

# ASINKRONI STROJEVI I POGONI

*Prof. dr. sc. Drago Ban*



Ak. god. 2009/2010

# Strojevi izmjenične struje

---

**Strojevi izmjenične struje se dijele na:**

**Sinkrone,**

**Asinkrone i**

**Izmjenične kolektorske (komutatorske).**

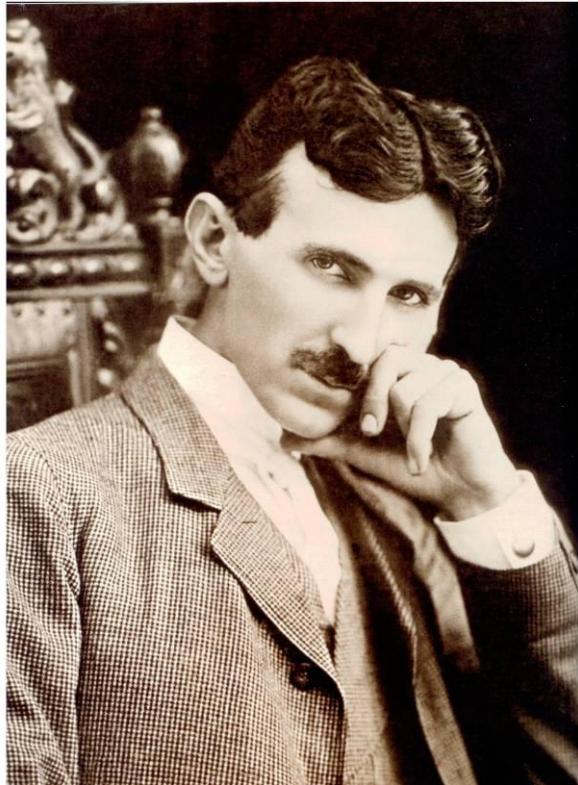
**Nikola Tesla je 1888. god. patentirao i javnosti prikazao svoj novo izumljeni motor (patentno ime, “electro magnetic motor”) u kojemu prvi puta objašnjava stvaranje i primjenu okretnog magnetskog polja.**

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

**Pogledajmo kako to Tesla pokazuje svojim patentom**

# Teslin dvofazni generator i motor, sustav za okretno magnetsko polje

- Dvofazni izmjenični napon Tesla dobiva iz armature istosmjernog generatora koristeći 4 klizna koluta i četkice a dvofazno okretno polje u provrtu torusne jezgre na koju su namotana dva fazna namota međusobno zakrenuta za 90 stupnjeva.



P-34

(No Model.)

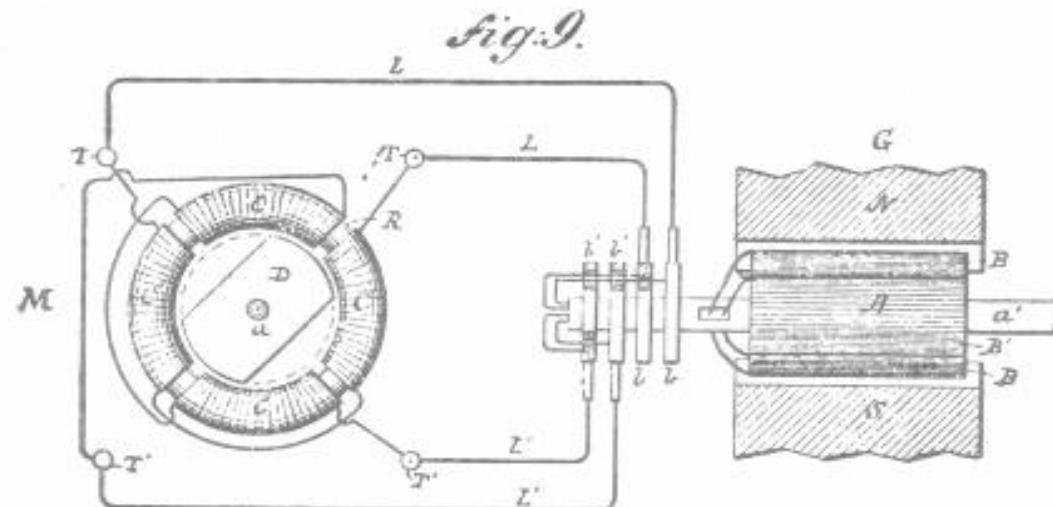
No. 381,968.

N. TESLA.

ELECTRO MAGNETIC MOTOR.

4 Sheets—Sheet 2.

Patented May 1, 1888.



# Teslin dvofazni generator i motor, sustav za okretno magnetsko polje

- Dvofazni izmjenični napon Tesla dobiva iz armature istosmjernog generatora koristeći 4 klizna koluta i četkice a dvofazno okretno polje u provrtu torusne jezgre na koju su namotana dva fazna namota međusobno zakrenuta za 90 stupnjeva.

P-34

(No Model.)

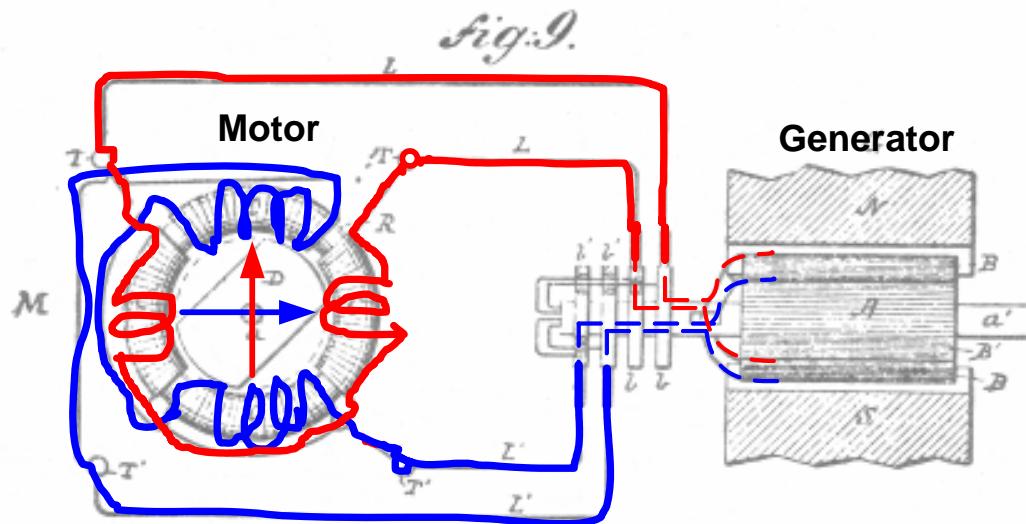
N. TESLA.

4 Sheets—Sheet 2.

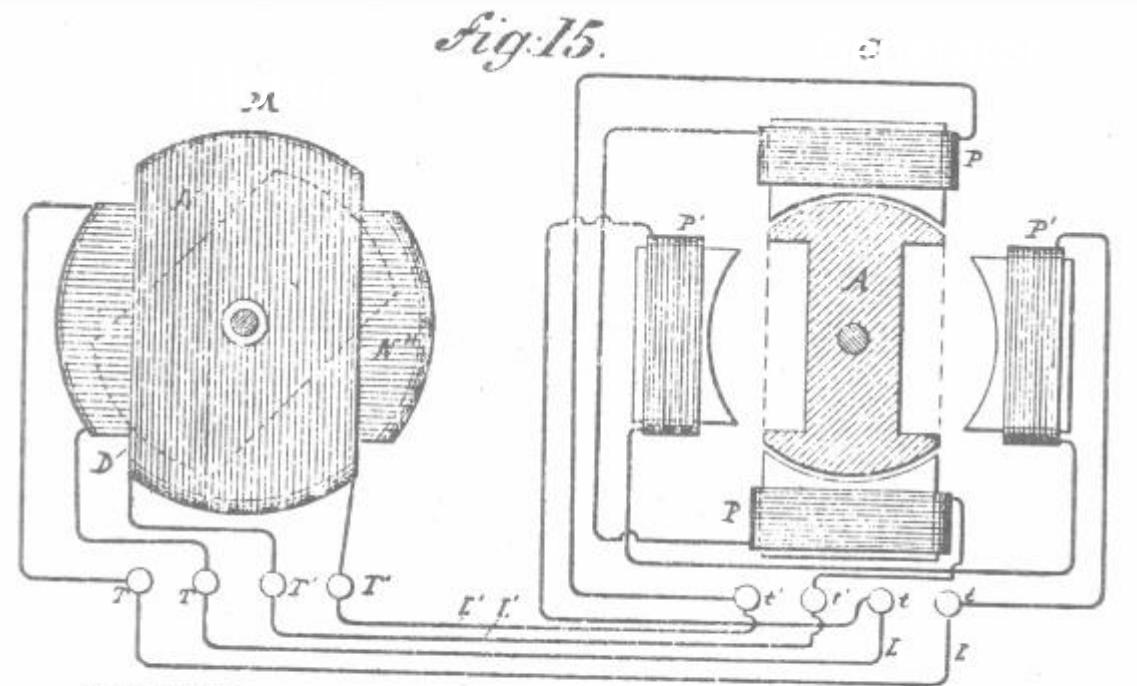
ELECTRO MAGNETIC MOTOR.

No. 381,968.

Patented May 1, 1888.



Dvofazni napon uzima se sa statora a ne s kliznih koluta



WITNESSES:

Frank E. Hartley,  
Frank B. Murphy.

INVENTOR.

N<sup>o</sup> 381968  
BY Nikola Tesla  
Duncan, Curtis & Page  
ATTORNEYS.

Fig. 16.

# Dvofazni sustav generatora i motora prema Tesli

P-36

(No Model.)

N. TESLA.

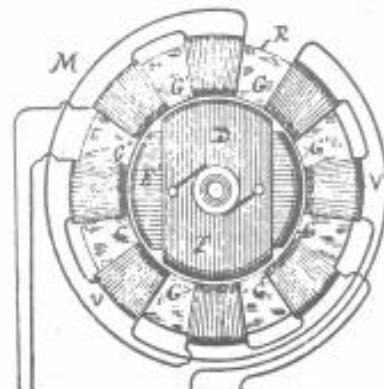
4 Sheets—Sheet 4

ELECTRO MAGNETIC MOTOR.

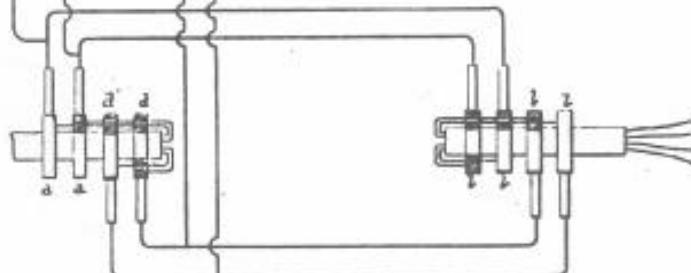
No. 381,968

Patented May 1, 1888.

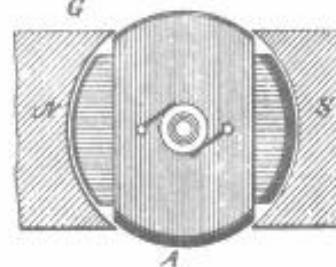
*Fig. 17*



$\omega$   $\omega$   $\omega$



*Fig. 18*



*Fig. 19*

# OKRETNO MAGNETSKO POLJE

---

- 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 pomaknute u fazi 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. Stator sinkronog i asinkronog motora se ne razlikuje, u njemu struje trebaju stvoriti okretno magnetsko polje!
- Tesla se na početku bavio dvofaznim asinkronim i sinkronim motorom jer mu je to bilo najjednostavnije za mogućnosti izrade u njegovom laboratoriju.

Detaljno pogledati u predavanju “mirna pulzirajuća i okretna magnetska protjecanja”.

# Suvremene izvedbe asinkronih strojeva i pogona

---

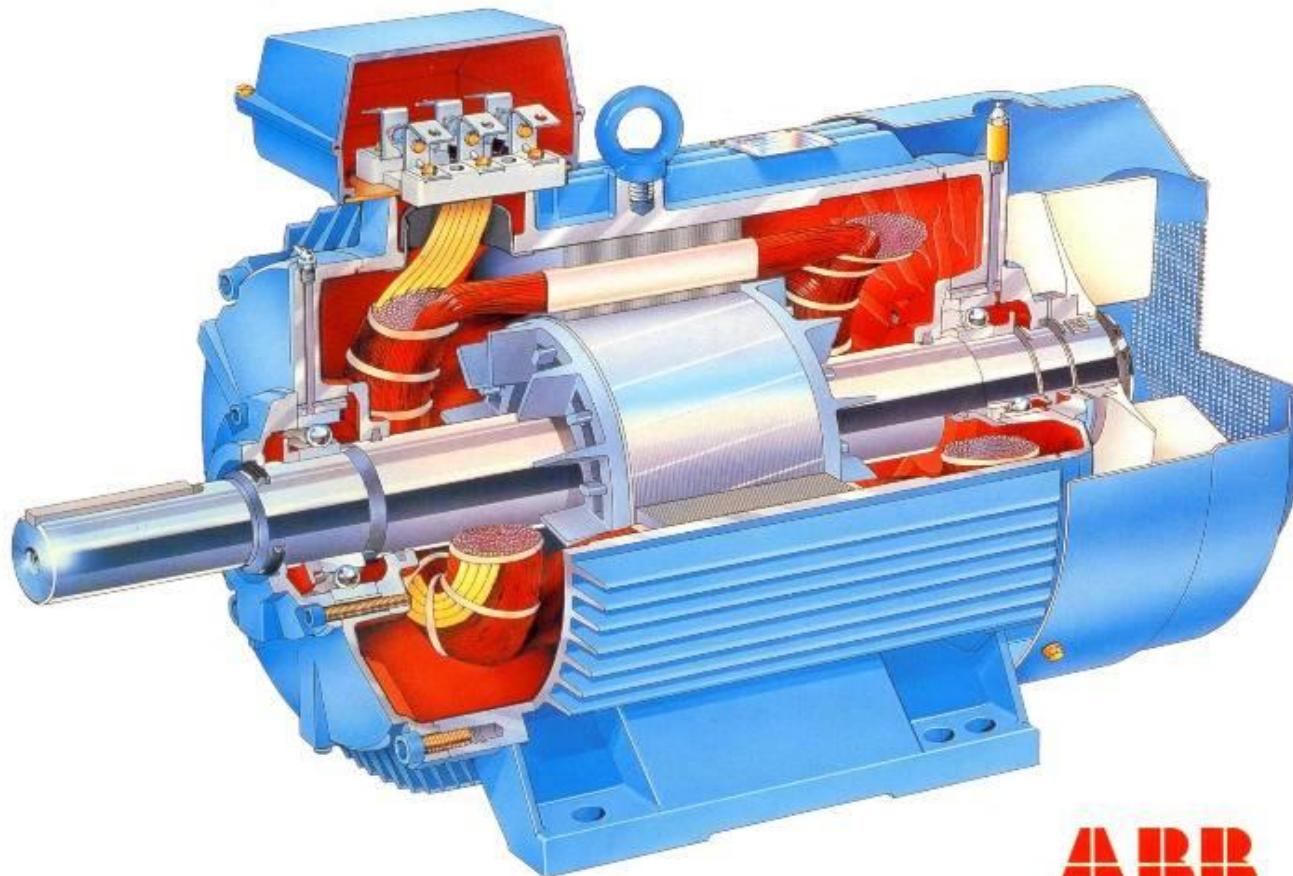
- Današnji asinkroni strojevi se po konstrukciji i tehnologiji bitno razlikuju od strojeva iz vremena Nikole Tesle, Ferarisa i Dobrovoljskog. Princip rada je ostao isti.
- Neke suvremene industrijske izvedbe kompletнog asinkronog stroja ili dijelova su prikazani na slijedećim slajdovima.

# Osnovne podjele asinkronih strojeva

- Prema obliku gibanja se dijele na:  
Rotirajuće (engl.rotating machines) i  
Linearne (engl. linear machines)
- Prema izvedbi rotora:  
Asinkroni strojevi s kaveznim rotorom ( engl. Squirrel-cage rotor induction motors) ;  
Asinkrone strojevi s kliznokolutnim (namotanim) rotorom ( wound rotor induction motors or slipring induction motors);  
Asinkroni strojevi s masivnim rotorom ( massive rotor induction motors).
- Prema broju faza i priključku na izvor napona:  
Trofazne, dvofazne i jednofazne (za male snage)
- Prema veličini nazivnog napona:  
Visokonaponski ( iznad 1000V do 15000 V) i niskonaponski ( do 1000V)
- Prema pretvorbi energije  
Asinkroni motori  
Asinkroni generatori

# Suvremeni asinkroni kavezni motor s aluminijskim kavezom na rotoru

---



**ABB**

**ABB Motors' product development brings you a new, energy efficient motor range!**

## **Cast iron motors**

### **Terminal box**

The spacious terminal box makes the motor quick and easy to connect. The terminal box can be rotated so that cables can be connected from the right or the left.

### **Bearing seal**

A V-ring on the shaft protects the drive-end bearing from dirt and moisture. The inner bearing cover has a felt seal. Degree of protection according to class IP 56 is available as a modification.

### **Bearings**

The 63-series deep-groove ball bearings have a high load capacity and long service life. Same bearing size in D- and N-ends up to frame 280.

### **Lubrication**

The motors have grease valve lubrication for lubrication in service.

