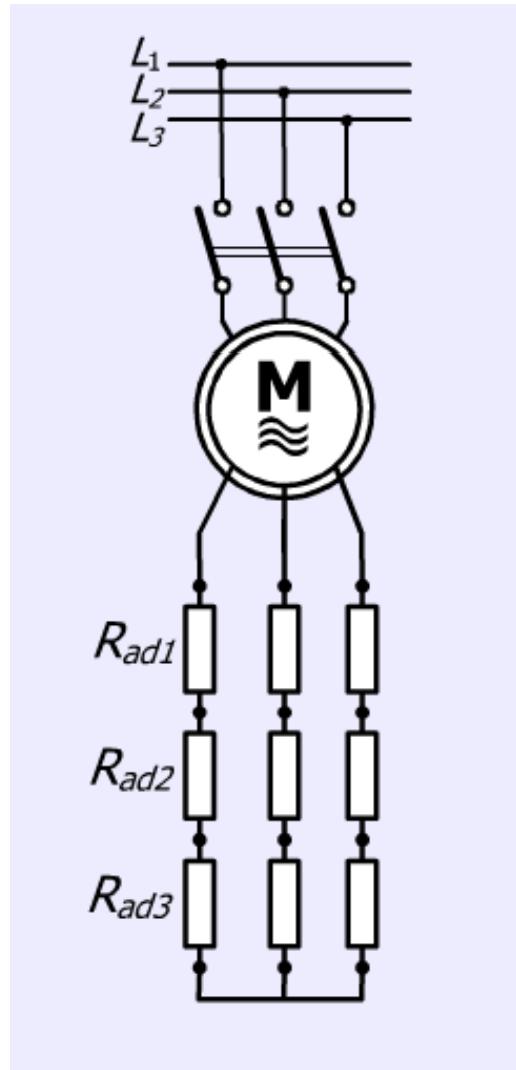
$R_d = 0$

$R_d = Rad1$

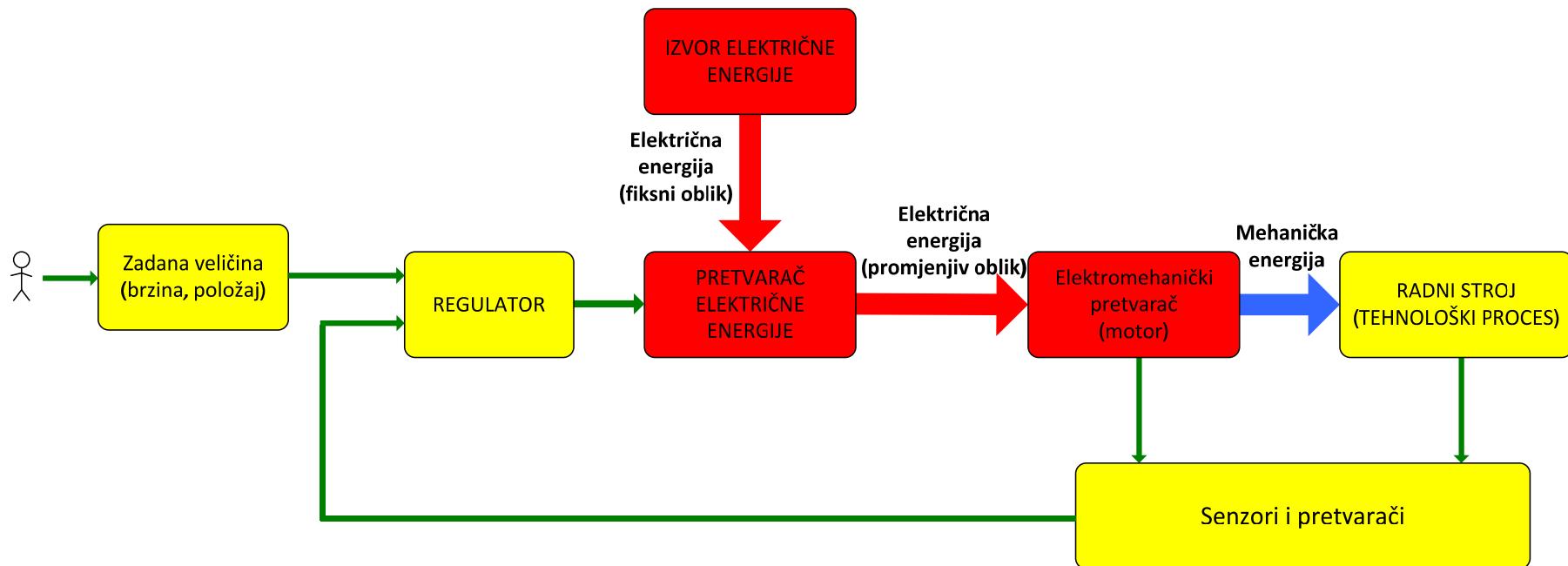
$R_d = Rad1+Rad2$

$R_d = Rad1+Rad2+Rad3$

[Nastavi prezentaciju](#)



Elektromotorni pogon- sustav za pretvorbe električne u mehaničku energiju



Regulacija brzine vrtnje asinkronog motora

Brzina vrtnje motora je određena izrazom

$$n = n_s(1-s) = \frac{60f_s}{p}(1-s)$$

i ona se može regulirati (namještati) promjenom frekvencije f_s , broja pari polova p i promjenom klizanja s .

Mijenjanje brzine promjenom broja pari polova je moguće samo u grubim iznosima. Npr. za $f_s = 50$ Hz vrijedi

$p = 1$, sinkrona brzina je 3000 o/min

$p = 2$, sinkrona brzina je 1500 o/min

$p = 3$, sinkrona brzina je 1000 o/min

Često se koristi u praksi i to najčešće u stroju za pranje rublja. Motor sadrži dva namota, npr. jedan ima $2p = 2$, a drugi $2p = 12$ ili 14 . Vrlo je jednostavno i, za primjenu u domaćinstvu, prihvatljivo tehničko rješenje.

Regulacije u elektromotornim pogonima

Općenito može biti potrebno da se u nekom elektromotornom pogonu regulira:

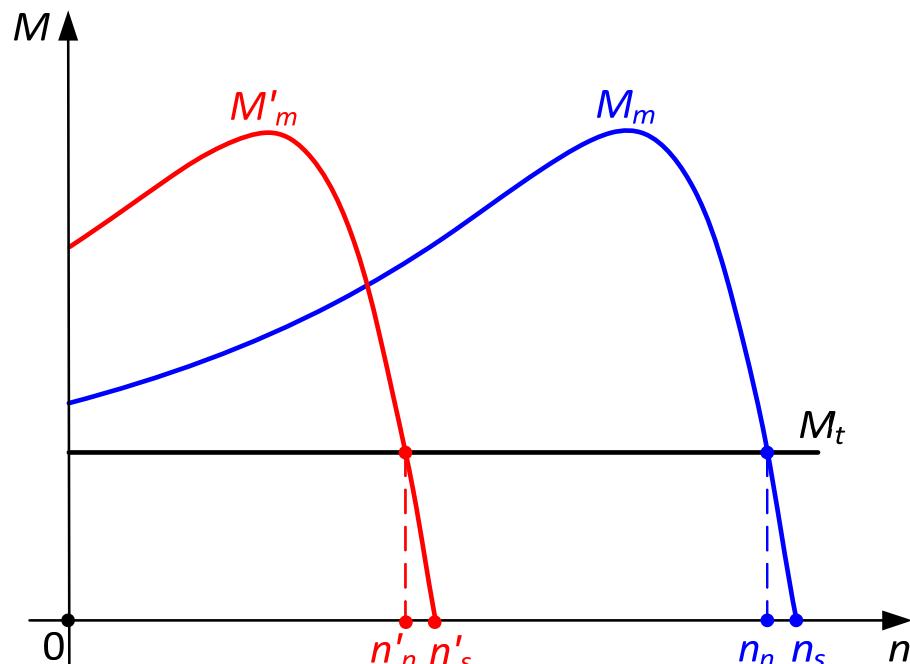
- brzina vrtnje radnih mehanizama,
- moment,
- položaj (pozicija).

Najčešće se regulira brzina vrtnje.

Da li će se regulirati brzina zbog ušteda energije, ovisi o tehničko-ekonomskim uvjetima (cijena energije, vremenski rok za povrat investicije).

Što znači regulirati brzinu vrtnje motora?

Prema slici, radna točka EMP pogona u stacionarnom stanju je određena sjecištem karakteristike momenta motora i karakteristike momenta opterećenja $M_m = M_t$.

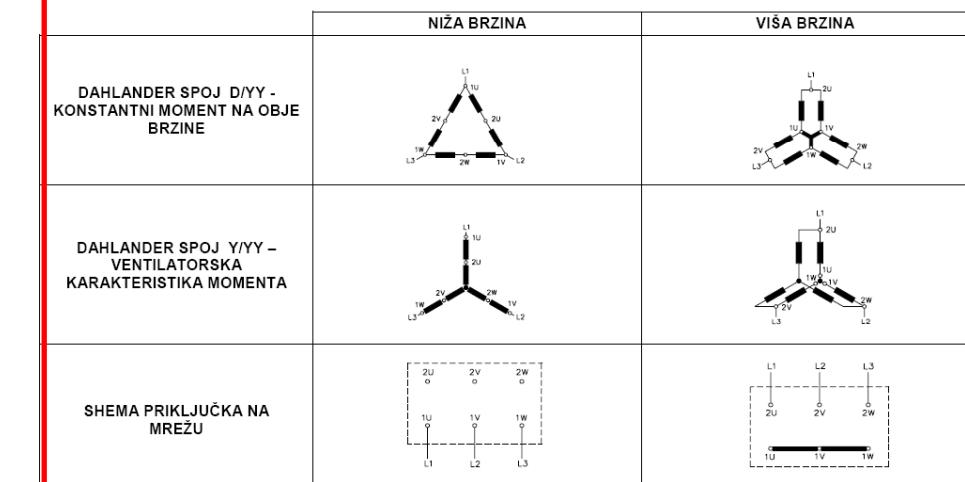
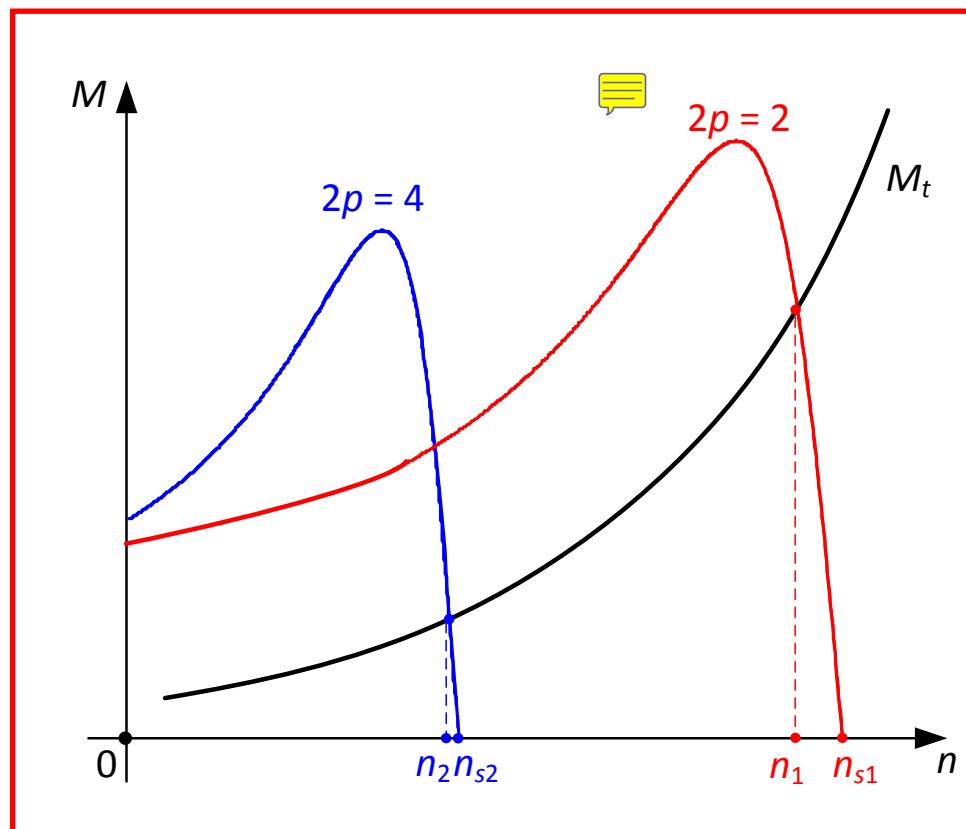


Regulirati brzinu vrtnje znači mijenjati momentnu karakteristiku M_m u M'_m tako da njeno sjecište s karakteristikom tereta bude pri željenoj brzini vrtnje n' . Prema slici momentnu karakteristiku M_m smo promijenili tako da smo promijenili sinkronu brzinu vrtnje motora n_s u n'_s mijenjajući frekvenciju struja koje teku kroz namote statora.

$$n_s = \frac{60f_s}{p} \quad n'_s = \frac{60f'_s}{p}$$

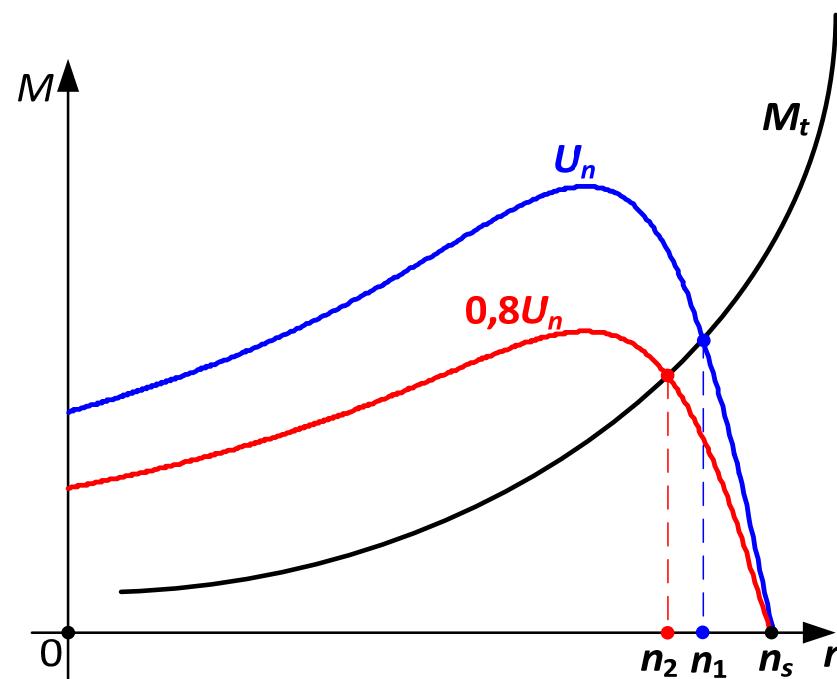
Regulacija brzine vrtnje preklapanjem polova

Preklapanje polova se može ostvariti sa dva ili više galvanski odvojenih namota u motoru ili jednim namotom izvedenim iz dva jednaka dijela koji se prespajaju prema Dahlanderovom principu. Prespajanjem prema Dahlanderu može se dobiti omjer brzina 1:2.



Regulacija brzine vrtnje promjenom narinutog napona

Promjenom napona uz fiksnu frekvenciju momentna karakteristika motora se mijenja prema $M_m = f(U^2)$. Svakom naponu odgovara druga karakteristika, a budući da je karakteristika momenta tereta jedna i zadana vrstom tereta, radna točka će biti određena karakteristikom motora.



Suvremena tehnologija (poluvodička energetska elektronika) omogućava regulaciju napona u vrlo širokim granicama.

Energetski gledano, ovakva regulacija nije optimalna jer su gubici energije neizbjegni.

Regulacija brzine promjenom napona i frekvencije

Brzina vrtnje je direktno proporcionalna frekvenciji

$$n = \frac{60 f_s}{p} (1 - s),$$

ali se u motoru zbog promjene frekvencije događaju i promjene magnetskog toka (indukcija) što utječe na promjene razvijenog momenta.

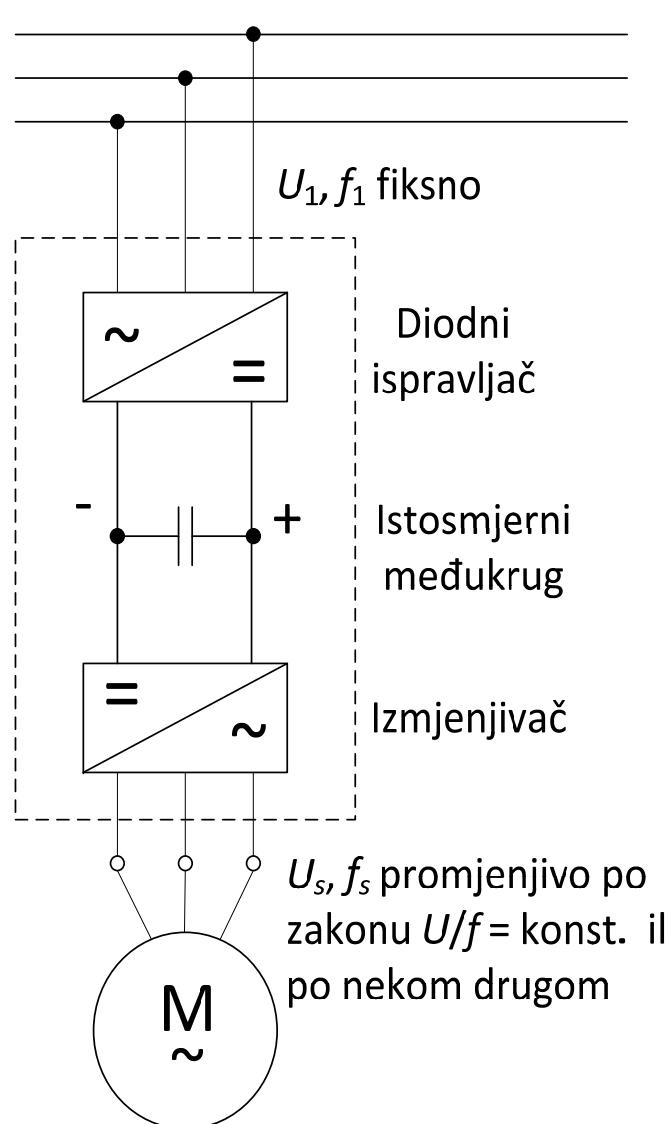
$$U_s \approx E_s = 4,44 N f_s \underbrace{BS}_{\Phi}$$

Promjenimo li frekvenciju f_s ne mijenjajući napon, doći će do promjene indukcije B odnosno magnetskog toka Φ . Povećanje B nije dozvoljeno zbog zasićenja magnetskog kruga, a smanjenjem Φ (pri povećanju f_s) smanjuje se moment motora što opet nije dozvoljeno. Zbog toga se regulira po zakonu