### **Bearing seal**

A V-ring on the shaft or a labyrinth seal protects the bearing at the non-drive end from dirt and moisture. The inner bearing cover has a felt seal.

### **Energy saving**

Generous electrical dimensioning gives the motor high efficiency.

### **Low noise level**

The high efficiency of the motor means that a smaller, quieter fan can be used. The plastic fan is furnished with a metal hub.

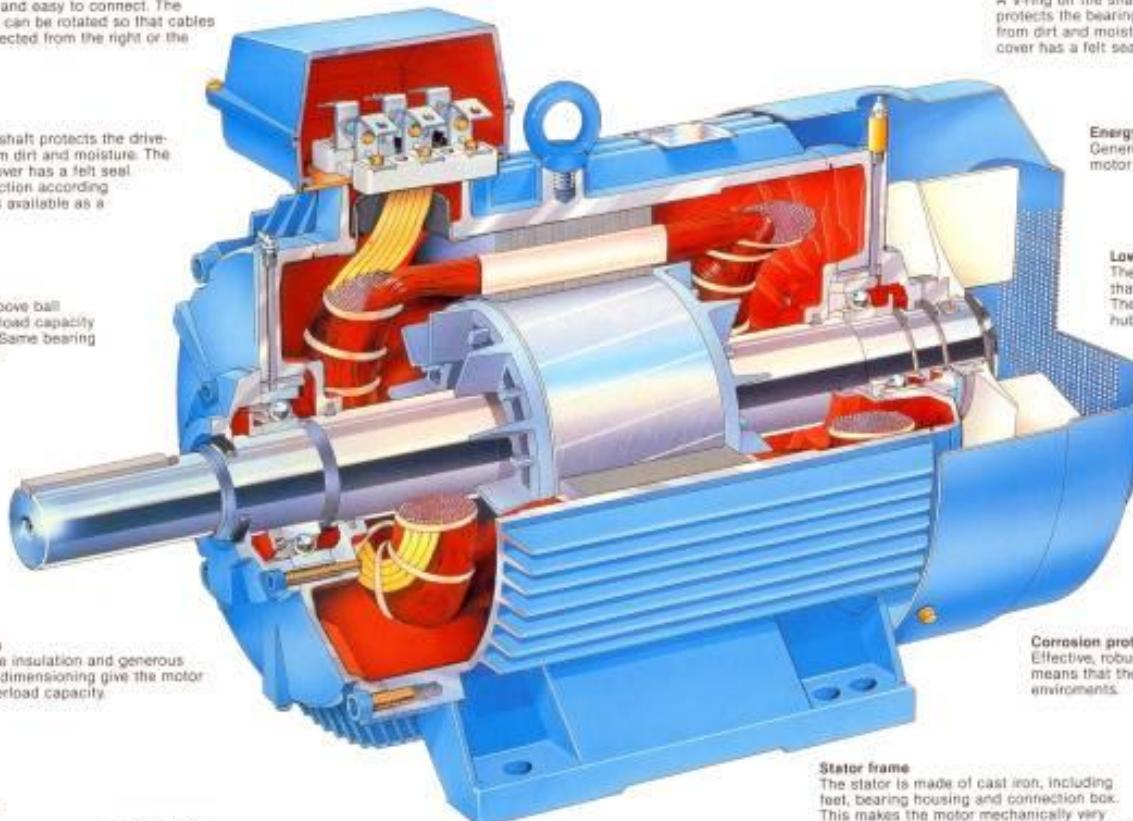


ABB Motors  
Marketing Communications  
P.O.Box 533  
FIN-05101 Vaasa Finland  
tel. +358 10 22 4000  
Fax +358 10 22 47372

**Rotor winding**  
Aluminium rotor winding, pressure die-cast in the rotor slots.

**Stator frame**  
The stator is made of cast iron, including feet, bearing housing and connection box. This makes the motor mechanically very strong and robust. Internally cast feet allow a very rigid mounting and also the vibration is minimal.

**Corrosion protection**  
Effective, robust corrosion protection means that the motor can be used in all environments.

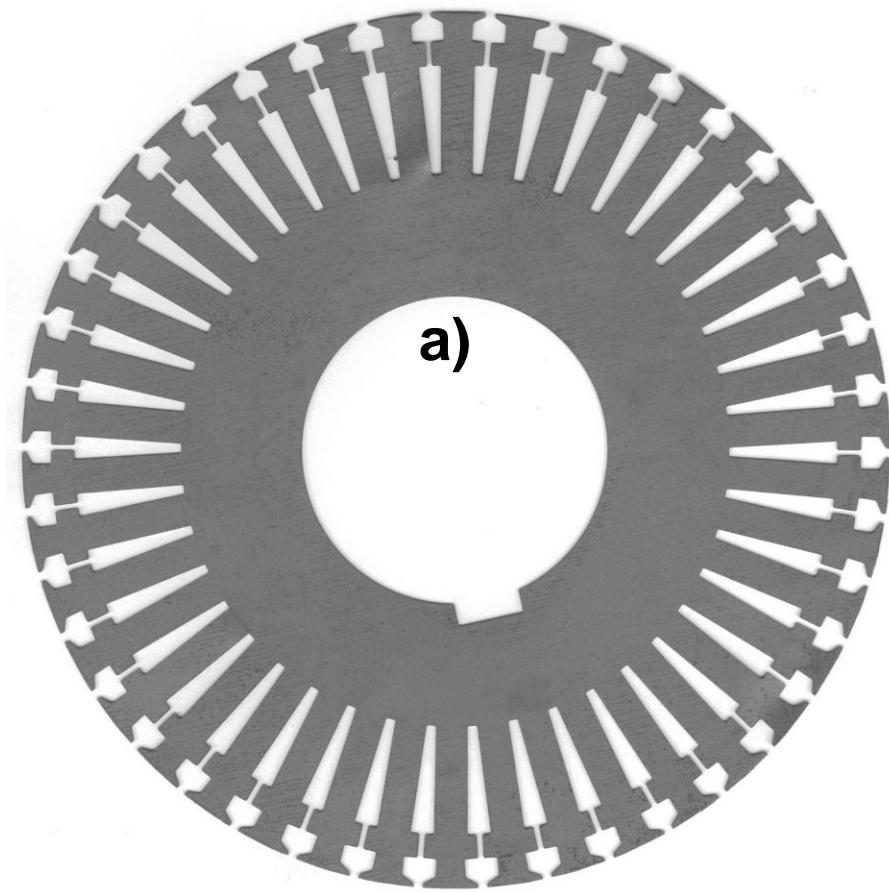
**ABB Motors**

**ABB**

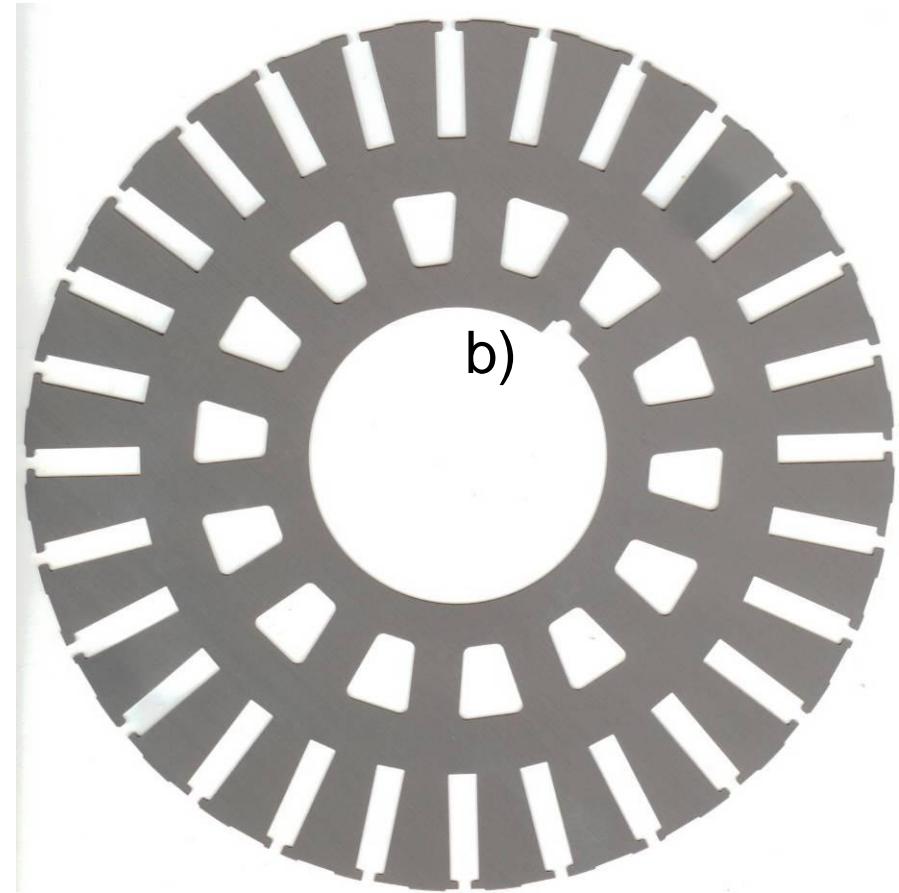
## Rotorski lim asinkronog kaveznog motora

a) aluminijski dvo-kavezni rotor

b) bakreni kavez



a)



b)