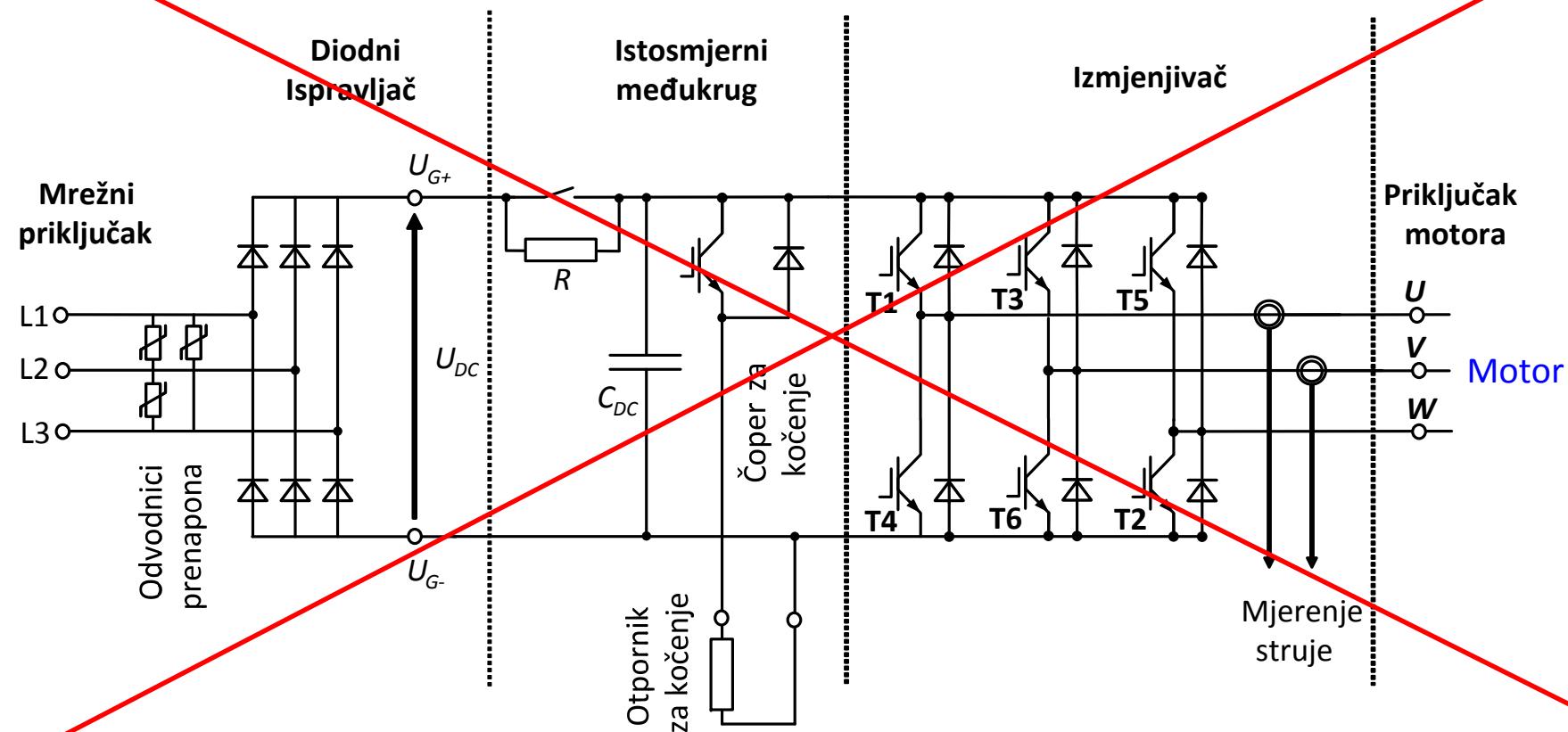
$$\frac{U_s}{f_s} \approx \frac{E_s}{f_s} = \text{konst.}$$



Principna shema spoja asinkronog motora i elektroničkog energetskog pretvarača na izmjeničnu mrežu