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

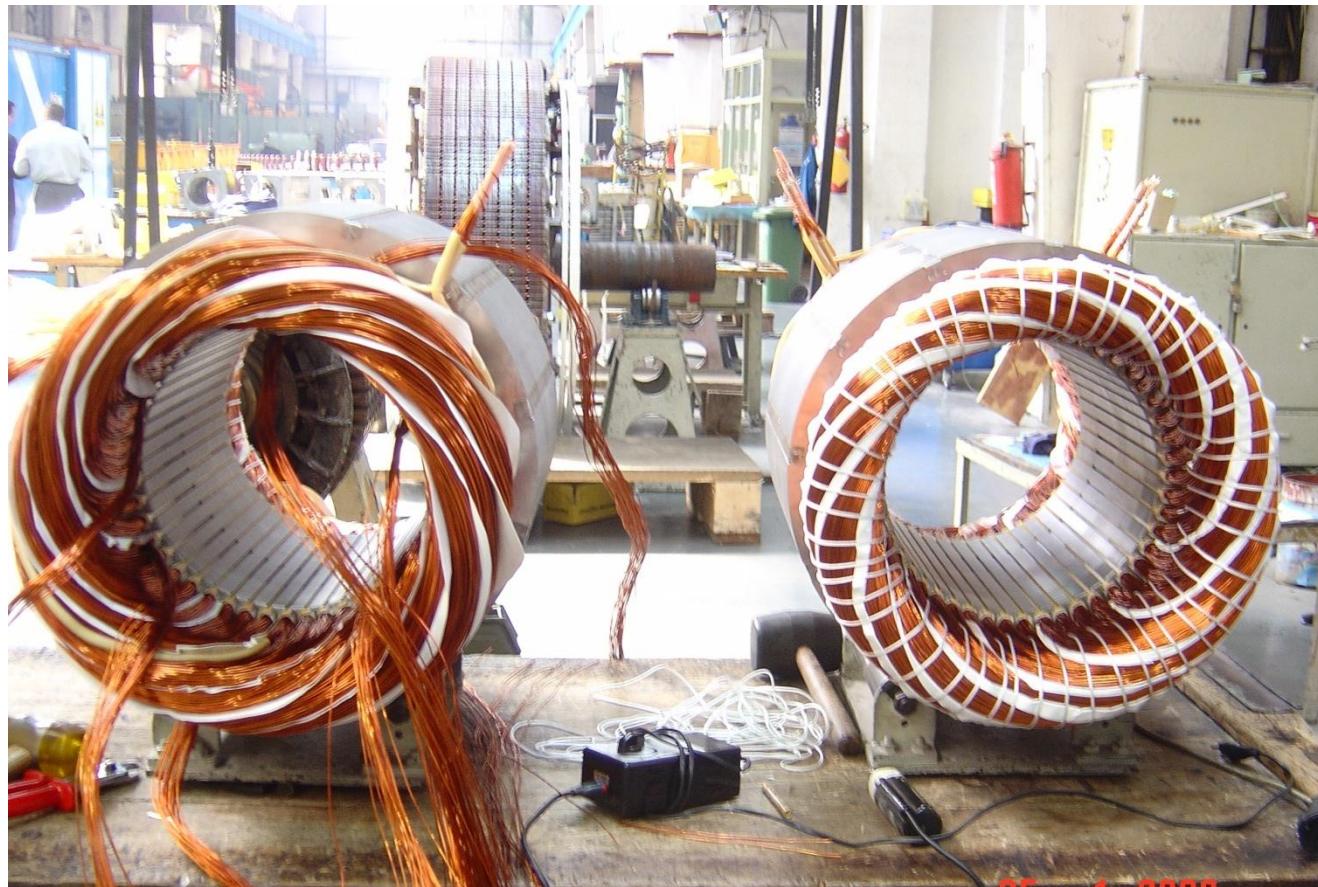


## Stator novog asinkronog motora za visoki napon (6 -10 kV,50 Hz)

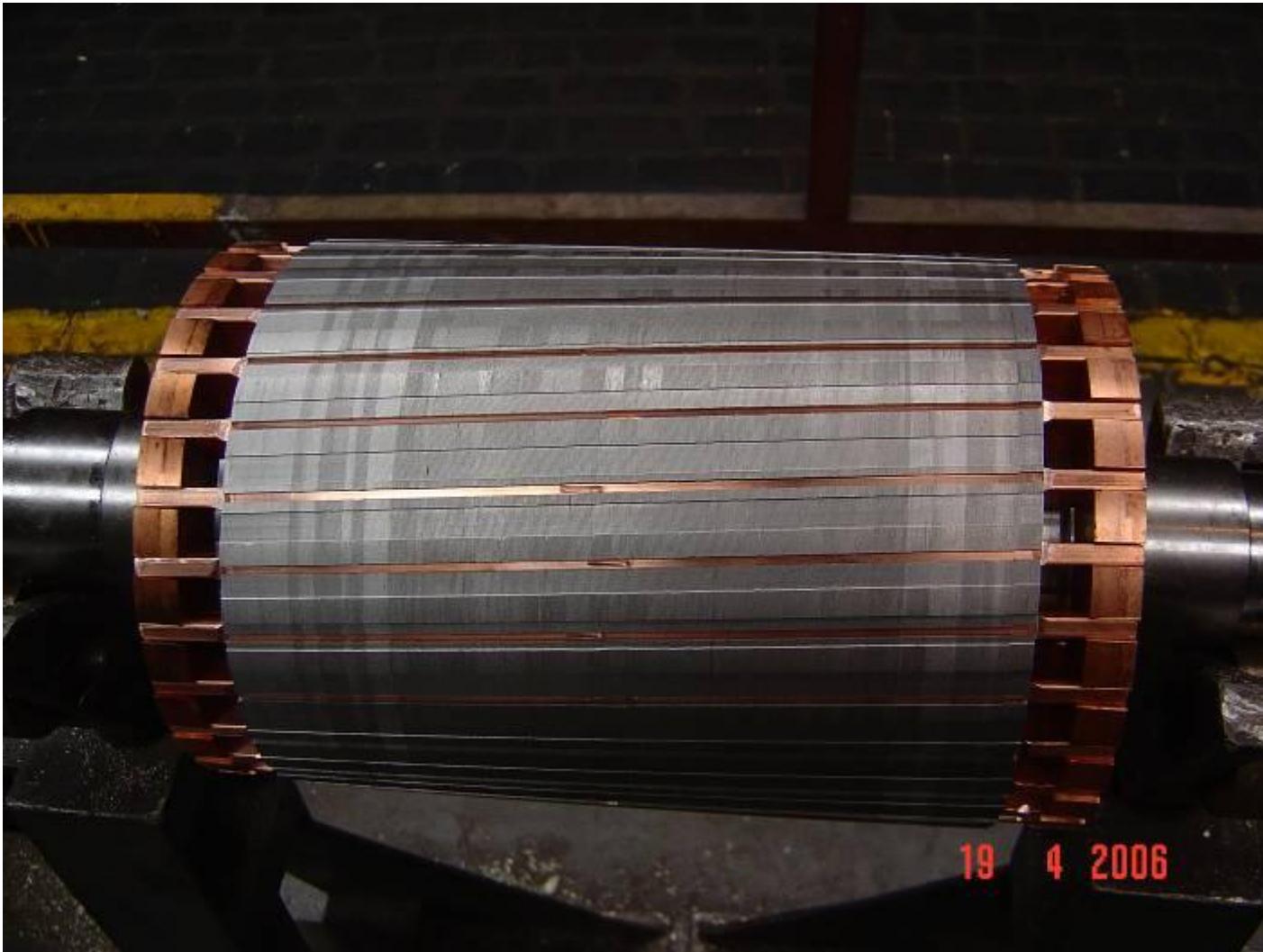


pogled na glave namota i izvode do priključne kutije

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

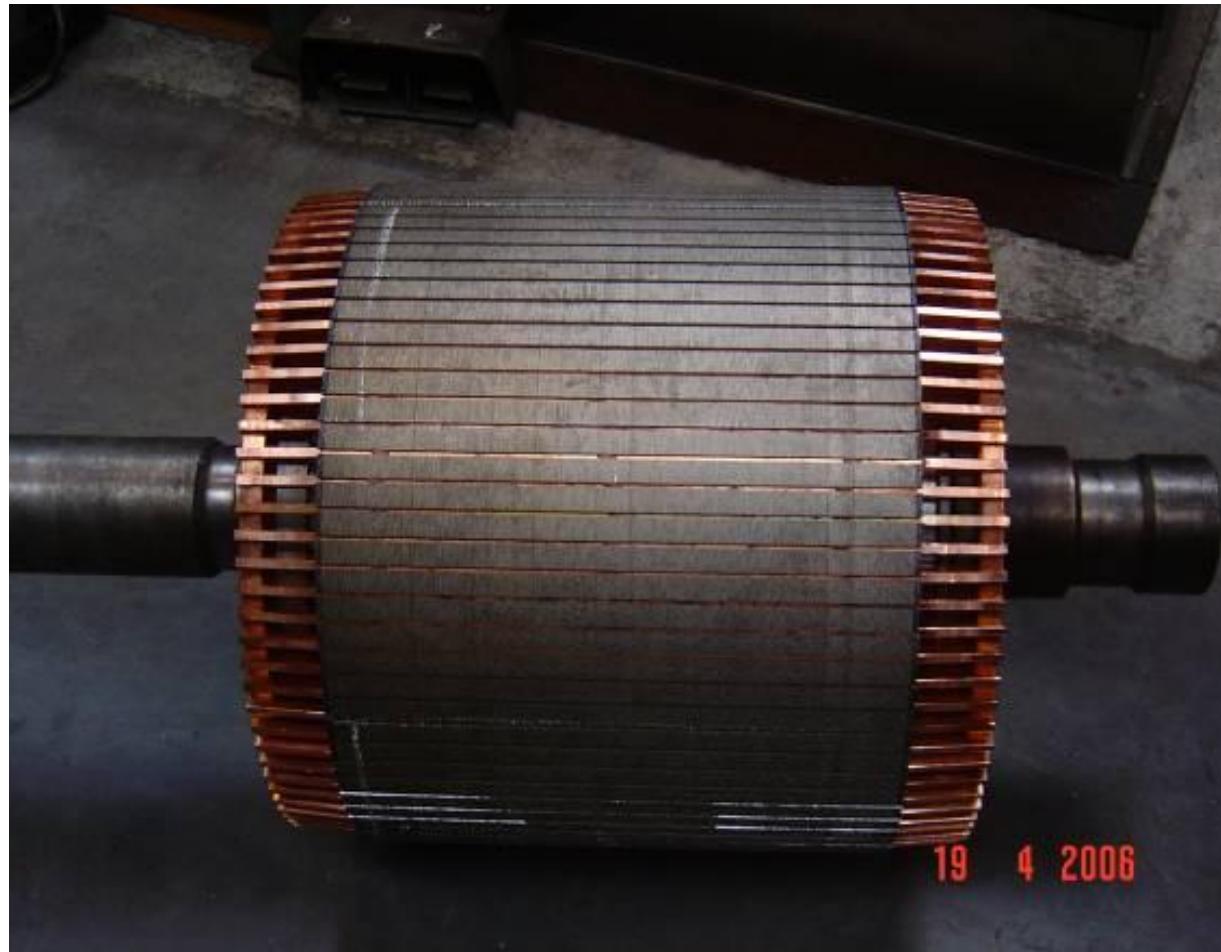


# Kavezni rotor trofaznog asinkronog motora u fazi završne izrade- motor za električnu vuču



# Kavezni rotor trofaznog asinkronog motora opće namjene nakon završne obrade

---



## Rotor trifaznog asinkronog motora s kliznim kolutima

Klizni koluti

29 10 2008



---

# Neke tipične primjene asinkronih strojeva

# Strojarnica u TE-TO Osijek



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



Naftovodni terminal Omišalj

3 11 2006

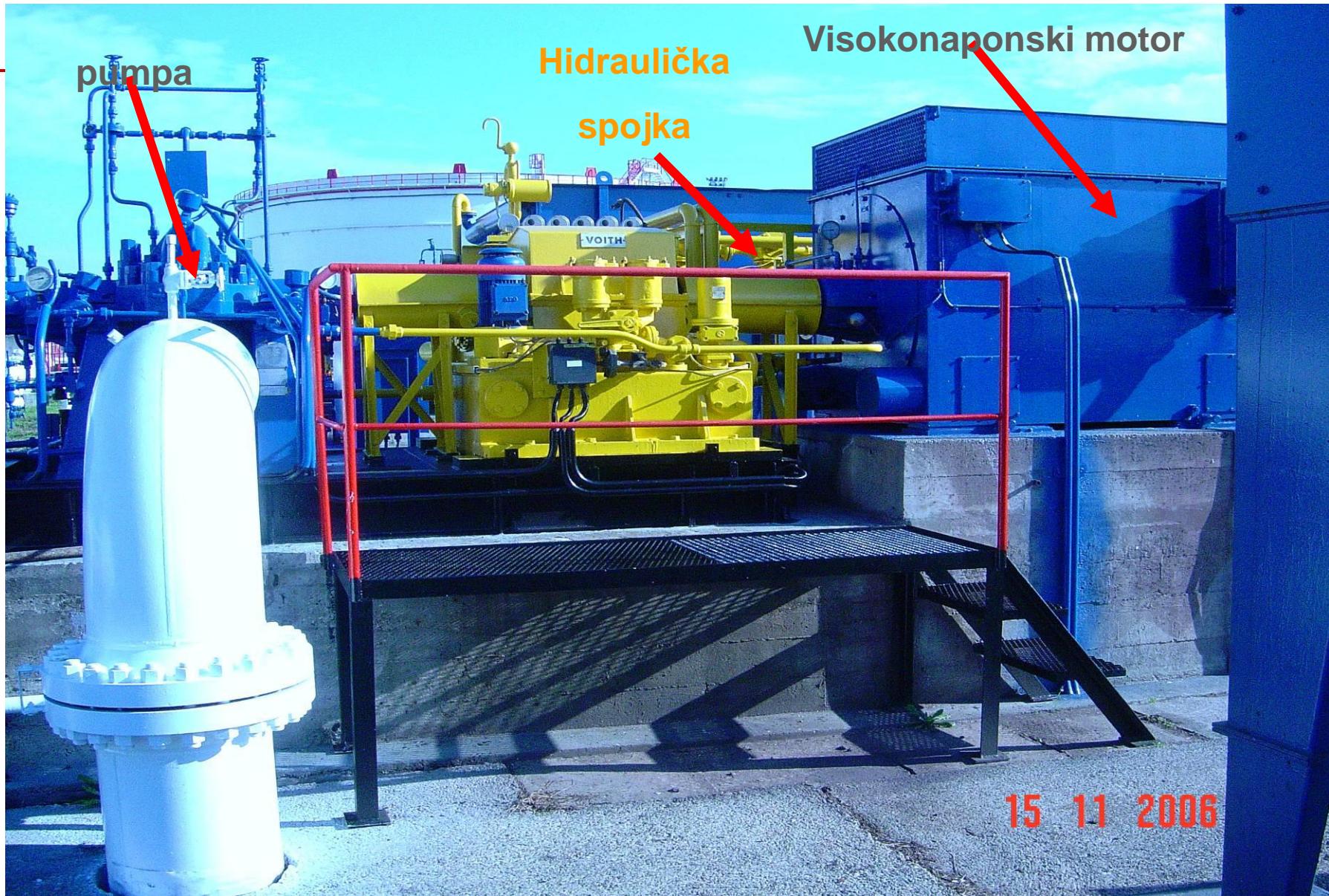
Kavezni motori naftovodnih pumpi na terminalu Omišalj,  
3300 kW, 6000 V, 50 Hz, 2p=4



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



# ELEKTROMOTORNI POGON NAFTOVODNE PUMPE sa zaletnom spojnicom



# Motori naftovodnih pumpi 6000V, 50 Hz, 3300 kW, Melnice

---

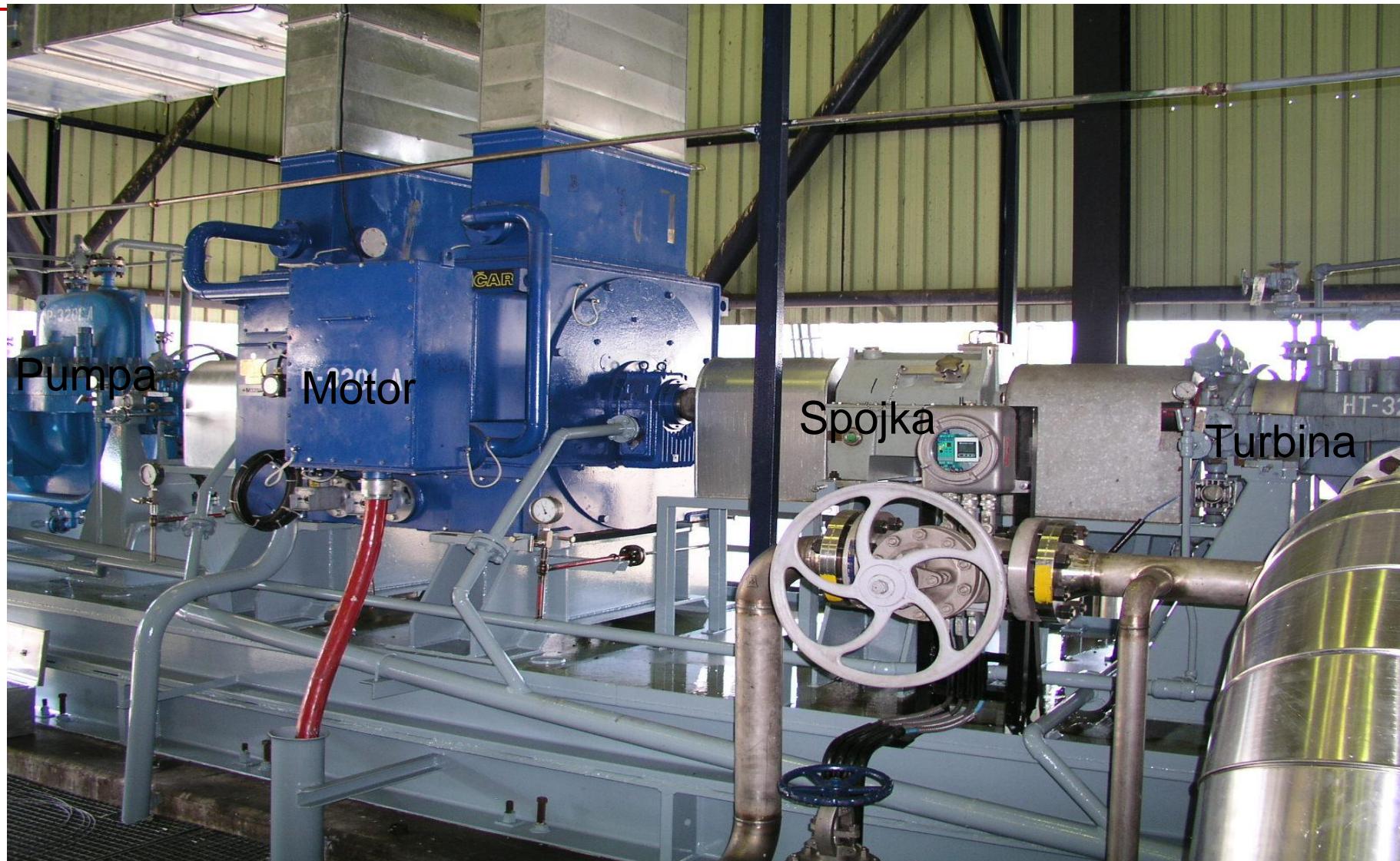


# Elektromotorni pogon –asinkroni motor +pumpa amdea otopine, procesno postrojenje za obradu plina CPS Molve



Frekvencijski regulirani motor, Exde II AT3

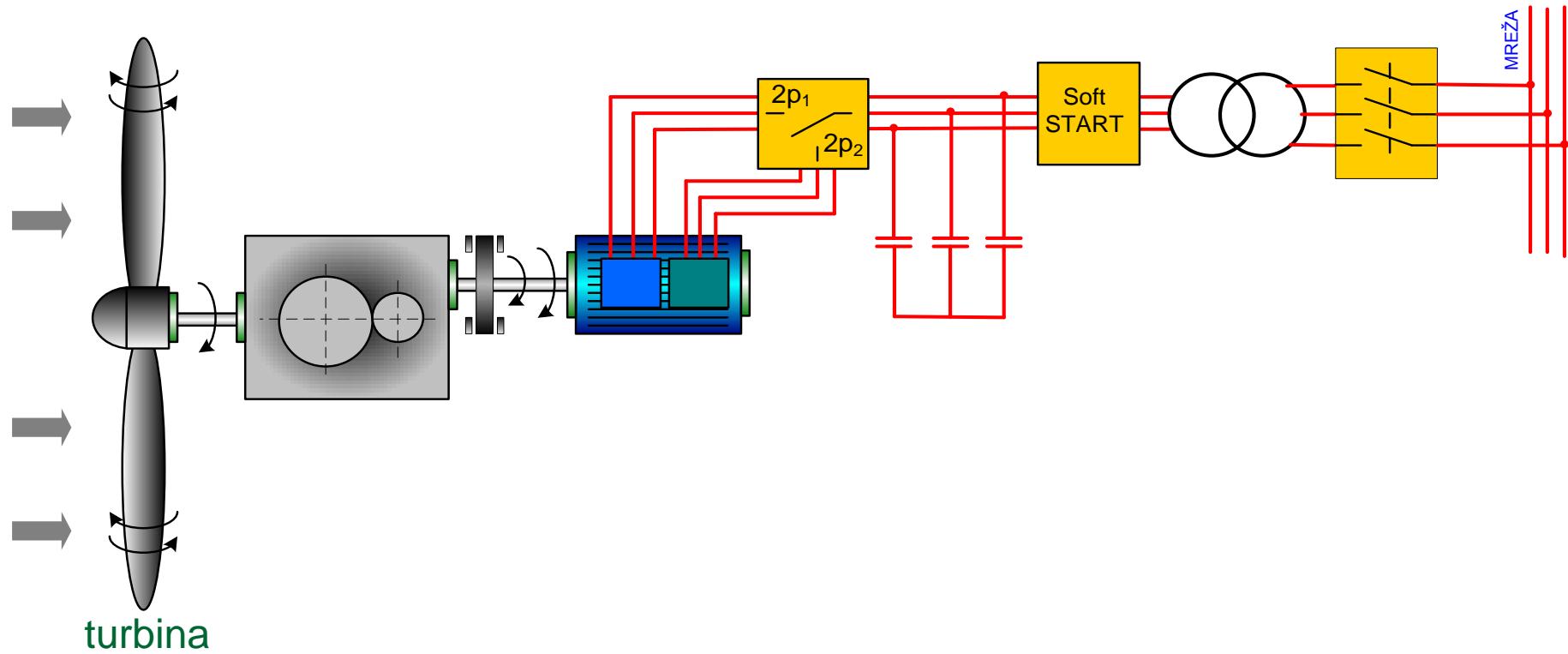
# Elektromotorni pogon procesne pumpe, motor 1800 kW, 2p=2, frekvencijski reguliran



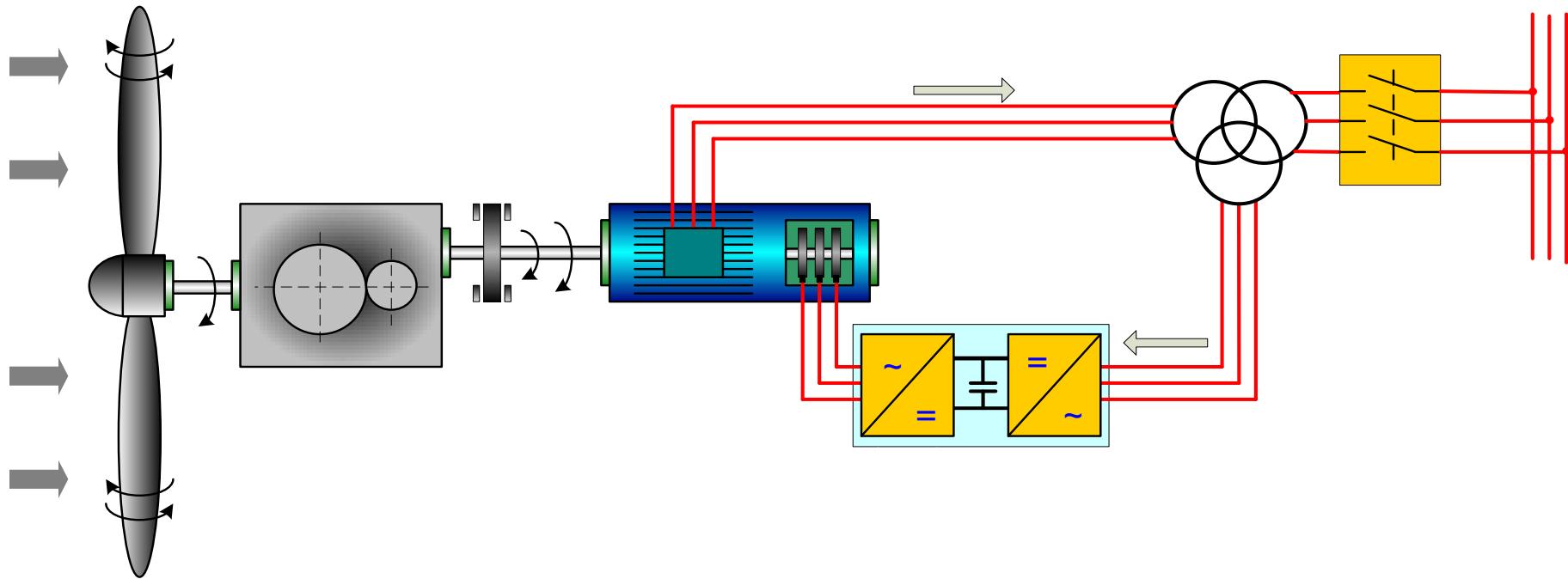


**Asinkroni motor 350 kW, 2p=2, 400V, za pogon vijčanog kompresora na plinskoj bušotini**

# Vjetroagregat s asinkronim generatorom i turbinom konstantne brzine vrtnje



# Dvostrano napajani asinkroni generator (DFIG) vjetroagregata promjenljive brzine vrtnje



# Osnove teorije - okretno magnetsko polje

---

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

$$n_s = \frac{60f_s}{p} \quad \text{r/min}$$

gdje je  $f_s$  frekvencija struja, a  $p$  broj pali 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

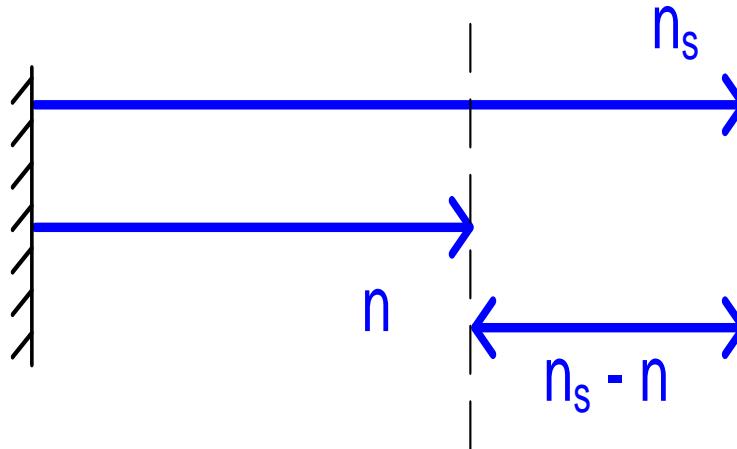
# Pojam klizanja asinkronog stroja

- okretno polje se vrti u odnosu na stator sinkronom brzinom

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

- rotor se vrti brzinom vrtnje  $n$  r/min
- razlika brzine vrtnje rotora (mehaničke brzine) i brzine vrtnje okretnog polja naziva se **klizanje** i računa se prema izrazu:

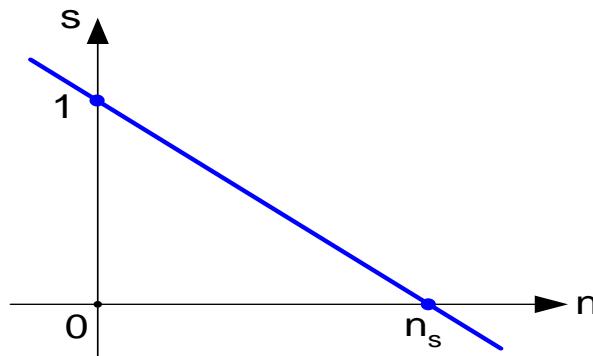
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$



- brzina vrtnje rotora je nakon definicije klizanja s:

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

- brzina vrtnje rotora može teoretski biti svaka vrijednost, pa odnosi između nje i klizanja s izgledaju kao na slici:



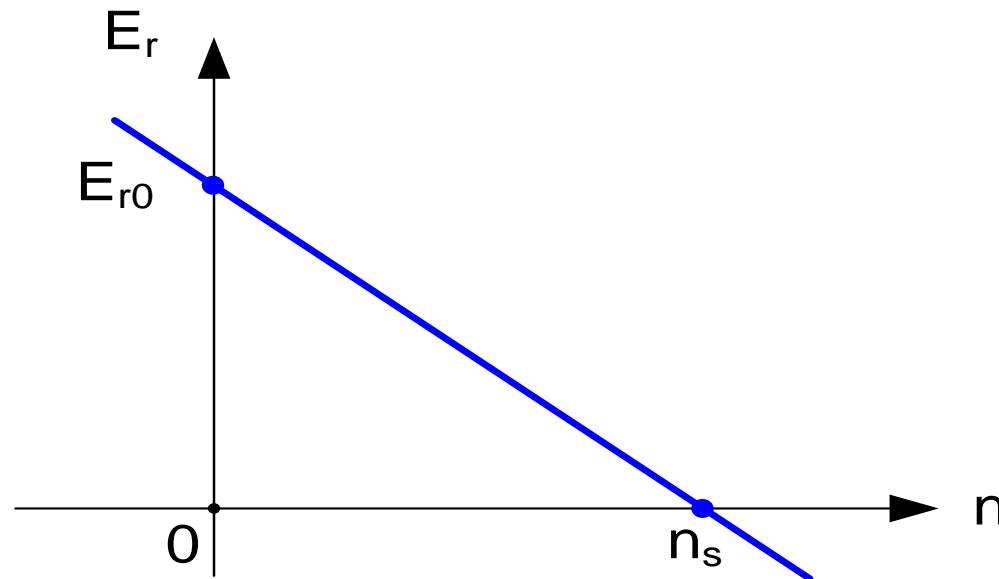
- ➔ vrti li se rotor sinkronom brzinom  $\rightarrow s = 0$
- ➔ dok rotor stoji (zakočen)  $\rightarrow s=1$
- ➔ vrtnja rotora manja od sinkrone  $s > 0$
- ➔ vrti li se rotor brže od okretnog polja  $\rightarrow s < 0$
- ➔ vrti li se rotor u suprotnu stranu ( $n<0$ ) od okretnog polja  $\rightarrow s > 1$

- 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 1kW)
- 
- Primjer iz kataloga  
Motor snage 180 W, 400 V, 50HZ, 2p=2 ima brzinu vrtnje pri nazivnom opterećenju 2905 r/min  
Klizanje je :  
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{3000 - 2900}{3000} 100 = 3,33\%$$
  - Motor snage 10 000 kW , 10 000 V, 50 Hz 2p = 4 , nazivna brzina vrtnje n= 1491 r/min

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

# 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  $E_r$  mijenja se prema:
- pri relativnoj brzini 0, tj.  $s=0$ , nema napona u rotoru, nema struje, sila ni momenta pa motor ne može raditi pri  $s=0$ . Samo pri različitim brzinama vrtnje okretnog polja i rotora postoji inducirani napon, struje u rotoru i elektromagnetski moment. Zbog toga je naziv asinkroni motor.

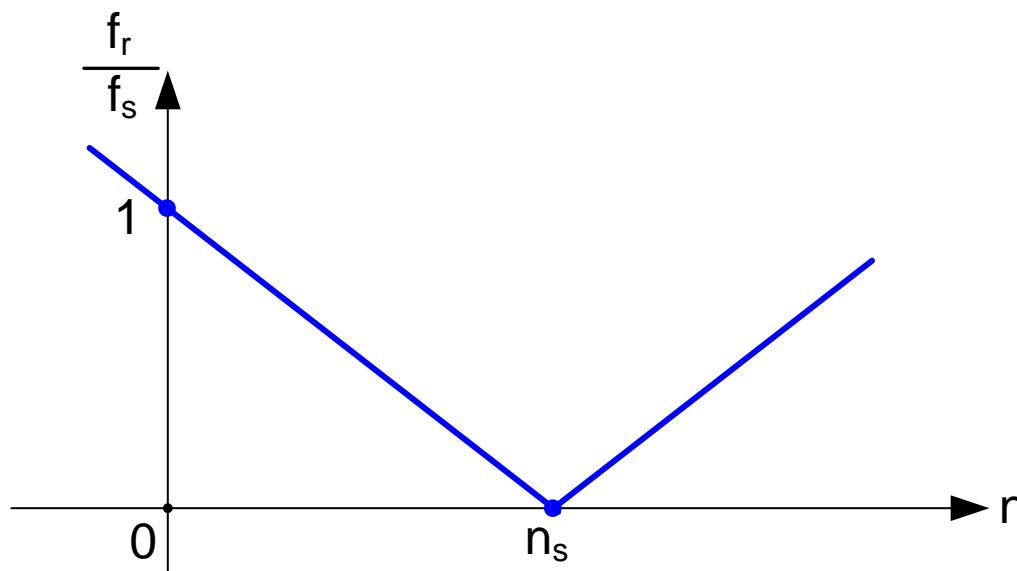


# Frekvencija rotorskih struja

- Inducirani napon i struja rotora imaju frekvenciju:

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

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 vrtnje 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

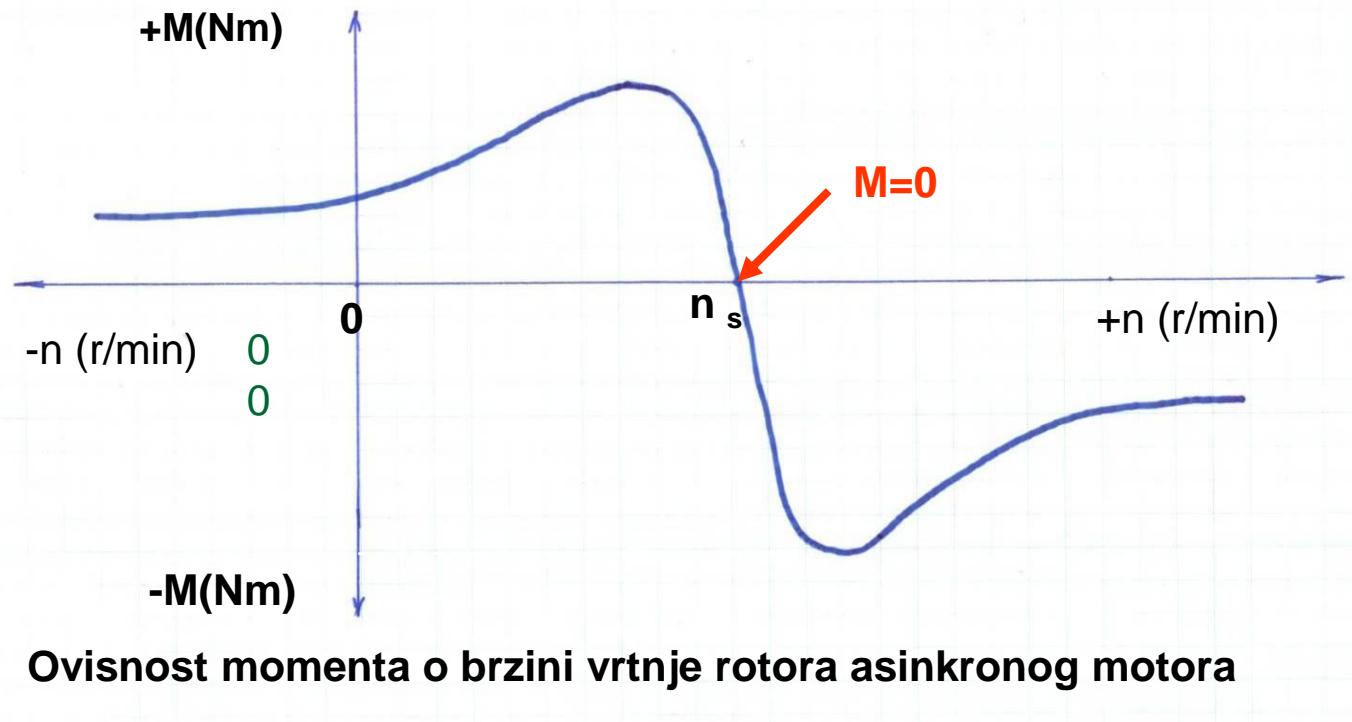
$$n_{0r} + n = n_s$$

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

- Kod asinkronog stroja pretvorba je uvijek moguća osim pri vrtnji 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 vrtnje i frekvencije.

# ASINKRONI STROJ-DEFINICIJA

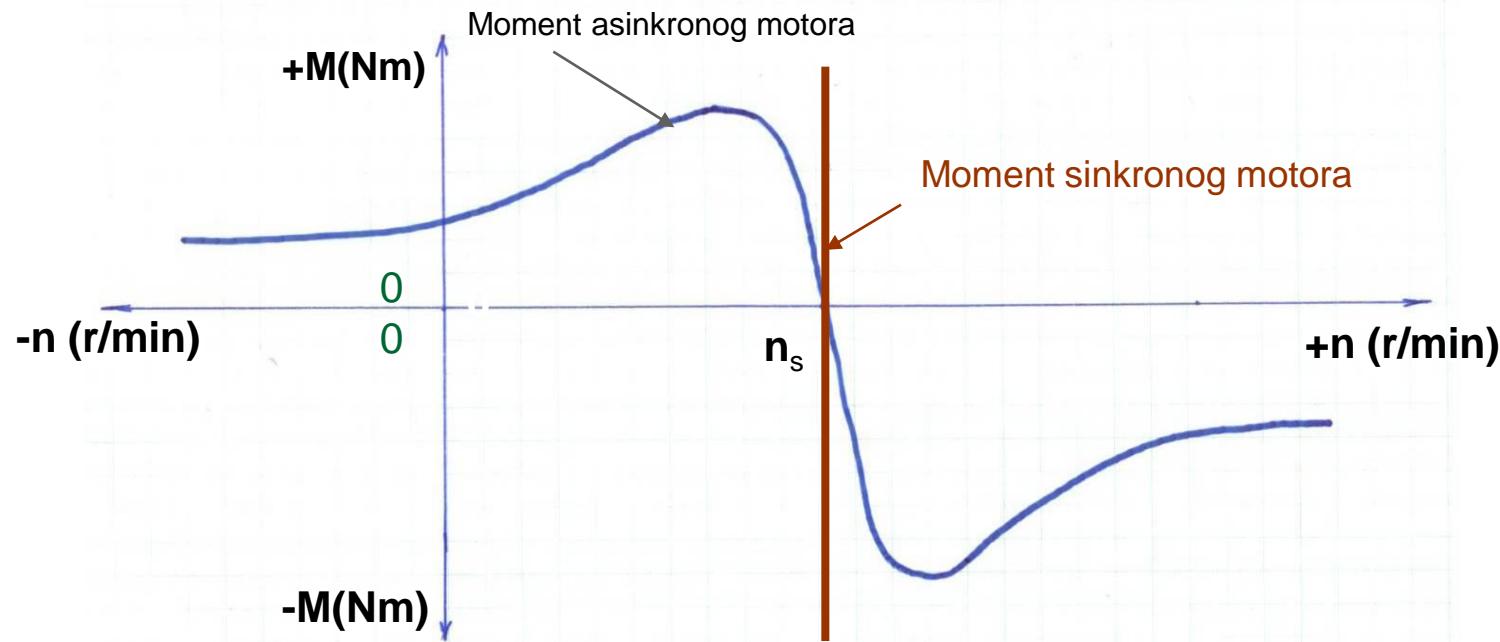
Asinkroni stroj (engl. induction machine) je elektromehanički pretvarač energije koji u stacionarnom stanju stvara elektromagnetski moment pri svakoj rotorskoj brzini osim u jednoj, sinkronoj  $n_s$ .



# Momentne karakteristike sinkronog i asinkronog motora

Asinkroni motor stvara elektromagnetski moment pri svakoj rotorskoj brzini osim u jednoj, sinkronoj.

Sinkroni motor razvija elektromagnetski moment samo pri jednoj brzini i to sinkronoj.