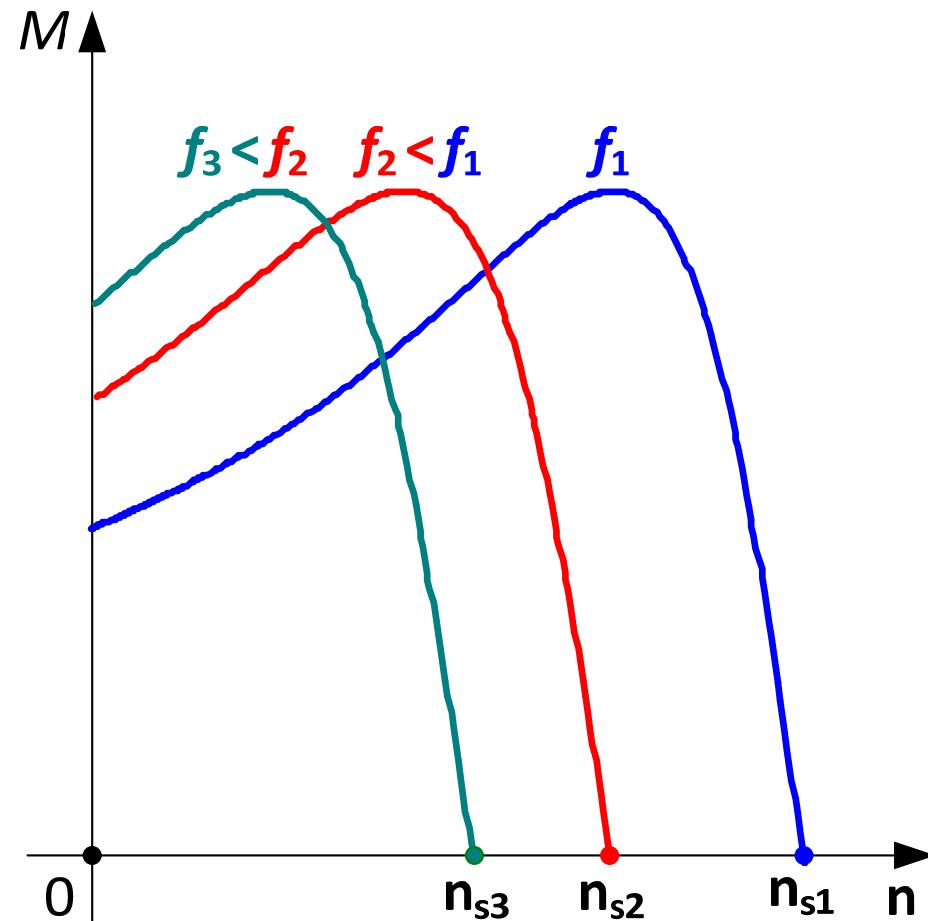


Tipična struktura pretvarača za asinkroni motor

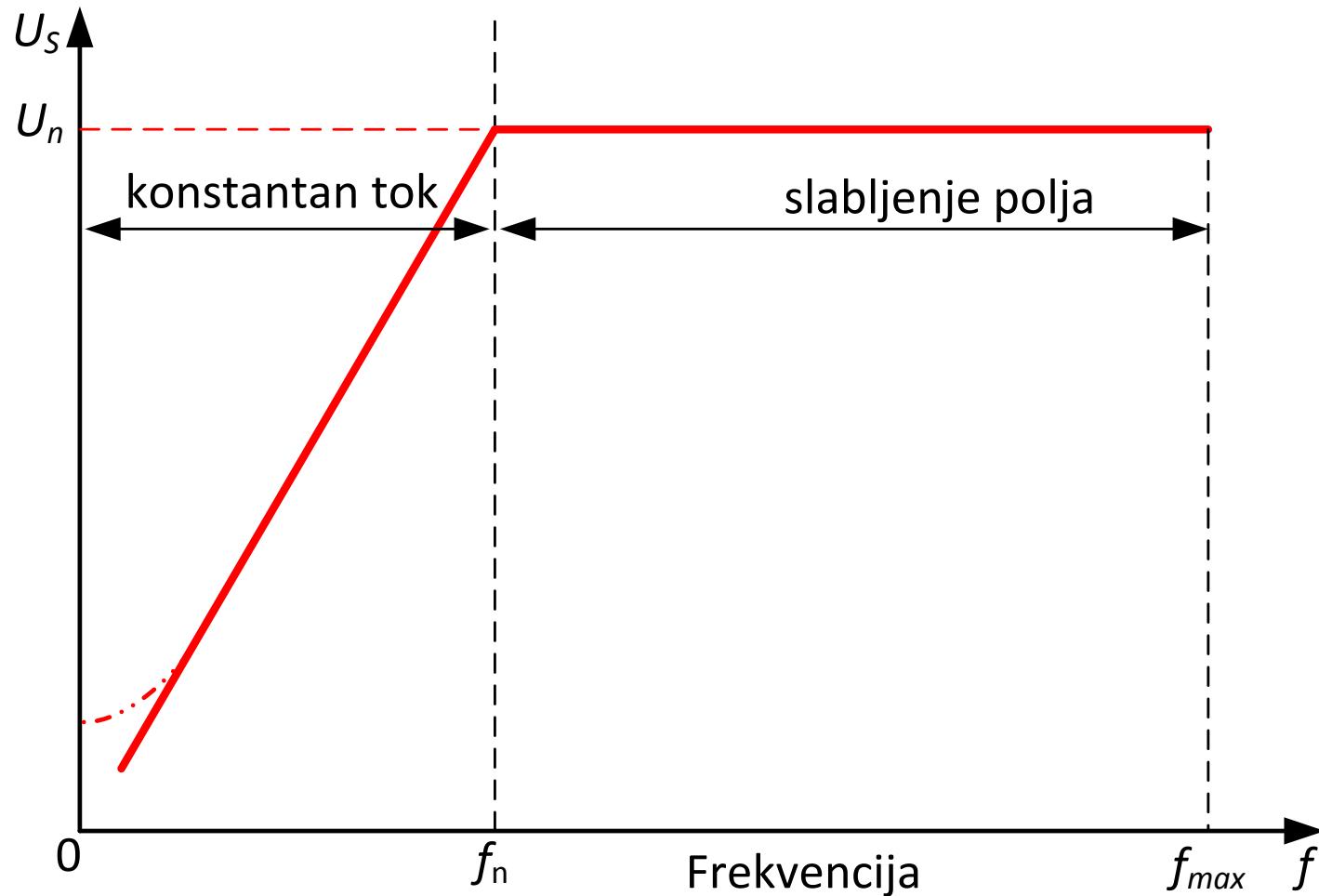


Skalarna regulacija

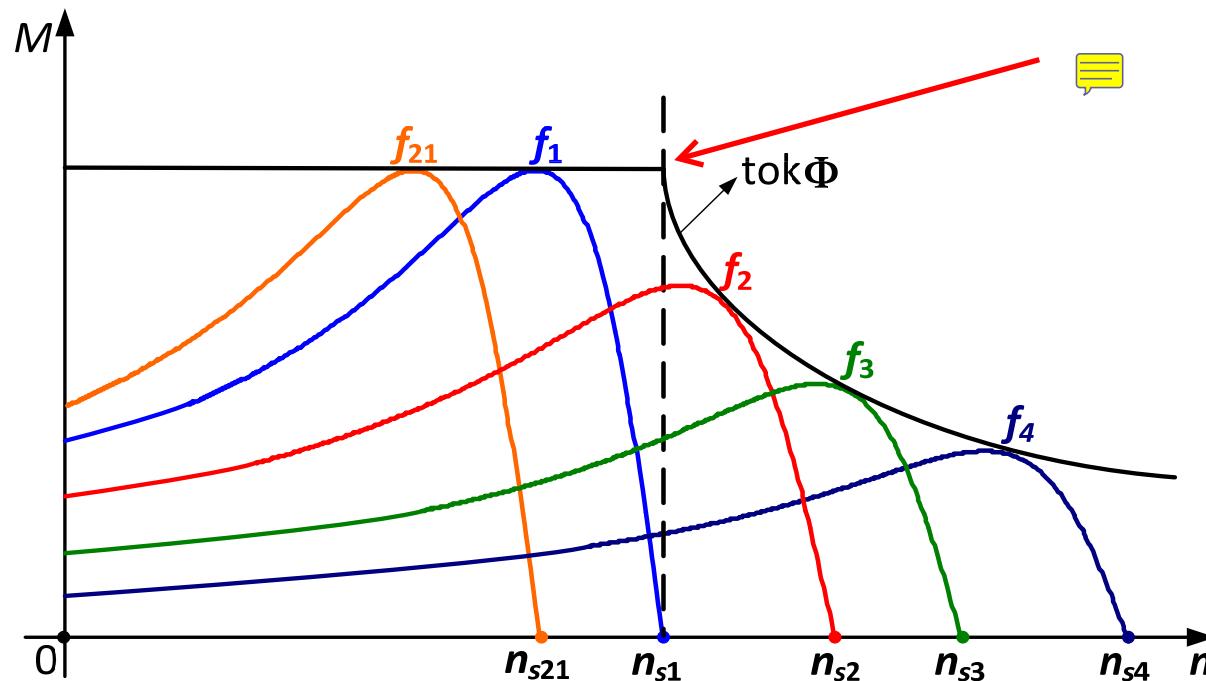
Istovremeno treba mijenjati napon i frekvenciju. Pri takvoj promjeni, koja se zove **skalarna regulacija**, momentne karakteristike izgledaju prema slici.



Promjena napona i frekvencije pri skalarnoj regulaciji asinkronog motora



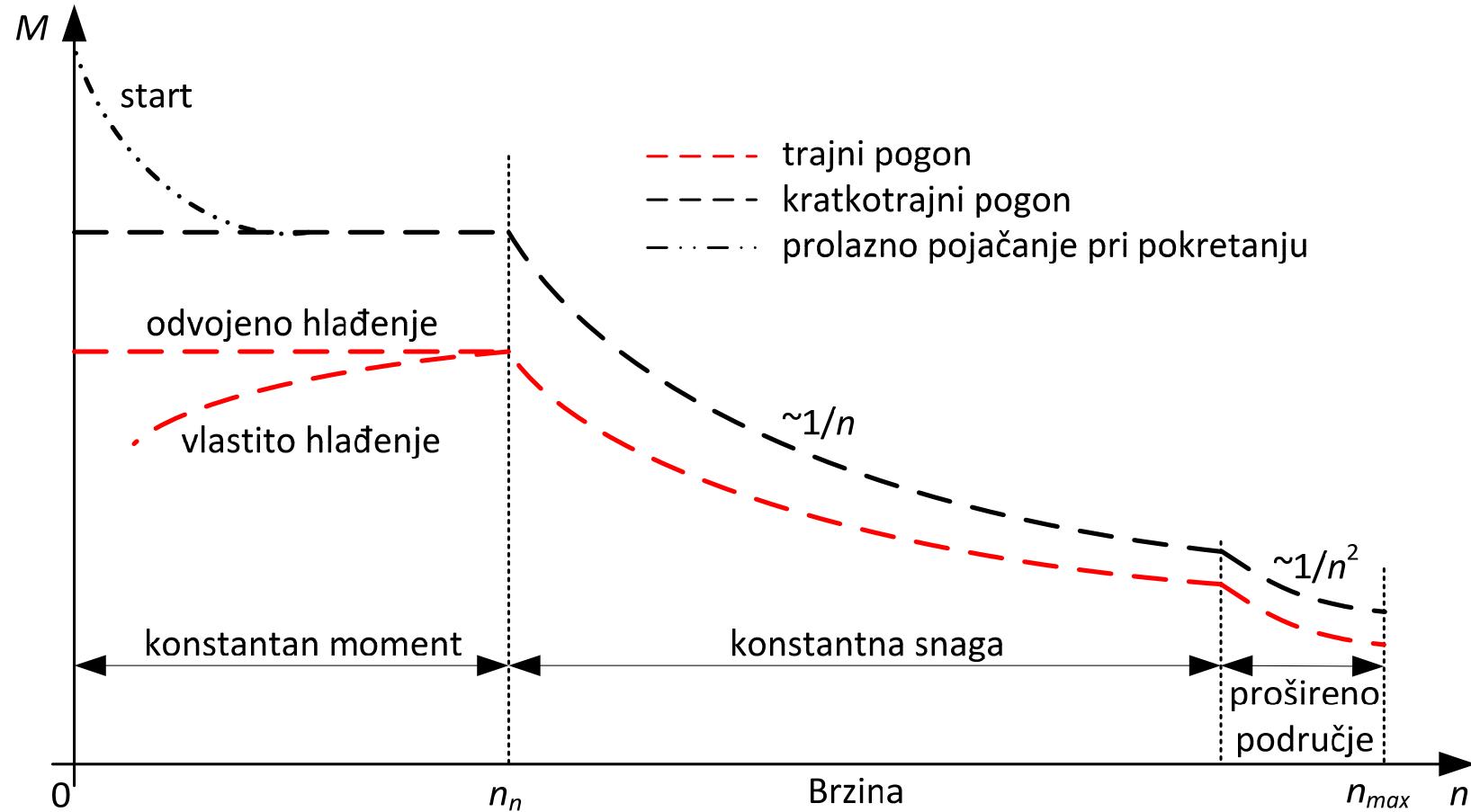
Momentne karakteristike pri skalarnoj regulaciji asinkronog motora



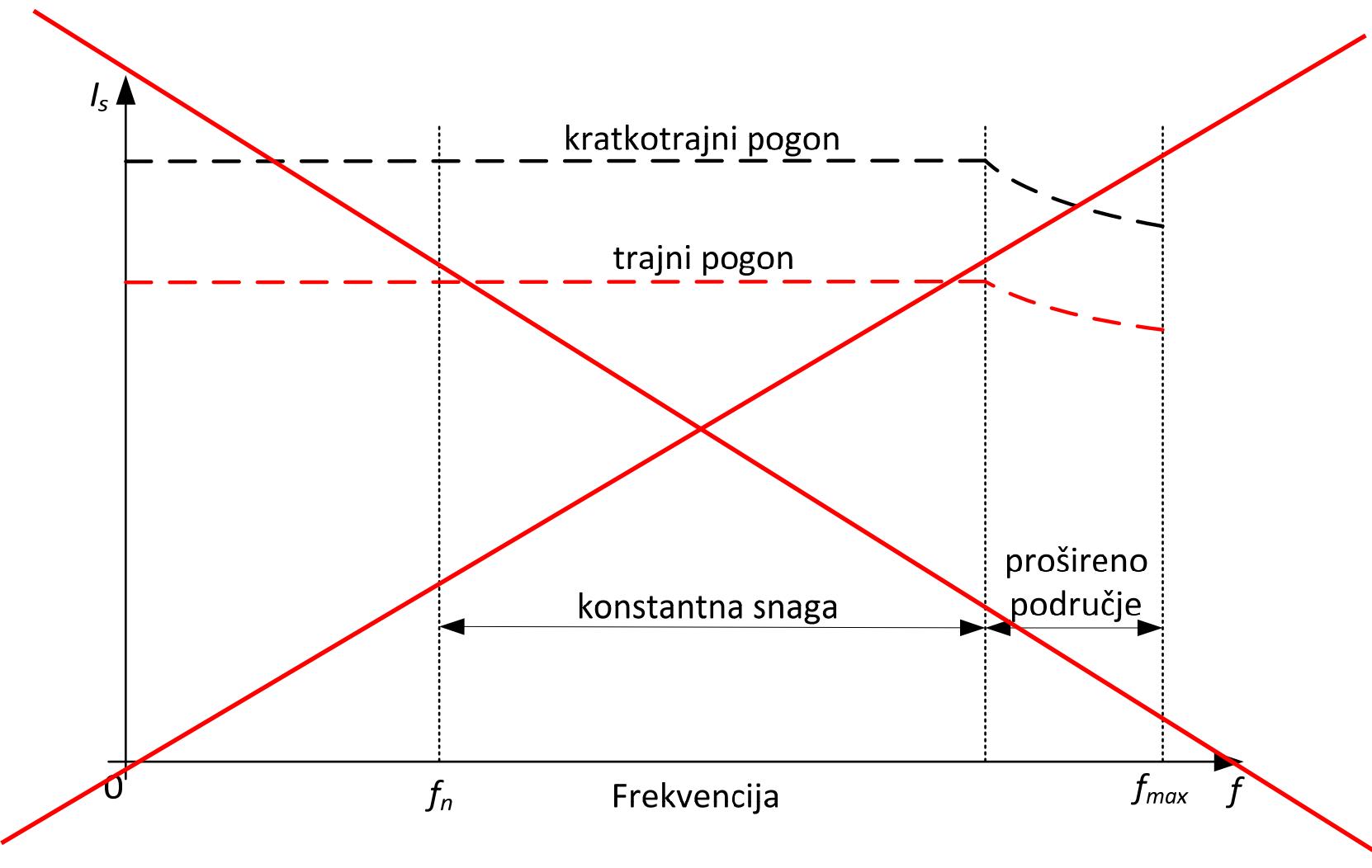
Frekvencija f_1 je osnovna frekvencija za koju je građen motor. Smanjivanje frekvencije f_1 daje karakteristiku $U_{21}/f_{21}=\text{konst.}$, tj. smanjeni su napon i frekvencija u odnosu na $U_1/f_1 = \text{konst.}$

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

Ovisnost momenta motora o frekvenciji i načinu hlađenja pri skalarnoj regulaciji



Dozvoljene veličine struje pri kratkotrajnom i trajnom pogonu reguliranog motora



Regulirani ili neregulirani elektromotorni pogon?