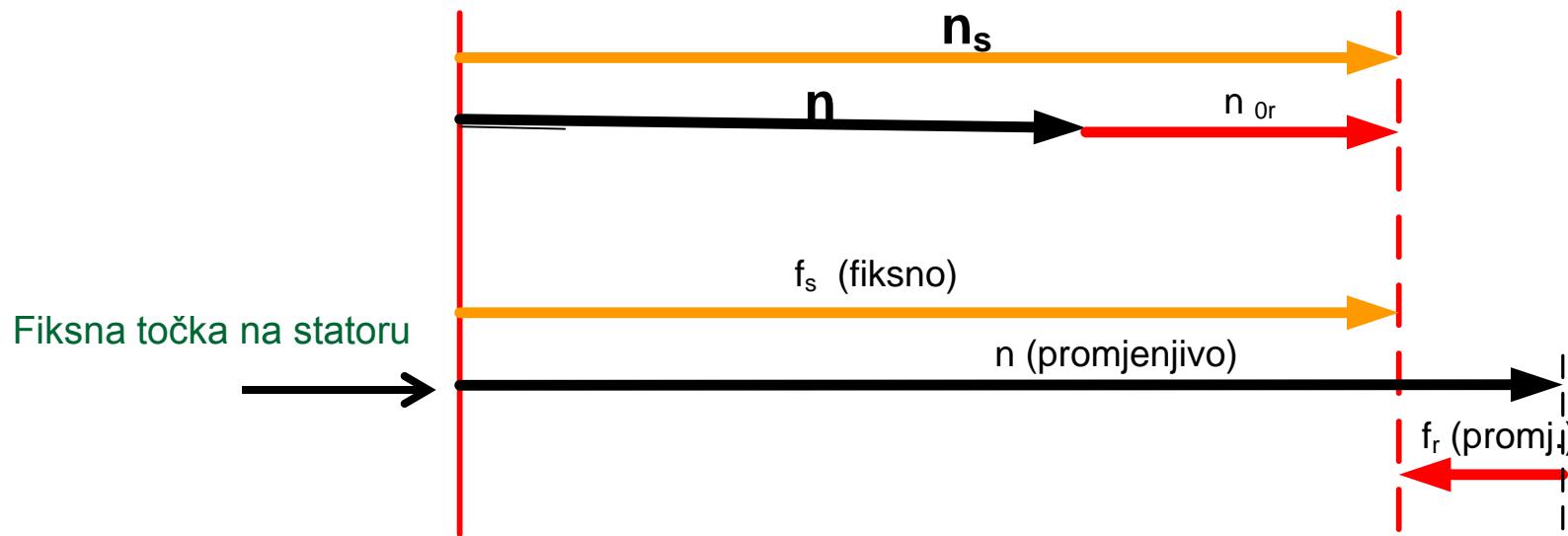
# Odnosi brzina vrtnje u asinkronom stroju

$n_s$  frekvencija vrtnje(brzina vrtnje) statorskog okretnog polja u odnosu na stator

$n$  frekvencija vrtnje (brzina vrtnje) rotora u odnosu na stator

$n_{0r}$  frekvencija vrtnje rotorskog okretnog polja u odnosu na rotor

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



- 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  $f_r = f_s$

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

$E_s$  – napon faze statora

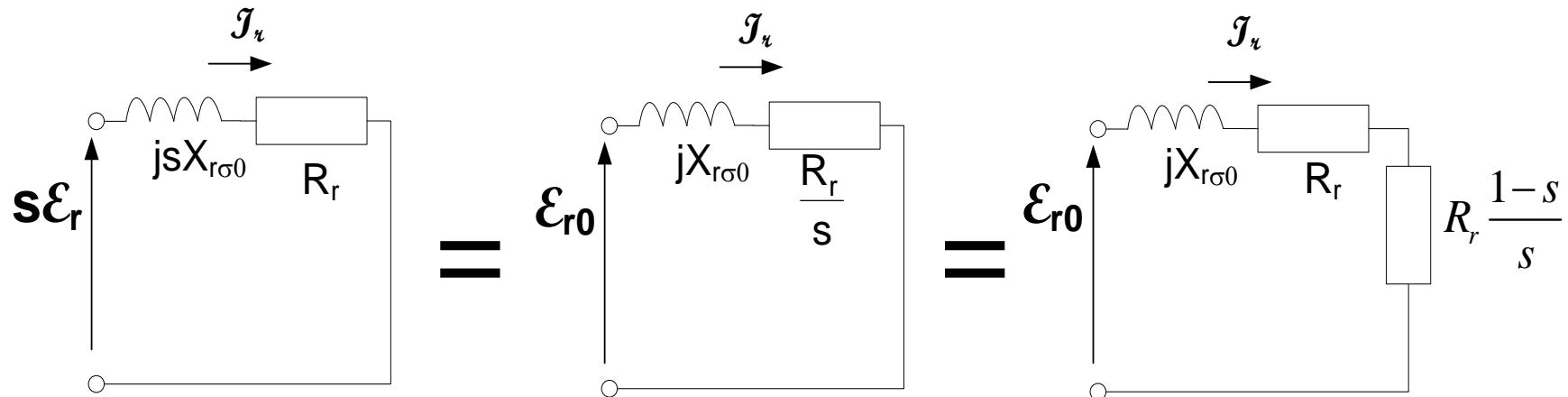
$E_{r0}$  – napon faze rotora

$N_r$  i  $N_s$  - su brojevi zavoja po fazi 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 fazi 1 / 2 .

## Rotorski strujni krug asinkronog stroja možemo prikazati:



$R_r \rightarrow$  stvarni otpor u rotoru

$R_r \frac{1-s}{s} \rightarrow$  ekvivalent mehaničkog rada

# Rotorska struja

- Struju u rotoru određuju inducirani napon  $E_2$  i impedancija rotora  $Z_2$ :

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

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

$$E_r = E_{r0}$$

$$X_{\sigma r0} = \omega_r L_{\sigma r} = 2 \pi f_r L_{\sigma r}$$

- U vrtnji je:  $E_r = s E_{r0}$

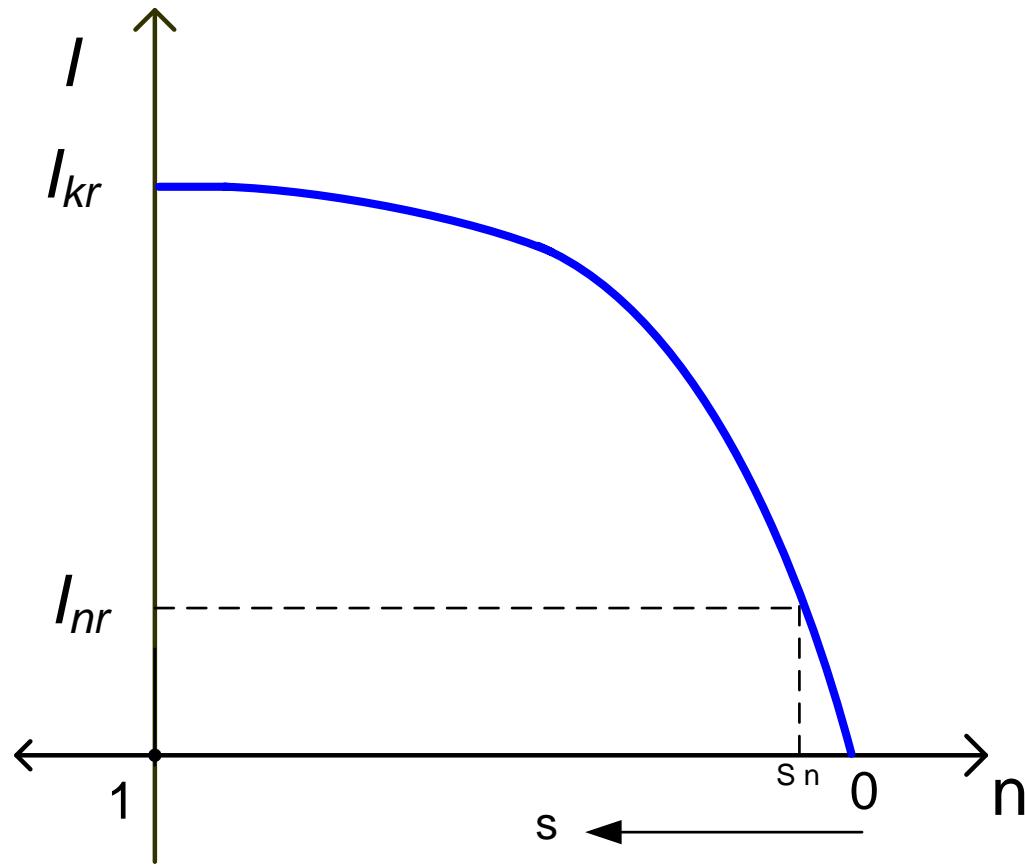
$$X_{\sigma r} = 2\pi f_1 s L_{\sigma r} = s X_{\sigma r0}$$

stoga je:

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

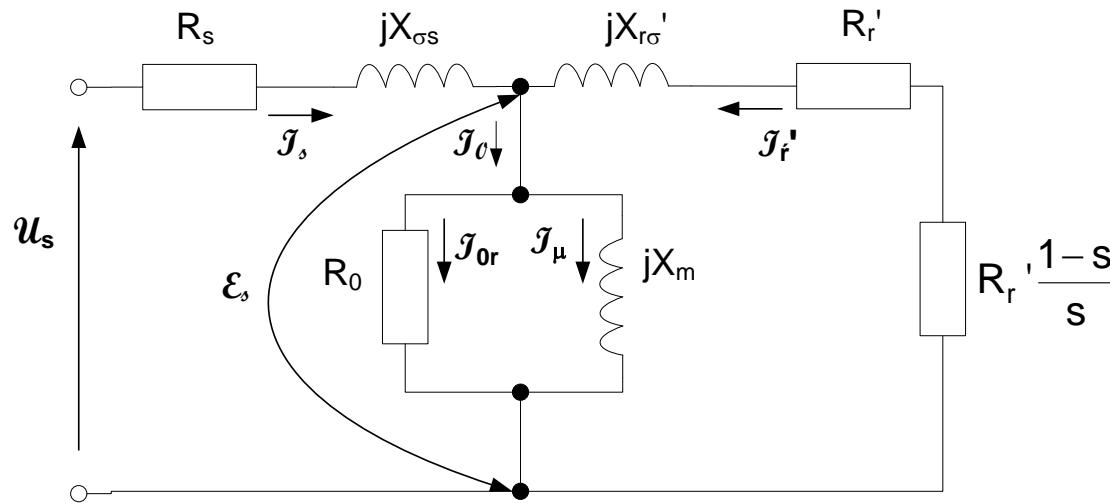
- za  $s=0$ , struja  $I_R(s)=0$

Rotorska struja u ovisnosti o klizanju,  $I_{kr}$  zakočeni rotor,  $I_{nr}$  nazivna struja



# NADOMJESNA SHEMA ASINKRONOG STROJA

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



$R_s$  i  $X_{os}$

statorski otpori i rasipna reaktancija

$X_m$

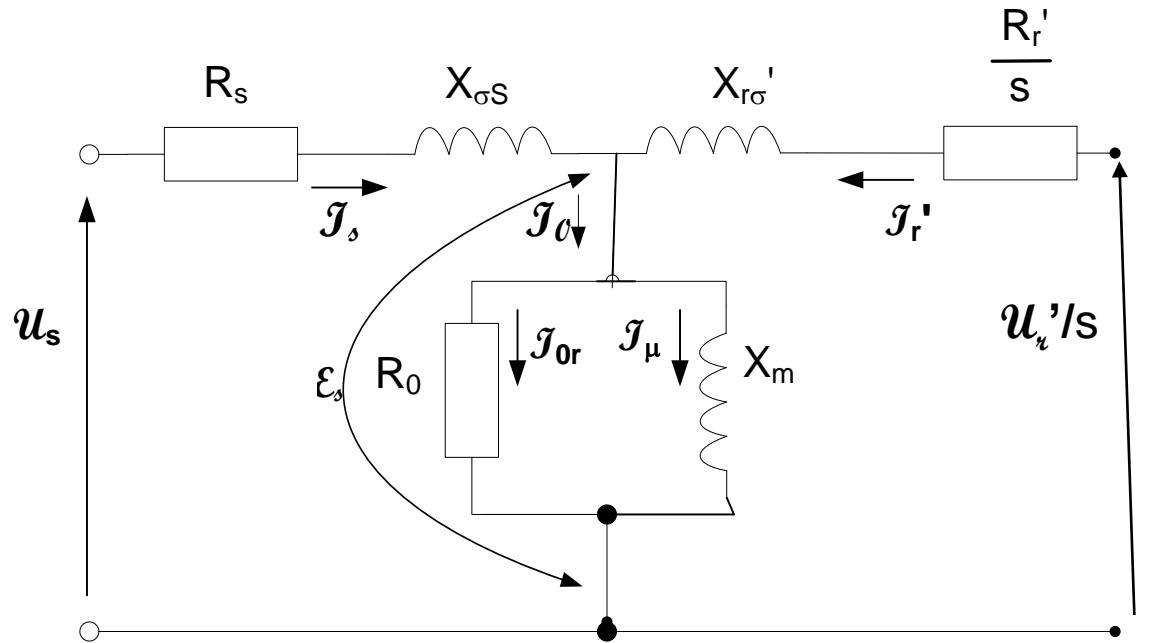
reaktancija magnetiziranja (predstavlja ulančeni magnetski tok stator-rotor)

$R'_r / s$  i  $X'_{r\sigma}$  rotorski otpor i rasipna reaktancija

$E_s$  je inducirani fazni napon

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

# Nadomjesna električna shema asinkronog stroja



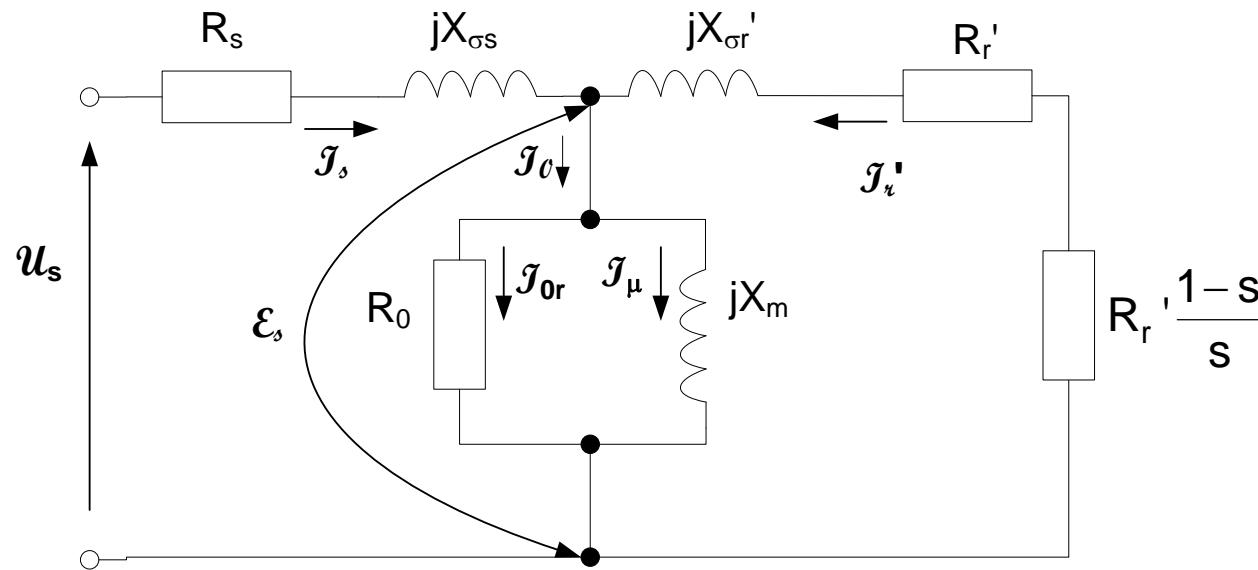
Nadomjesna shema kolutnog motora

$U_r'/s \rightarrow$  rotorski napon na kliznim kolutima u ovisnosti o  
klizanju

- Pomoću nadomjesne sheme možemo računati sva pogonska stanja i parametre režima pogona motora ( struje, snage, momente, faktor snage, korisnost, ..... ) za stacionarno pogonsko stanje.

Primjer za primjenu nadomjesne sheme

Izvesti izraze za energetsku bilancu kavezognog asinkronog motora uz pomoć nadomjesne sheme na slici, za stacionarno stanje.



# 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, rotora

$\varphi_1$  – fazni pomak struje i napona statora

- na radnom otporu statora se troši snaga:

$$P_{Cu s} = m_s I_s^2 R_s$$

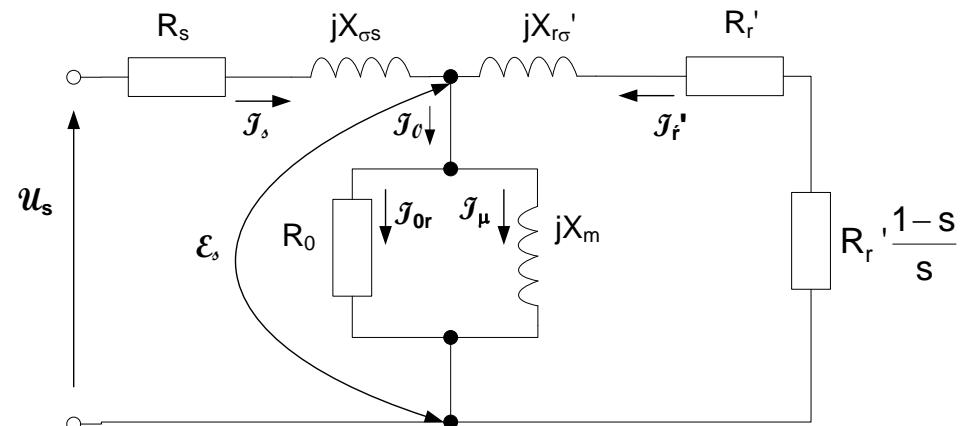
- u željezu statora (na  $R_0$ ):

$$P_{Fe s} = m_s E_s^2 / R_0 = m_s I_{02}^2 R_0$$

- snaga okretnog mag. polja:

$$P_{okr} = P_s - P_{Cu s} - P_{Fe s}$$

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



gubici u željezu rotora se mogu zanemariti zbog male frekvencije u rotoru  $f_2 \ll$   
stoga je:

$$P_{\text{okr}} = P_{\text{2el}} + P_{\text{meh}}$$

snaga okretnog polja

$$P_{\text{rel}} = m_r I_r^2 R_r$$

gubici u namotu rotora

$$P_{\text{r meh}} = m_r I_r^2 R_r (1-s) / s$$

razvijena mehanička snaga

Odnos električkih gubitaka u rotoru i razvijene mehaničke snage je

$$\frac{P_{\text{rel}}}{P_{\text{r meh}}} = \frac{m_r I_r^2 R_r}{m_r I_r^2 R_r \frac{1-s}{s}} = \frac{s}{1-s}$$