Osnovna zadaća reguliranog EMP-a je upravljanje tokom energije koja ide iz mreže (izvora) u proces i obratno.

Regulirati se može brzina, moment ili pozicija.

Zašto odabratи regulirani pogon ili zamijeniti postojeći neregulirani reguliranim?

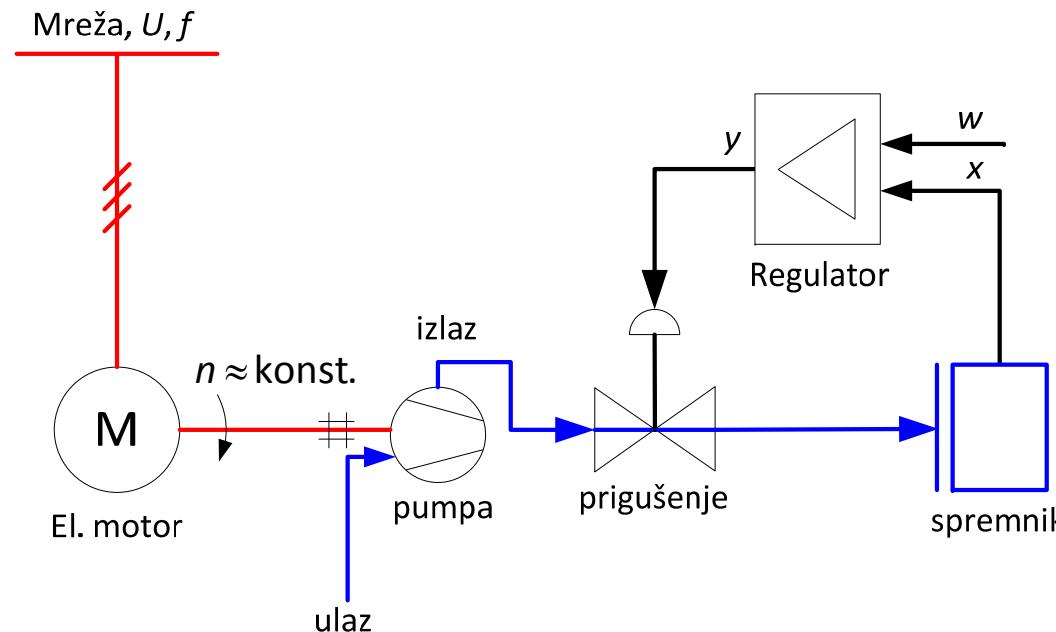
- Zbog zahtjeva tehnološkog procesa (automatizacija,..),
- Zbog zaštite mreže, motora i radnih mehanizama,
- Zbog smanjenja potrošnje (ušteda) električne energije.

Regulacija pogona zbog ušteda energije

- Najveće uštede električne energije mogu se postići reguliranim pogonom centrifugalnih pumpi, ventilatora i kompresora koji su **podopterećeni** u normalnom pogonskom stanju i koji su godišnje relativno dugo vremena u pogonu.
- U tehnički razvijenom svijetu prevladava tendencija primjene novih reguliranih pogona i zamjena postojećih nereguliranih reguliranim.

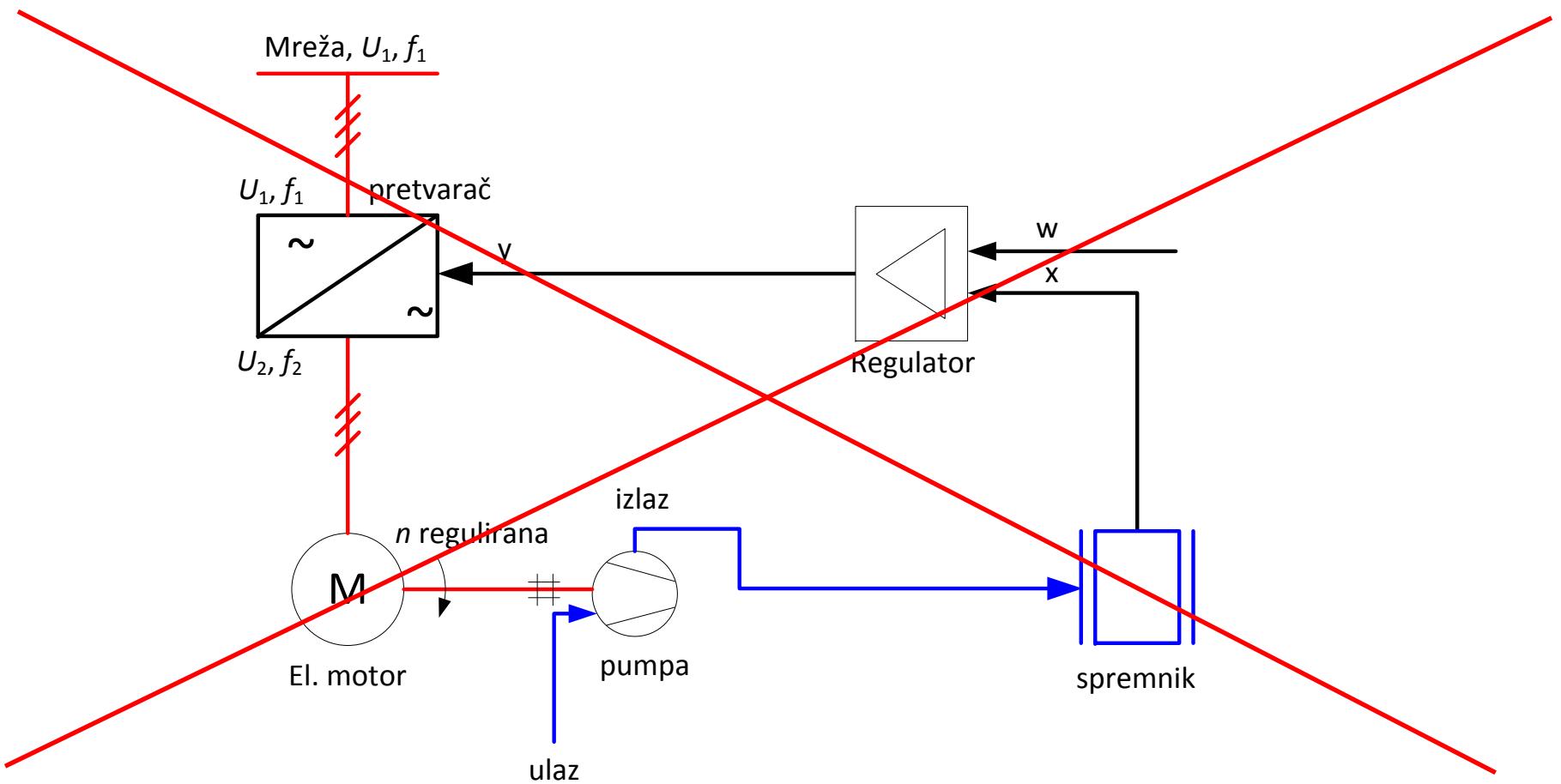
Regulacija protoka nekog medija

U nereguliranim elektromotornim pogonima protok medija Q (m^3/s) se može regulirati nekim od načina prigušenja prema sl. 1, a u reguliranim prema sl. 2 tako da se brzinom vrtnje motora regulira brzina vrtnje pumpe, o kojoj ovisi veličina protoka i korisnosti pumpe.



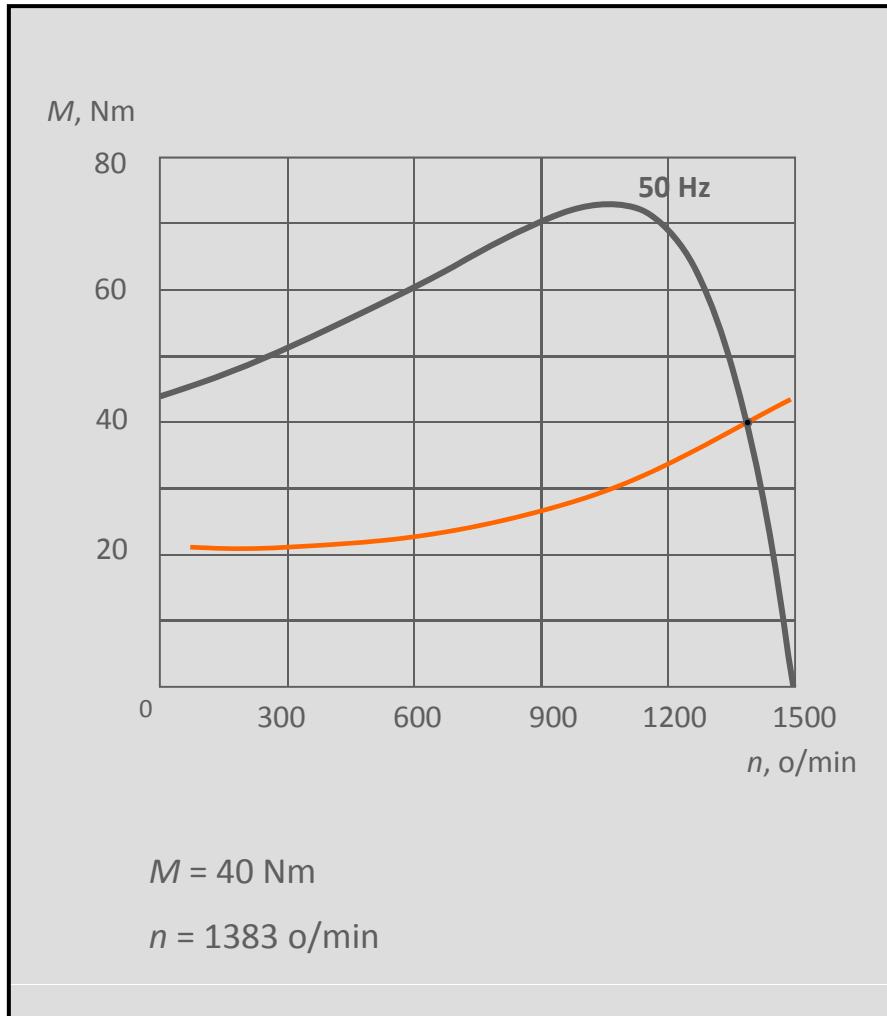
Sl.1. EMP bez mogućnosti regulacije brzine vrtnje elektromotora, protok se regulira prigušenjem na ulazu u spremnik medija

Regulacija protoka medija promjenom brzine vrtnje elektromotora i pumpe



Sl. 2. Regulirani elektromotorni pogon, protok se regulira brzinom vrtnje motora odnosno pumpe (zbog ušteda energije)

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



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

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

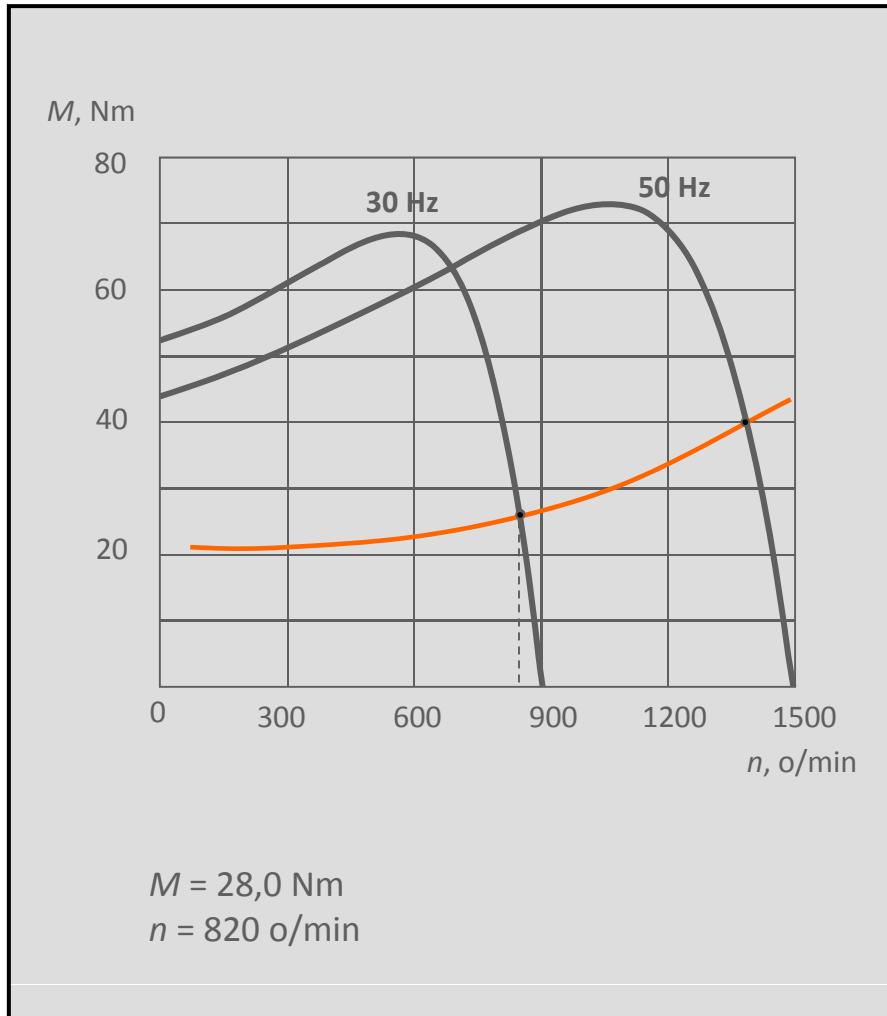
$f = 50 \text{ Hz}$

$f = 30 \text{ Hz}$

$f = 15 \text{ Hz}$

Nastavi prezentaciju

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



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

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

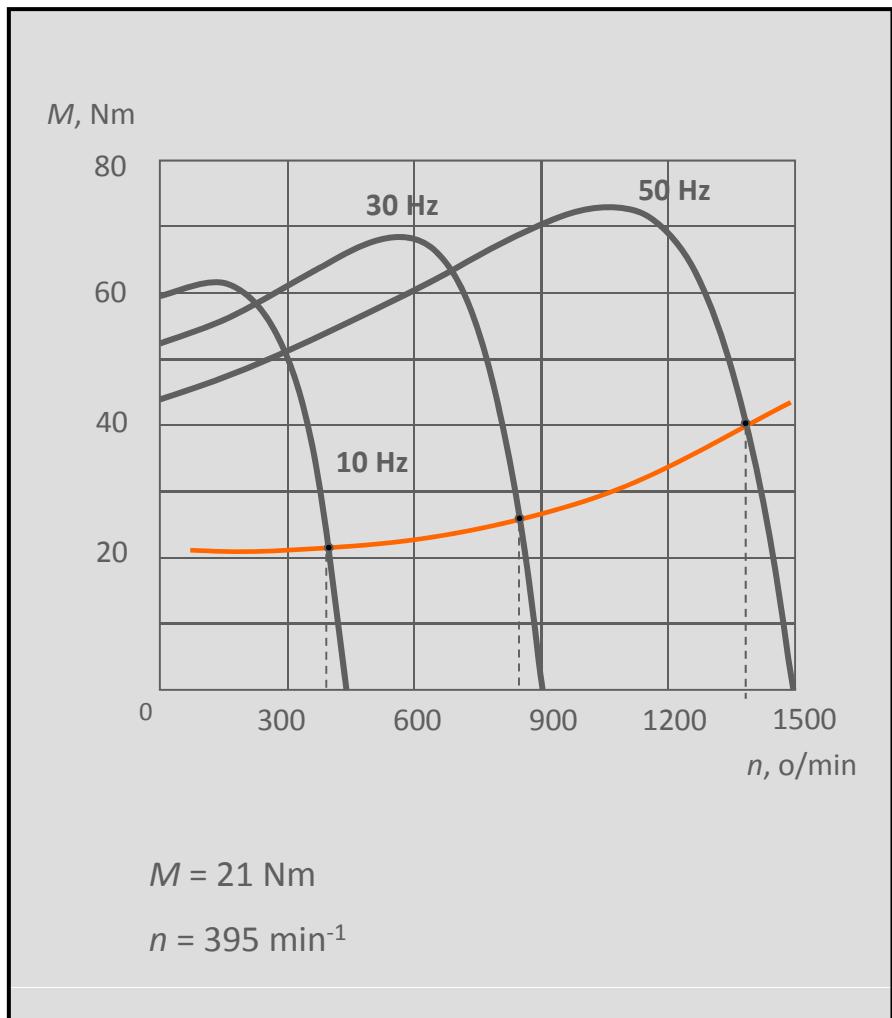
$f = 50 \text{ Hz}$

$f = 30 \text{ Hz}$

$f = 15 \text{ Hz}$

Nastavi prezentaciju

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



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

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

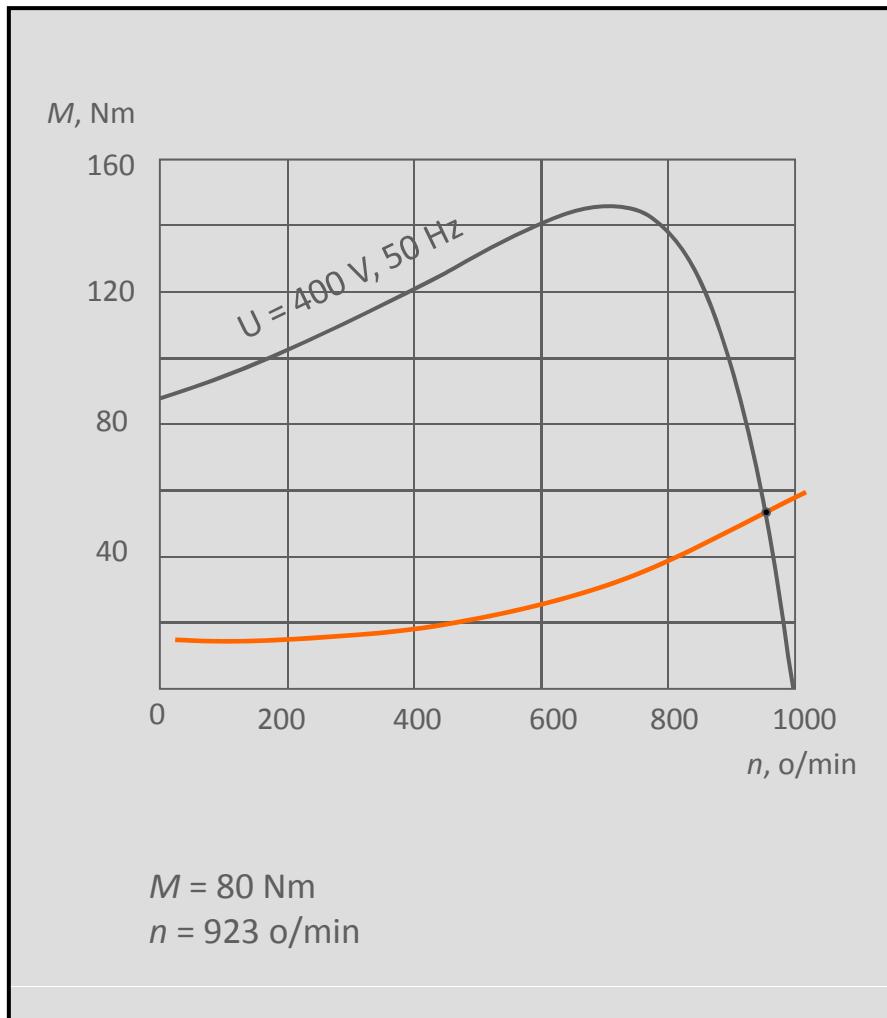
$f = 50 \text{ Hz}$

$f = 30 \text{ Hz}$

$f = 15 \text{ Hz}$

Nastavi prezentaciju

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



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