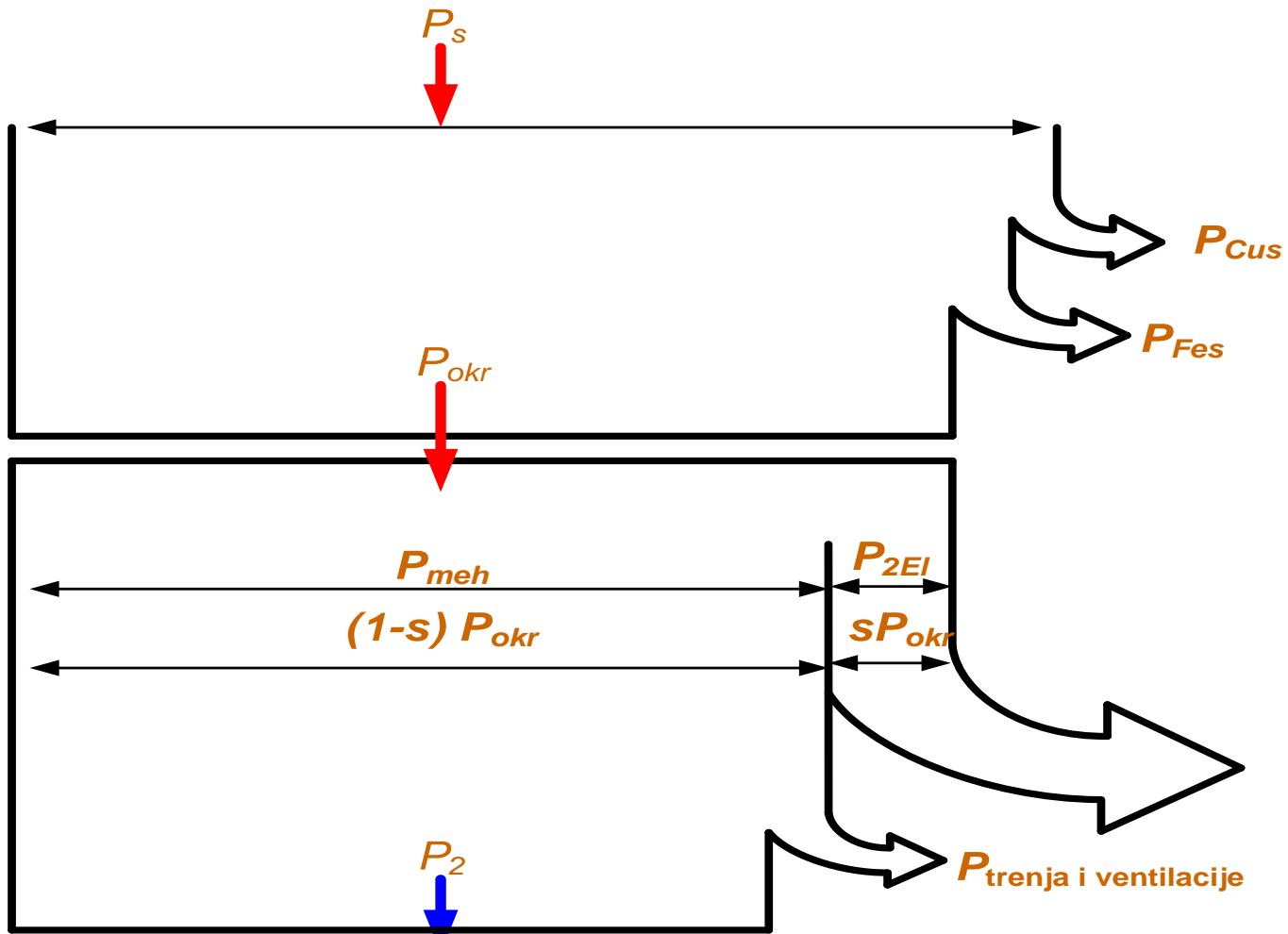
$$P_{\text{rel}} = s P_{\text{okr}}$$

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

Električki gubitci u rotoru direktno su 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 gubitci asinkronog motora (bilanca snage)



$P_2$  je mehanička snaga na osovini motora ,

$$\text{korisnost motora } \eta = \frac{P_2}{P_1}$$

## 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:

$$S = P_s + j Q_s = m_s (U_s I_s \cos \varphi_s + j U_s I_s \sin \varphi_s)$$

- Motor je uvećek definiran radnom snagom na osovini, to je njegova nazivna snaga  $P$

- Ako stroj radi u generatorskom režimu rada ( $s < 0$ ) potrebna mu je i tada 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 1/min, godina proizvodnje 2005.

# Momentna karakteristika asinkronog motora

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

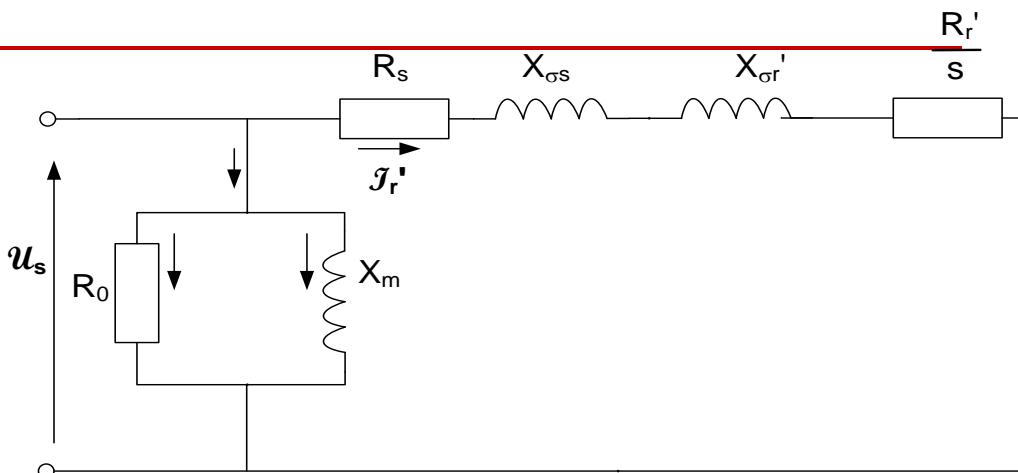
$$\begin{aligned} M &= \frac{P}{\omega} = \frac{P_{meh}}{\omega_{meh}} = \frac{(1-s) P_{okr}}{(1-s) \omega_{sm}} = \frac{P_{okr}}{\omega_{sm}} = \frac{m_r I_r^2 R_r}{\omega_{sm} s} = \\ &= \frac{m_r E_{r0}^2}{\omega_{sm} \left[ \left( \frac{R_r}{s} \right)^2 + X_{r\sigma 0}^2 \right]} \frac{R_r}{s} = \\ &= \frac{30 m_r E_{r0}^2 R_r}{n_s \pi \left[ \left( \frac{R_r}{s} \right)^2 + X_{r\sigma 0}^2 \right]} \frac{1}{s} \quad Nm \end{aligned}$$

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

# Točnija momentna karakteristika-poprečna grana premještena na ulaz sheme

Iz nadomjesne sheme računamo struju i moment:

$$J_r' = \frac{U_s}{\left( R_s + \frac{R_r'}{s} \right) + j(X_{os} + X_{or}')}$$



- snaga okretnog polja  $P_{okr} = m_r I_r'^2 R_r' / s$

- gubici u rotoru  $P_{rel} = m_r I_r'^2 R_r'$

- električka snaga pretvorena u mehanički rad je  $P_m$  a razvijeni elektromagnetski moment

$$M_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{m_r I_r'^2 R_r'}{\omega_{sm} s} = \frac{m_r}{\omega_{sm}} \frac{U_s^2}{\left[ \left( R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + (X_{os} + X_{or}')^2 \right]} \frac{R_r'}{s} =$$

$$= \frac{p m_r}{\omega_s} \frac{U_s^2}{\left[ \left( R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + (X_{os} + X_{or}')^2 \right]} \frac{R_r'}{s}$$

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 noj su karakteristična područja:

od  $s = 1$  do  $s = 0$

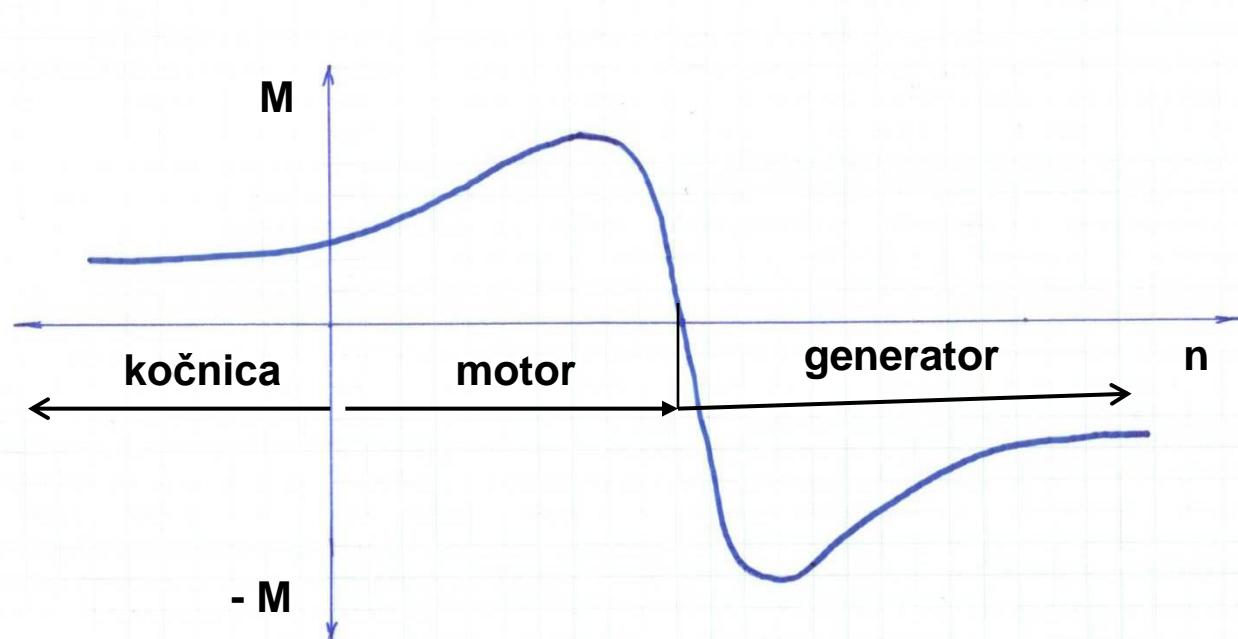
motorsko područje rada, energija iz mreže,

za  $s \leq 0$

generatorski rad, energija u mrežu

za  $s \geq 1$

protustrujno kočenje, energija iz mreže i kinetička  
energija mehanizama koči rotor



# Maksimalni ili prekretni moment

- Za primjene je važan maksimalni ili prekretni moment motora.
- Derivacijom izraza za moment na slajdu 53 i izjednačavanjem s nulom dobije se klizanje  $s_{\max}$  kod kojeg motor razvija najveći moment (maksimalni ili prekretni moment)

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

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

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

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 podijeli izraz za moment s izrazom za maksimalni moment u obliku

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{\frac{2+\beta}{s + \frac{s_{\max}}{s} + \beta}}{s_{\max}}$$

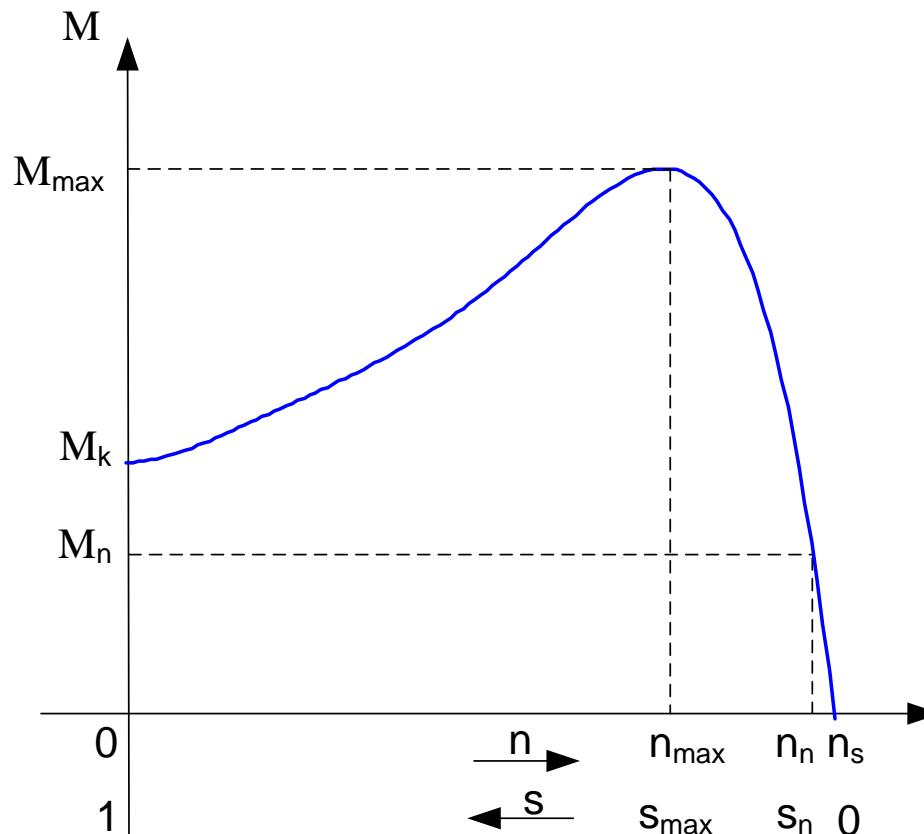
M

$$\beta = \frac{2R_s}{\sqrt{R_s + (X_{\sigma s} + X'_{\sigma r})}}$$

Za manje točna računanja može se primijeniti pojednostavljena Klossova formula u obliku

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{2}{\frac{s}{s_{\max}} + \frac{s_{\max}}{s}}$$

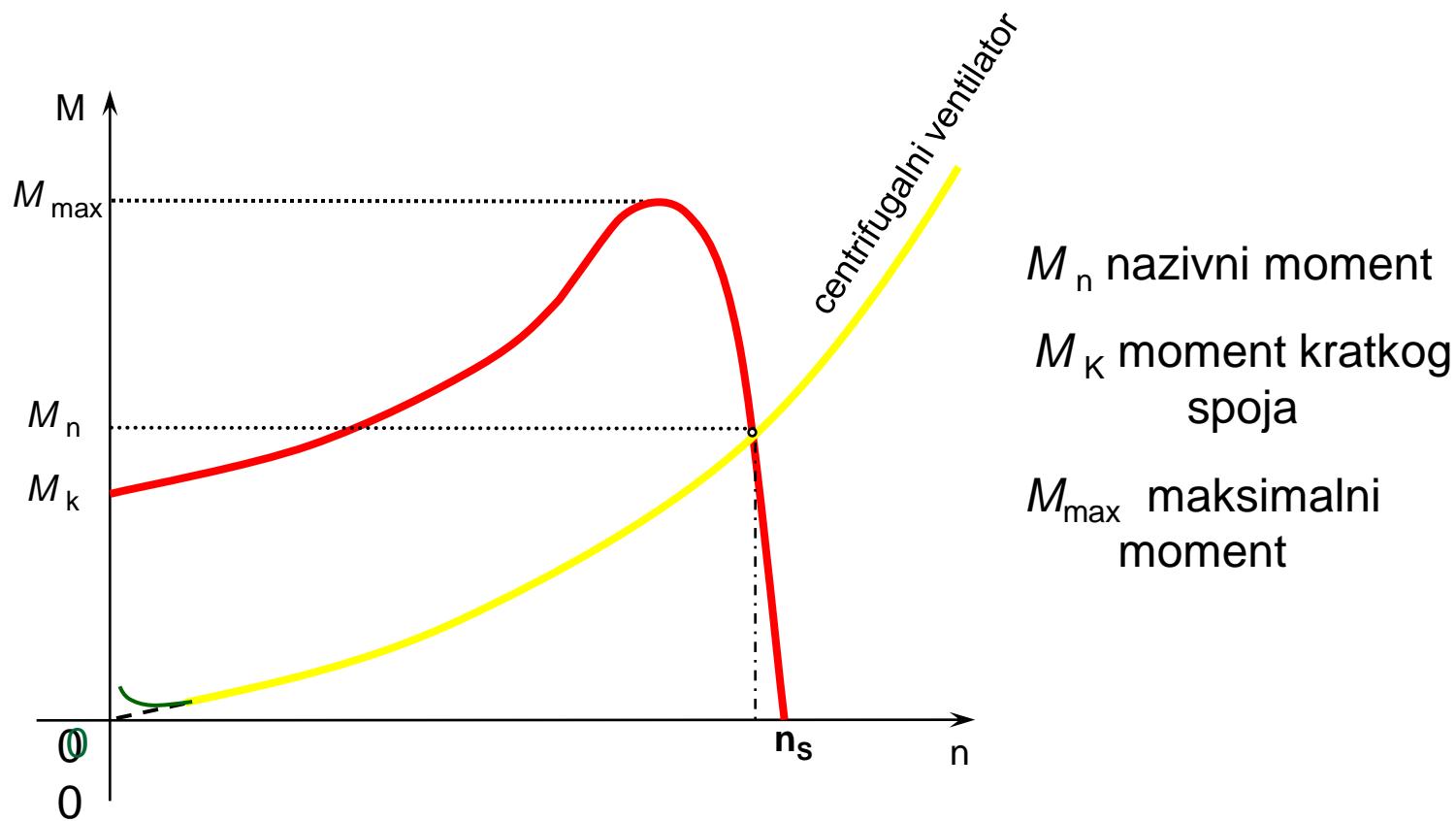
- grafički, momentna karakteristika najčešće se crta samo za motorski rad i označava prema slici:



- na momentnoj karakteristici ključne su 3 točke:

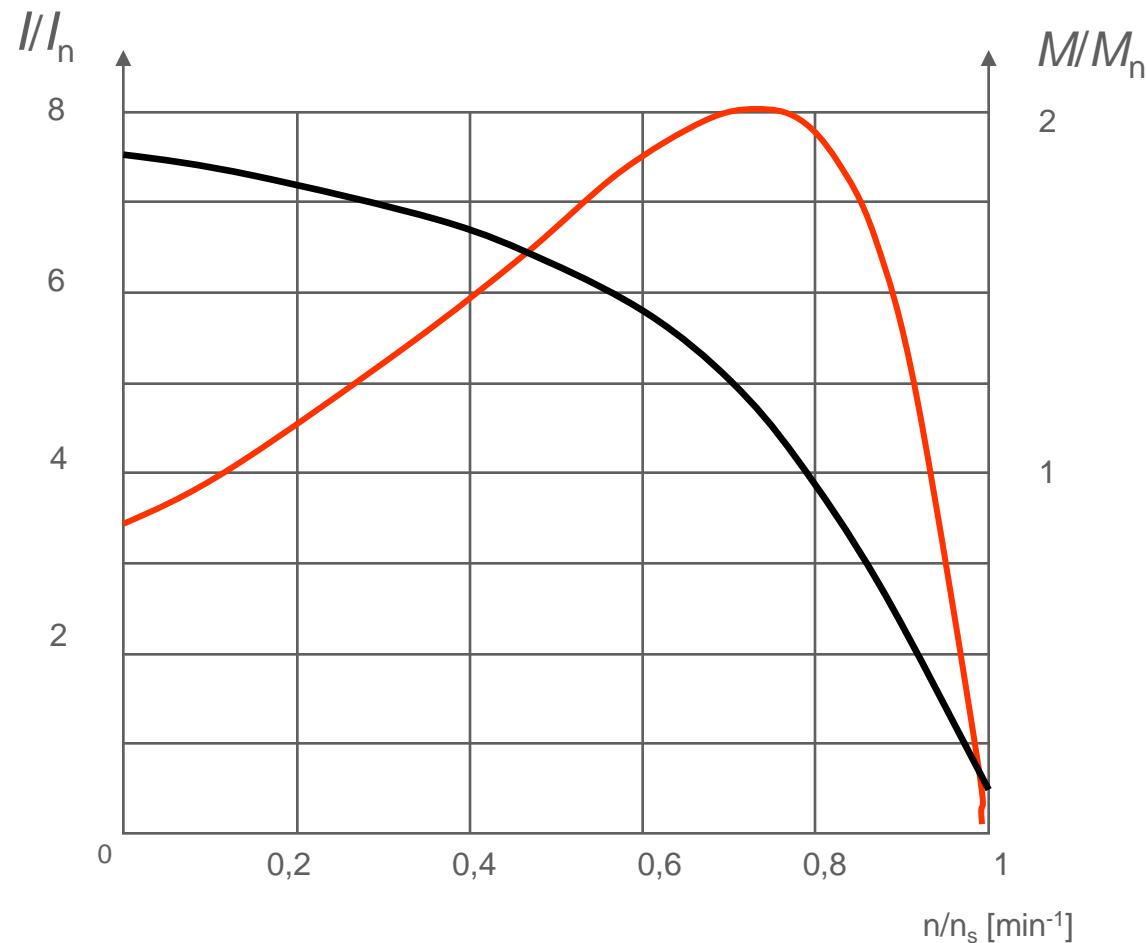
- |                   |               |   |
|-------------------|---------------|---|
| • $s = 1$ ,       | $n = 0$       | - potezni moment ili moment kratkog spoja(pokretanja) |
| • $s = s_n$ ,     | $n = n_n$     | - nazivni moment                                      |
| • $s = s_{max}$ , | $n =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

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



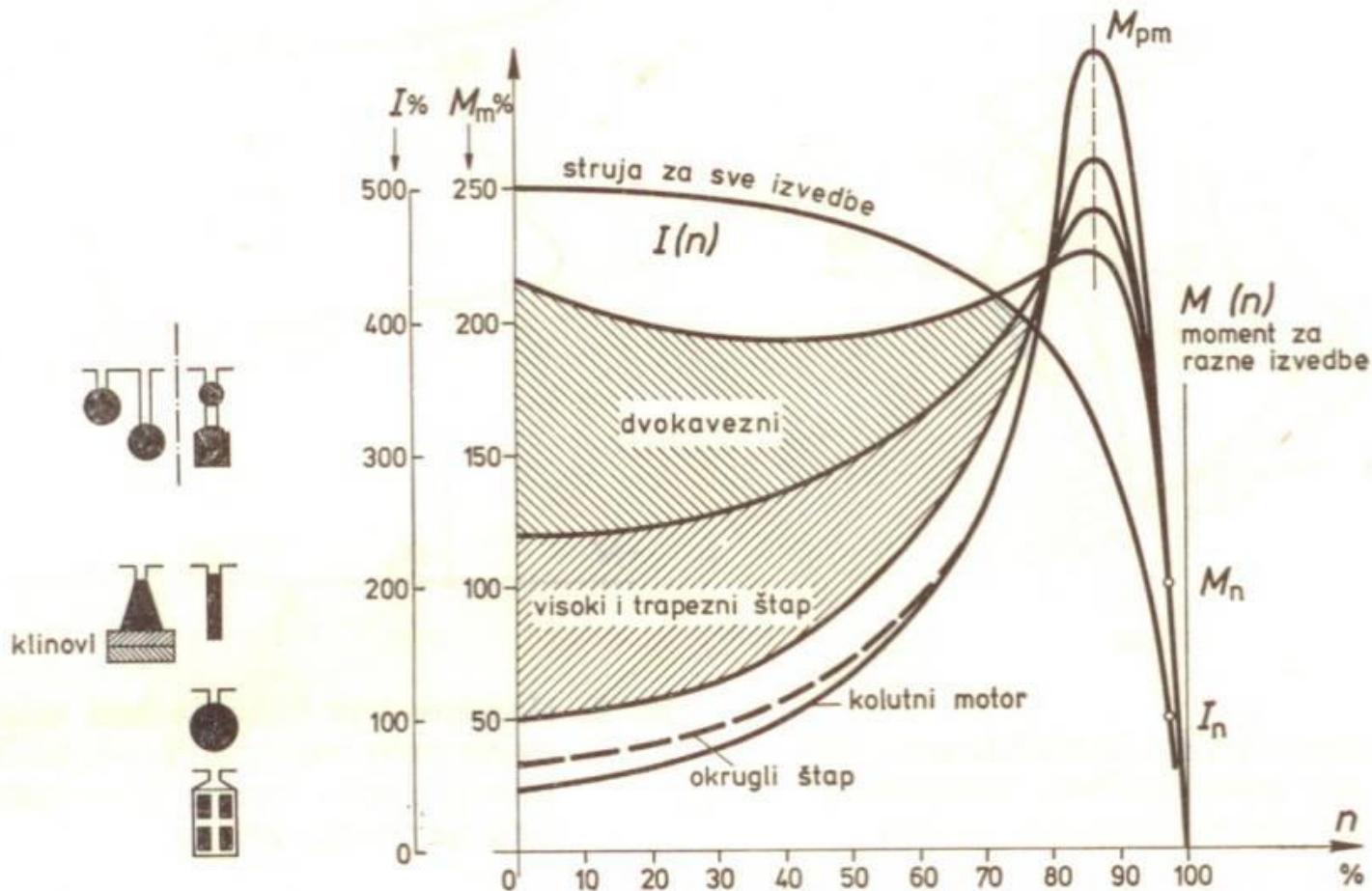
# Moment i struja u zaletu asinkronog motora

Problem velikih struja pri pokretanju motora



# Različiti oblici momentne karakteristike asinkronih trifaznih motora

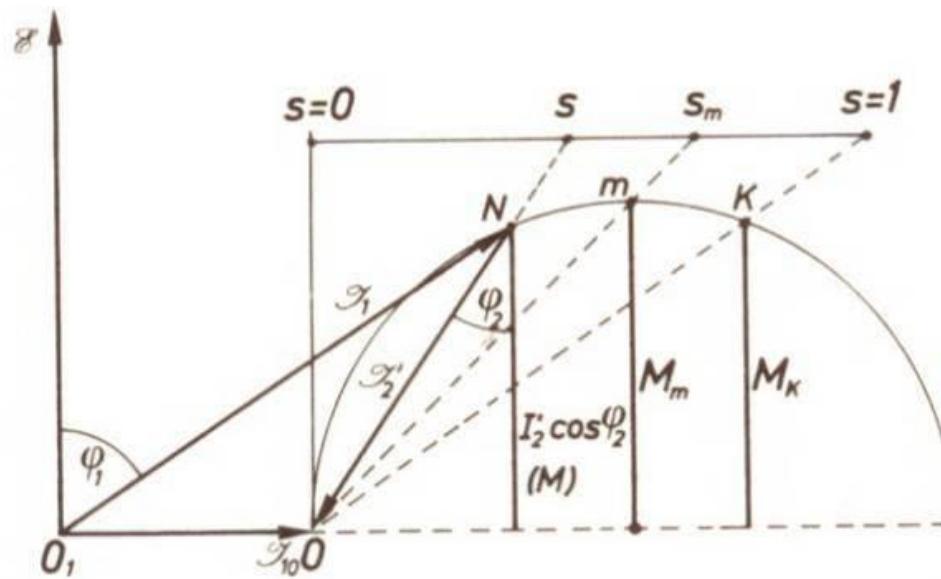
Oblik momentne karakteristike ovisi o odnosima induktivnih i radnih otpora. Konstrukcijom rotorskog utora se utječe na oblik momentne karakteristike.



# Kružni dijagrami asinkronog stroja

- Crtanjem kružnih 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.

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

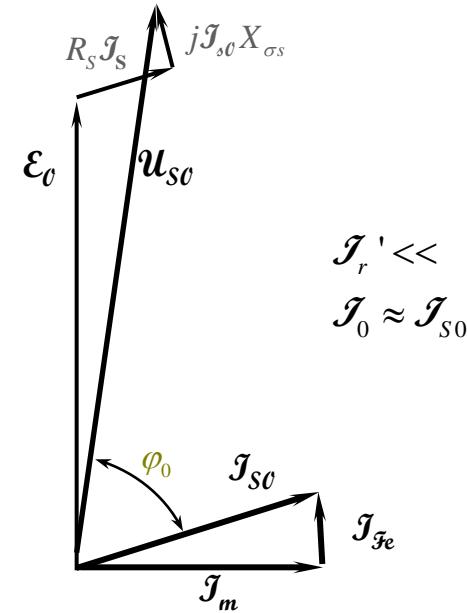
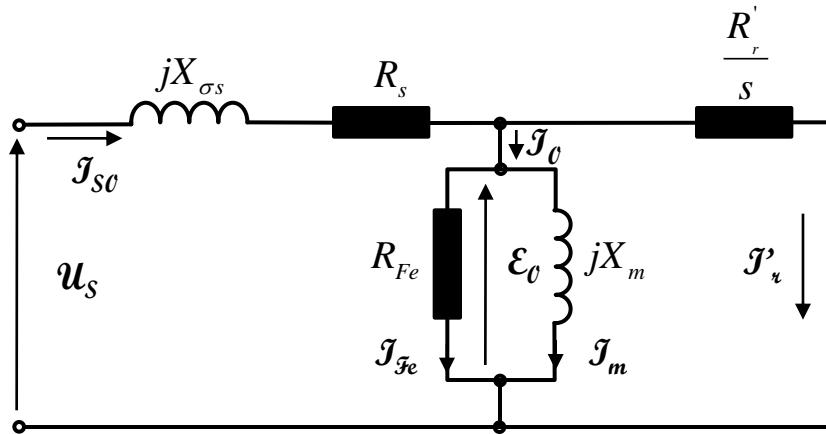


# Pogonska stanja asinkronog stroja

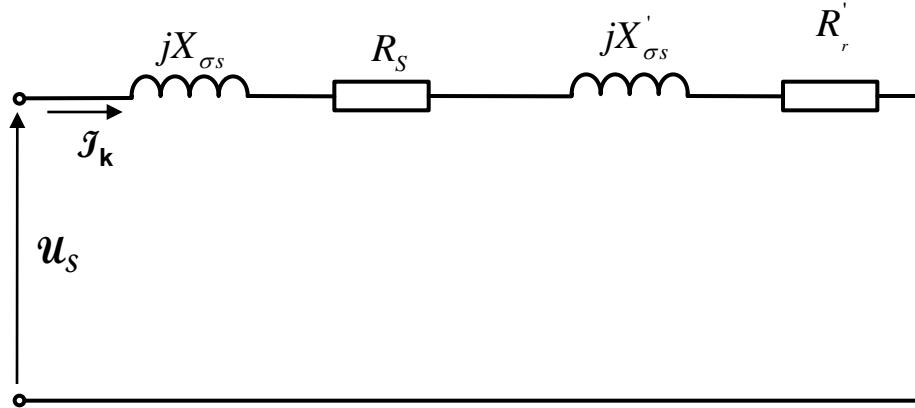
---

- **prazni hod motora** – na osovini nema opterećenja, klizanje  $s << 1$ , 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 (5-8puta nazivna)
- **opterećenje na osovini** – klizanje malo (1-5%), struja iz mreže ovisna o opterećenju

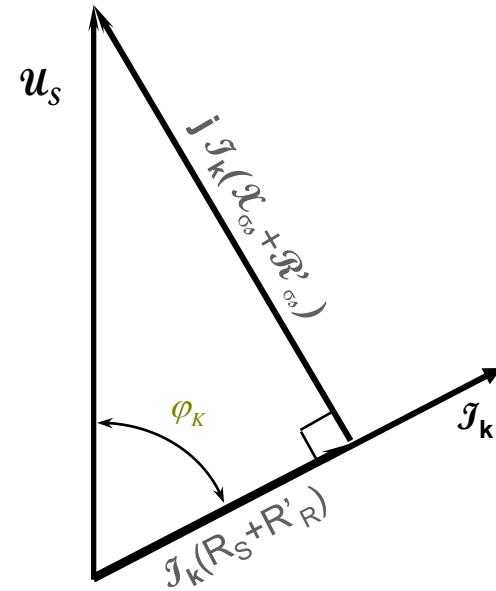
# Nadomjesna shema i fazorski dijagram asinkronog stroja u praznom hodu



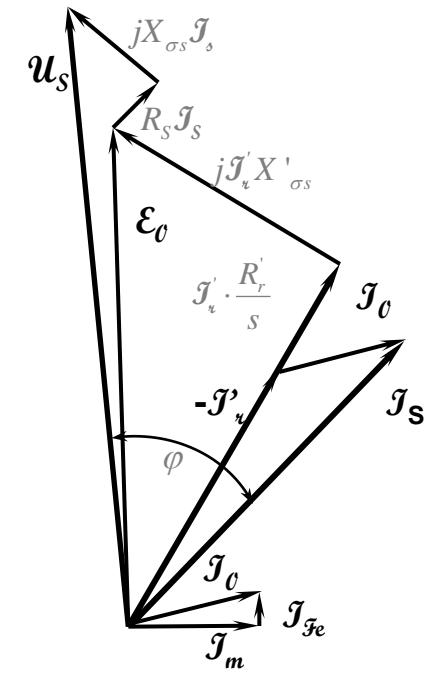
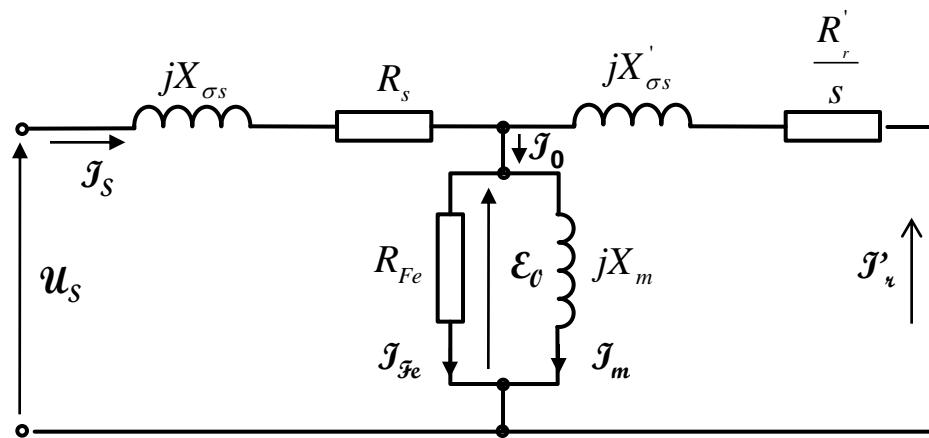
Za računanje se može zanemariti rotorski dio nadomjesne sheme zbog  $I_r \ll$