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

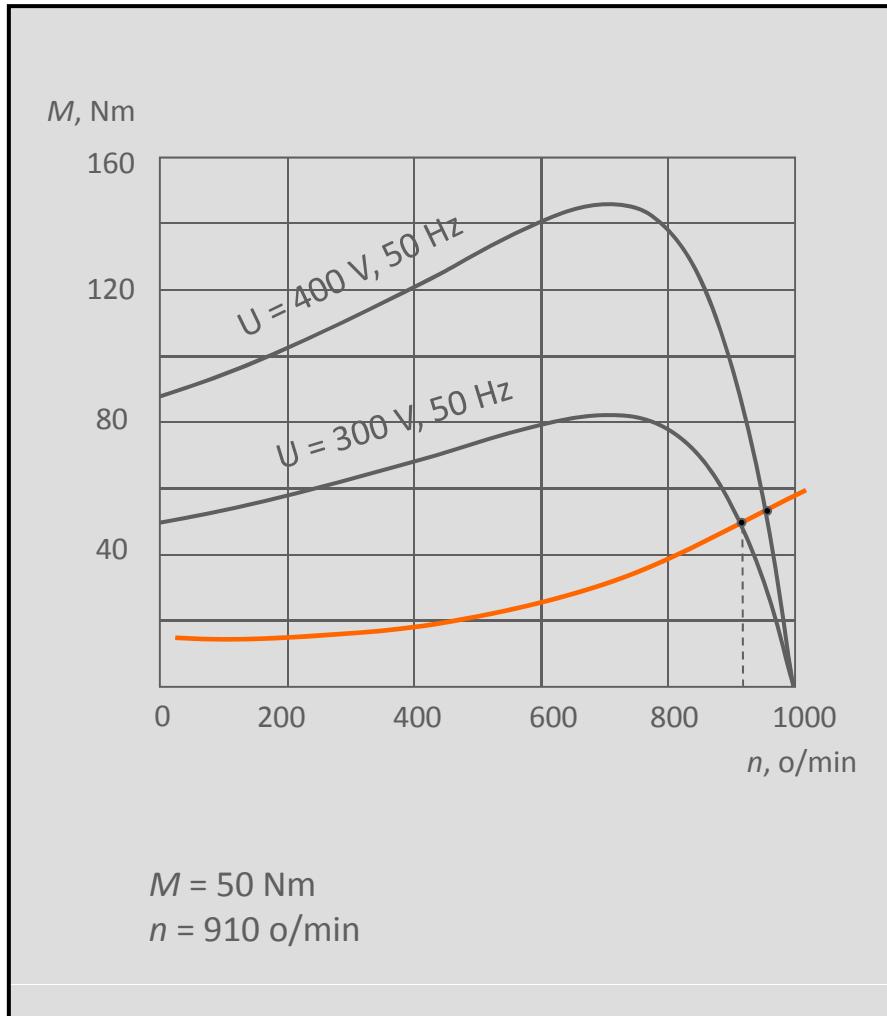
$U = 400 \text{ V}$

$U = 300 \text{ V}$

$U = 200 \text{ V}$

Nastavi prezentaciju

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



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

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

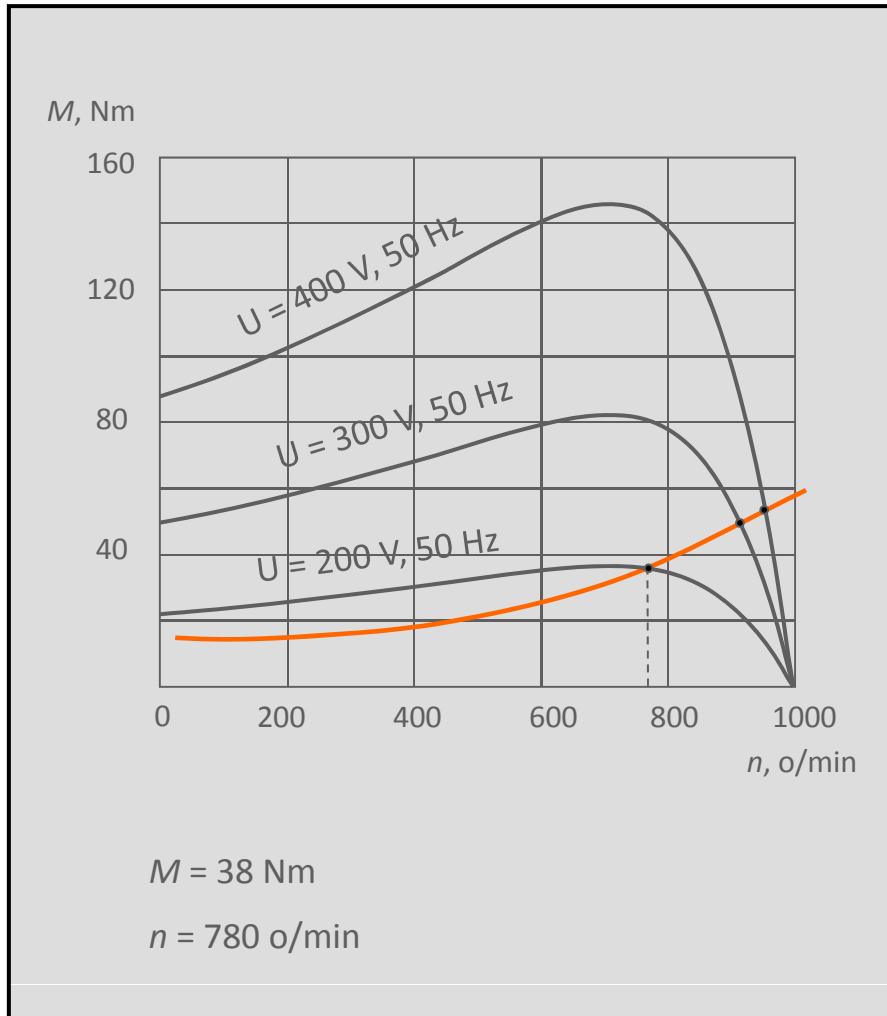
$U = 400 \text{ V}$

$U = 300 \text{ V}$

$U = 200 \text{ V}$

Nastavi prezentaciju

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



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

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

$U = 400 \text{ V}$

$U = 300 \text{ V}$

$U = 200 \text{ V}$

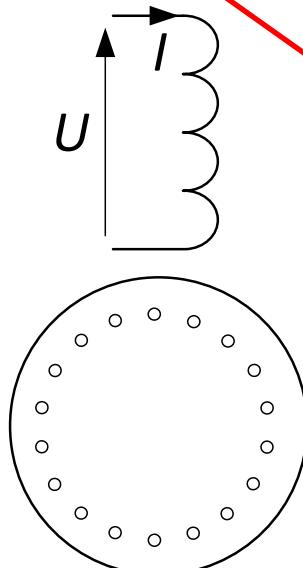
Nastavi prezentaciju



JEDNOFAZNI ASINKRONI MOTOR

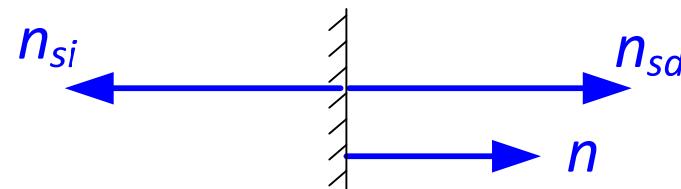
Jednofazni asinkroni motor

To je obično kavezni motor koji ima samo jedan namot na statoru te se priključuje na jednofazni izmjenični namot.



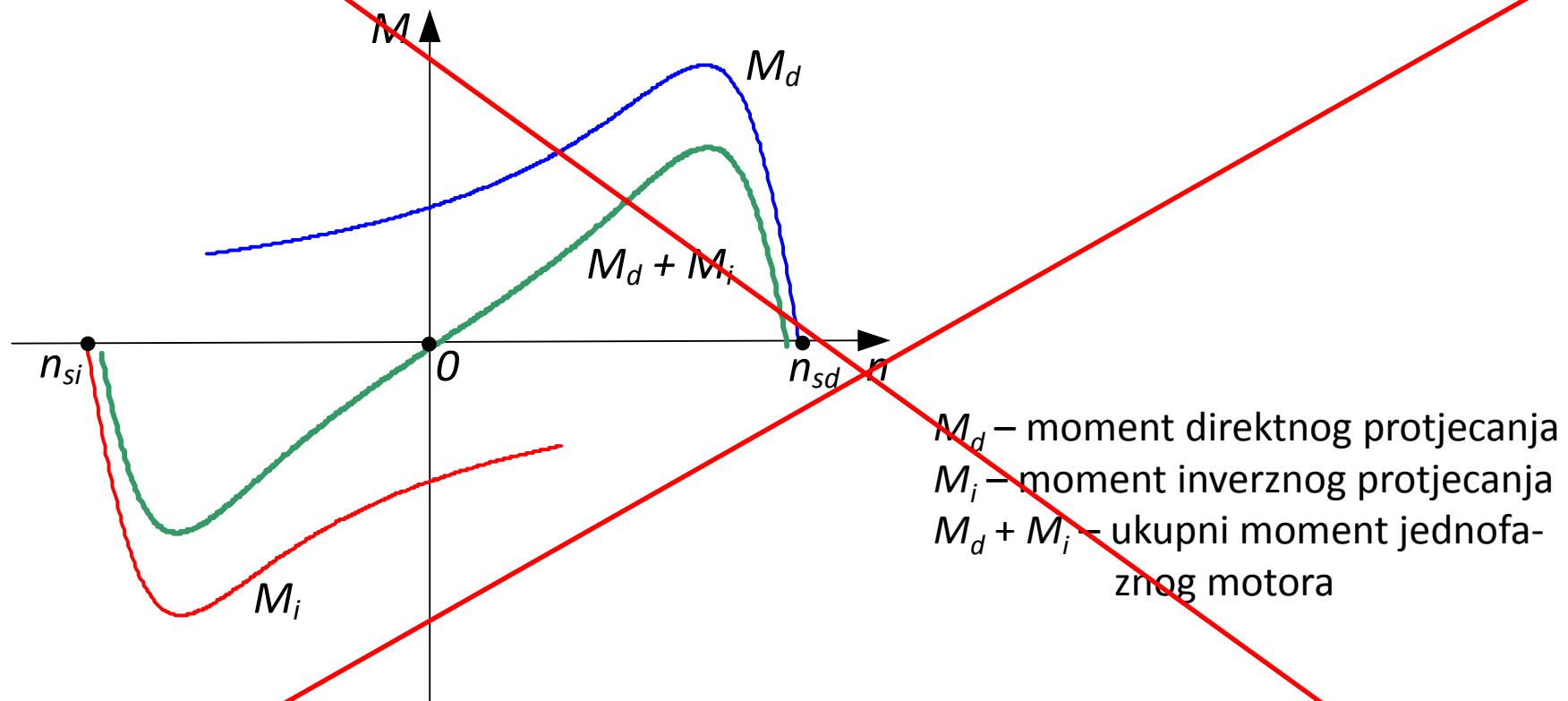
Dok rotor miruje, njegovo je klizanje prema direktnom i inverznom protjecanju stvorenima strujom namota statora jednako $s_d = s_i = 1$.

Okretna protjecanja Θ_d i Θ_i imaju jednake amplitude i brzine vrtnje, ali se vrte u suprotnom smjeru.



Momentna karakteristika jednofaznog asinkronog motora

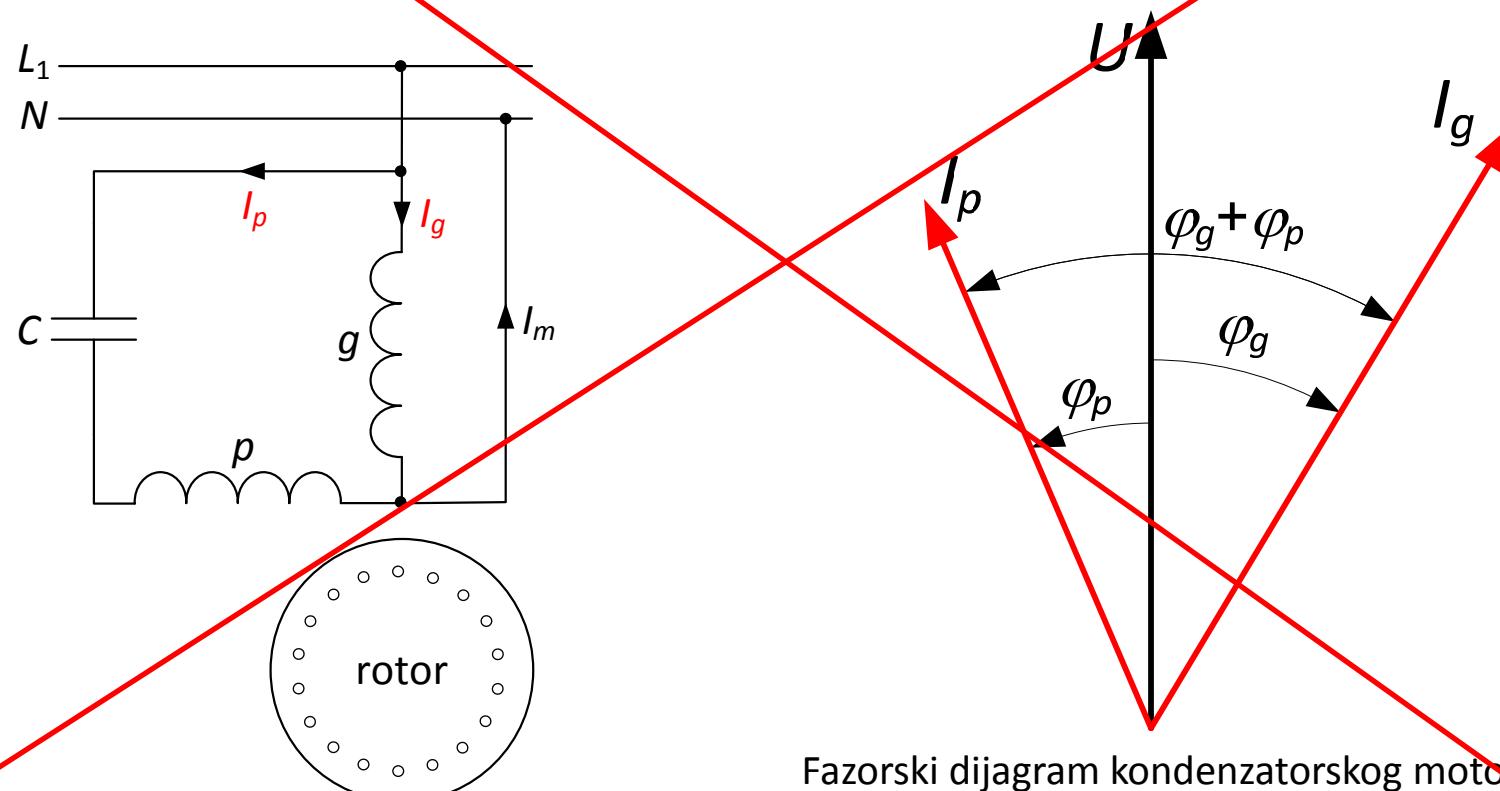
Struje i momenti su jednaki za direktni i inverzni sistem dok rotor miruje ($s=1$), iz čega slijedi da je ukupni moment jednak nuli. **Motor ne može krenuti iz mirovanja!**



Čim se motor pokrene iz mirovanja prevladava jedno okretno polje i motor razvija moment kojim može savladati teret i nastaviti vrtnju.

Jednofazni motor s pomoćnom fazom za zalet

Problem poteznog momenta jednofaznog motora rješava se ugradnjom **pomoćne faze za zalet** koja je prostorno pomaknuta prema tzv. glavnoj fazi za neki kut, a fazni pomaci struja kroz fazne namote ostvaruju se dodavanjem kondenzatora, otpornika ili prigušnice (induktiviteta) u pomoćnu fazu. Tako se dobije jednofazni motor s pomoćnom fazom za zalet simbolički prikazan na slici.



Fazorski dijagram kondenzatorskog motora

Važno je postići što veći fazni pomak struja glavne I_g i pomoćne I_p faze.

~~Reverziranje (promjena smjera vrtnje) motora s pomoćnom fazom~~

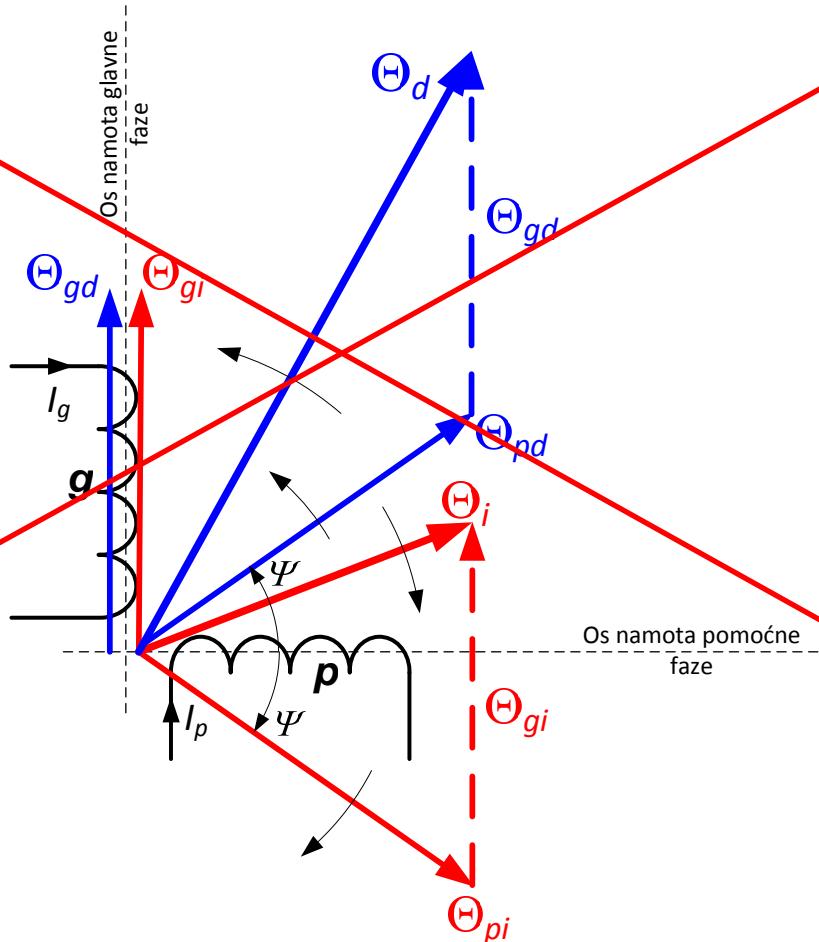
Struja u namotu svake faze stvara svoje pulsirajuće protjecanje koje možemo prikazati s dva okretna protjecanja Θ_d i Θ_i .

Kako znamo iz teorije okretnog polja, os okretnog protjecanja se nalazi u osi namota određene faze u trenutku kada struja tog namota prolazi kroz maksimum, a iznos tog protjecanja je $\Theta_d = \Theta_i = \Theta_1/2$.

Struja u fazi u kojoj je kondenzator je prošla svoj maksimum prije faze u kojoj nije kondenzator za kut $\psi = \varphi_{gl} + \varphi_p$.

Smjer vrtnje i reverziranje motora s pomoćnom fazom

Direktno protjecanje je veće od inverznog pa se rotor vrti u smjeru toga rezultirajućeg protjecanja Θ_d . Rezultantno okretno magnetsko polje vrti se uvijek u smjeru od faze u kojoj struja prethodi naponu prema fazi u kojoj struja zaostaje. Iz toga se može zaključiti i na koji se način može reverzirati kondenzatorski motor.



Spojna shema za reverziranje (promjenu smjera vrtnje) kondenzatorskog motora zamjenom priključaka namota pomoćne faze (*l*-lijevo, *d*-desno)