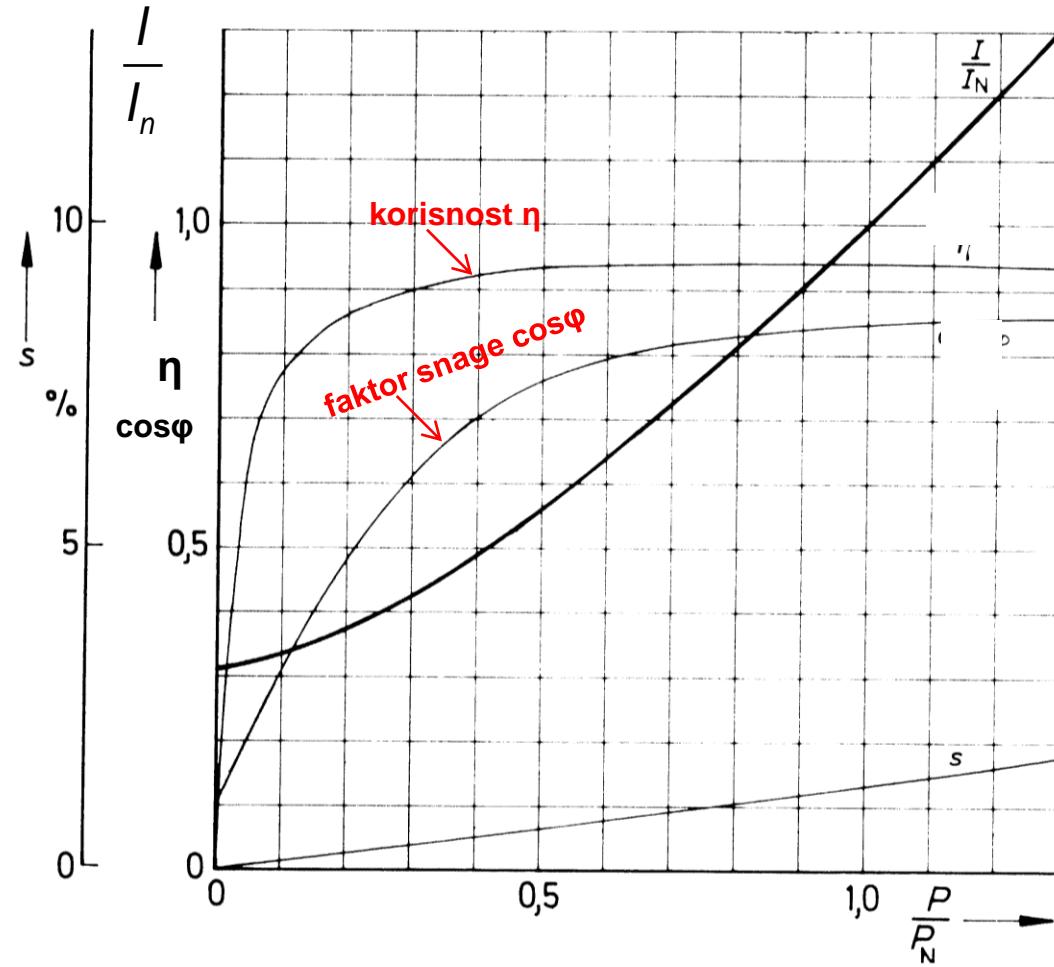
**u kratkom spoju možemo zanemariti  
poprečnu granu nadomjesne sheme i  
struju računati prema izrazu**



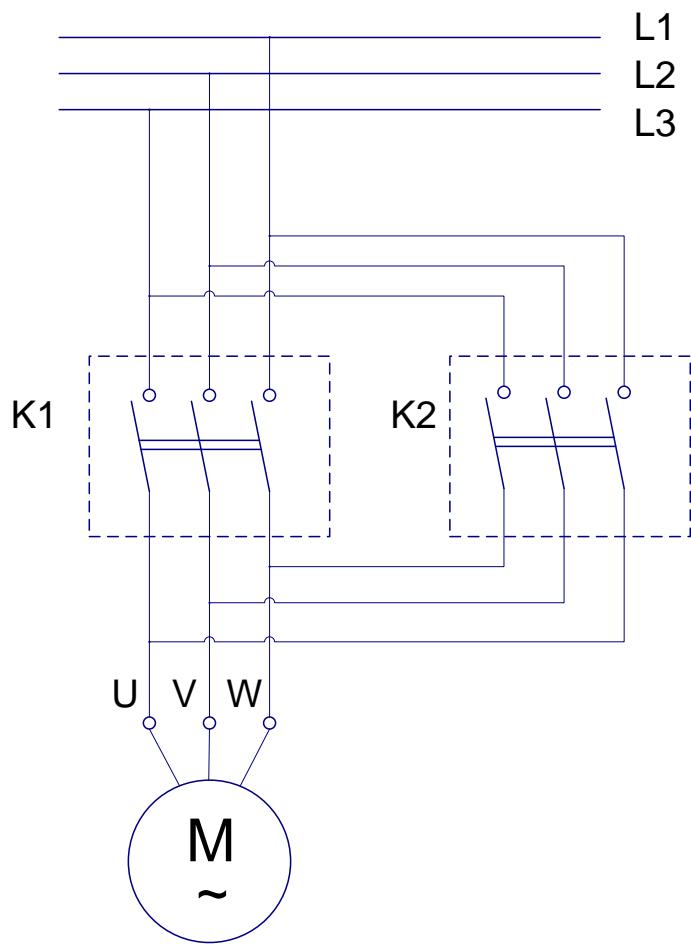
# Nadomjesna shema i fazorski dijagram asinkronog stroja u stacionarnom stanju



# 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.

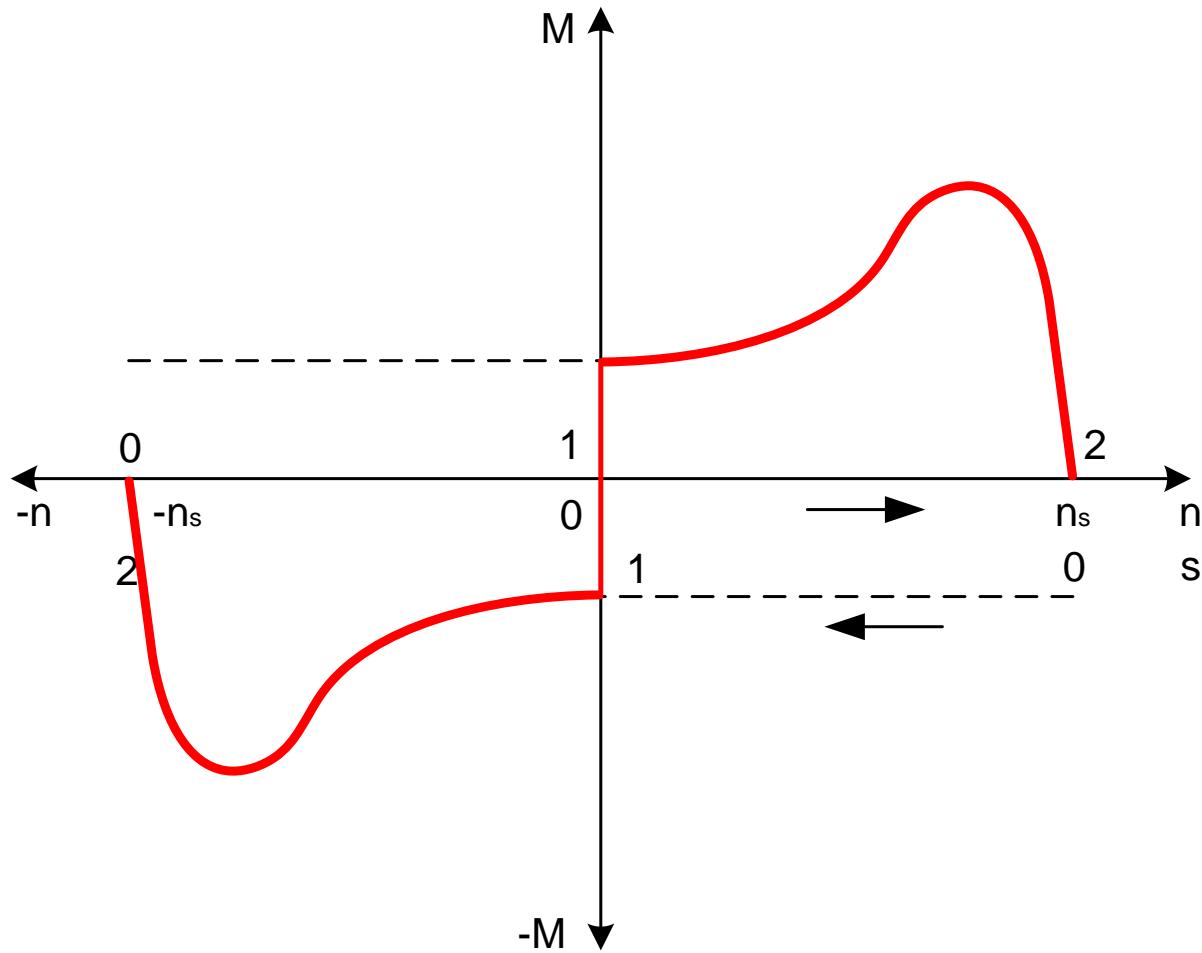
To se obično radi primjenom kontaktora (sklopnika) i tipkala. Detaljnije na laboratorijskim vježbama.

U, V i W – oznake stezaljki motora

L1, L2 i L3 – oznake faza mreže

K1 i K2 – kontaktori (sklopnici)

# MOMENTNA KARAKTERISTIKA ASINKRONOG MOTORA U PROCESU REVERZIRANJA (PROMJENE SMJERA VRTNJE)



# 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-dinamički momenti ),**
- **Predugo trajanje zaleta motora i pogona**

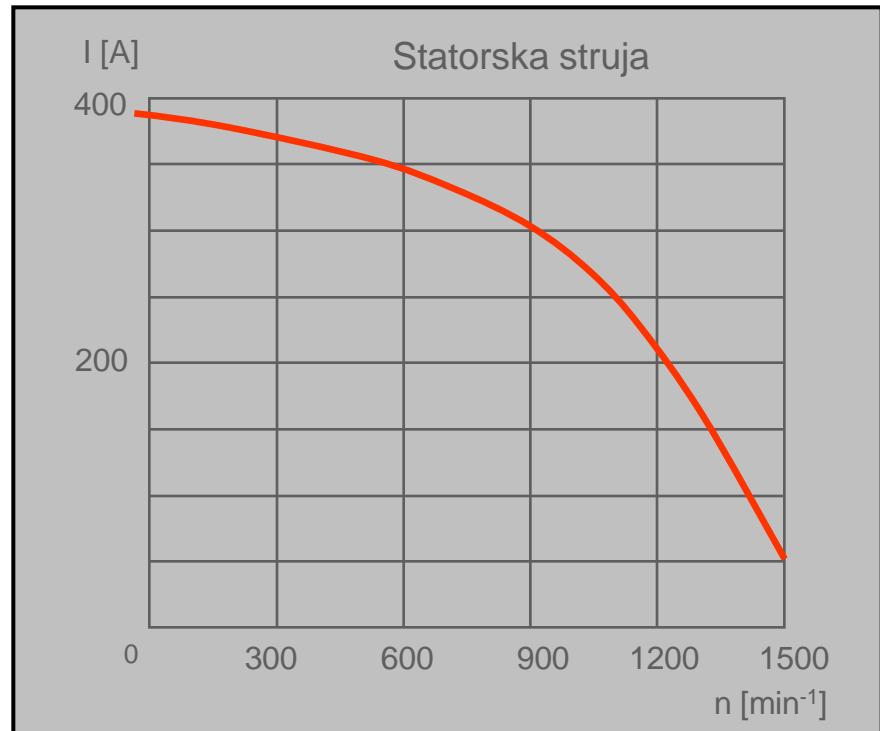
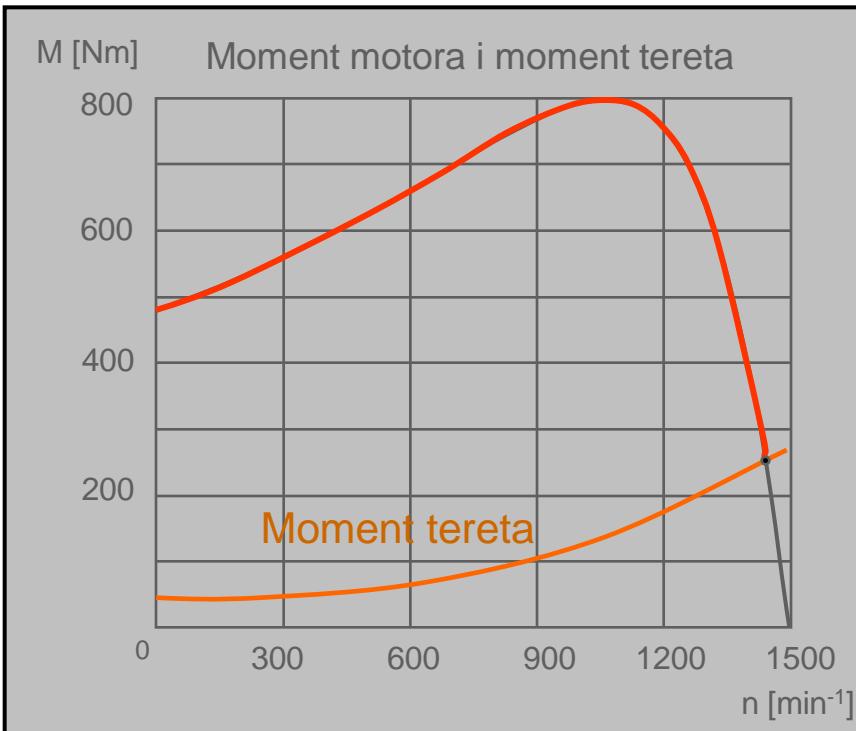
## 2. Tehnike pokretanja

Najčešće primjenjivane tehnike su:

- Pokretanje dorektnim priključkom na mrežu,
- Pokretanje zvijezda trokut preklopkom,
- Pokretanje preko autotransformatora,
- Pokretanje soft start uređajem,
- Pokretanjem pomoću frekvencijskog 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 – Direktni spoj 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

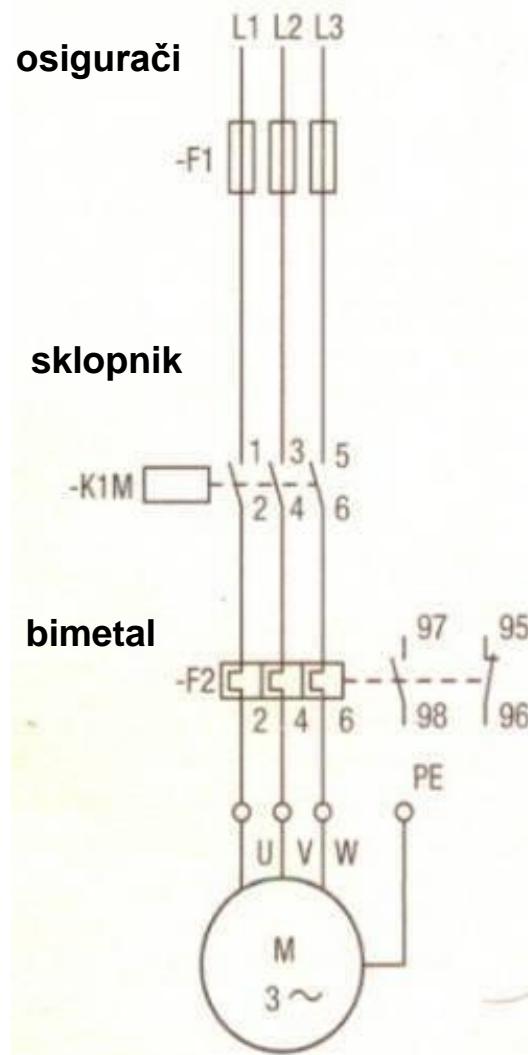
Pokretanje autotransformatorom

Shema

Pokretanje soft-start uređajem

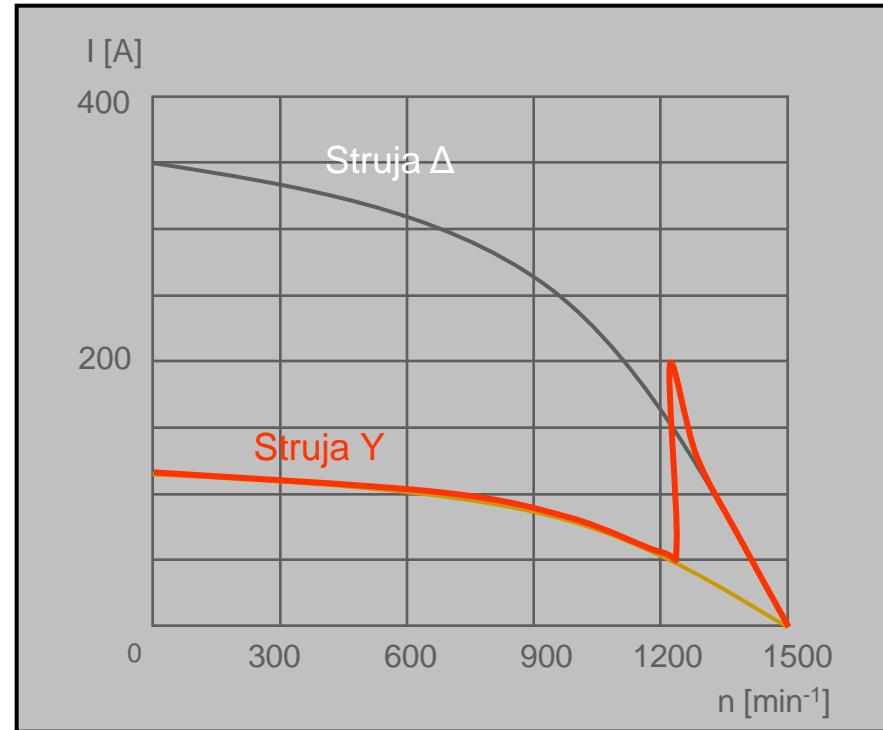
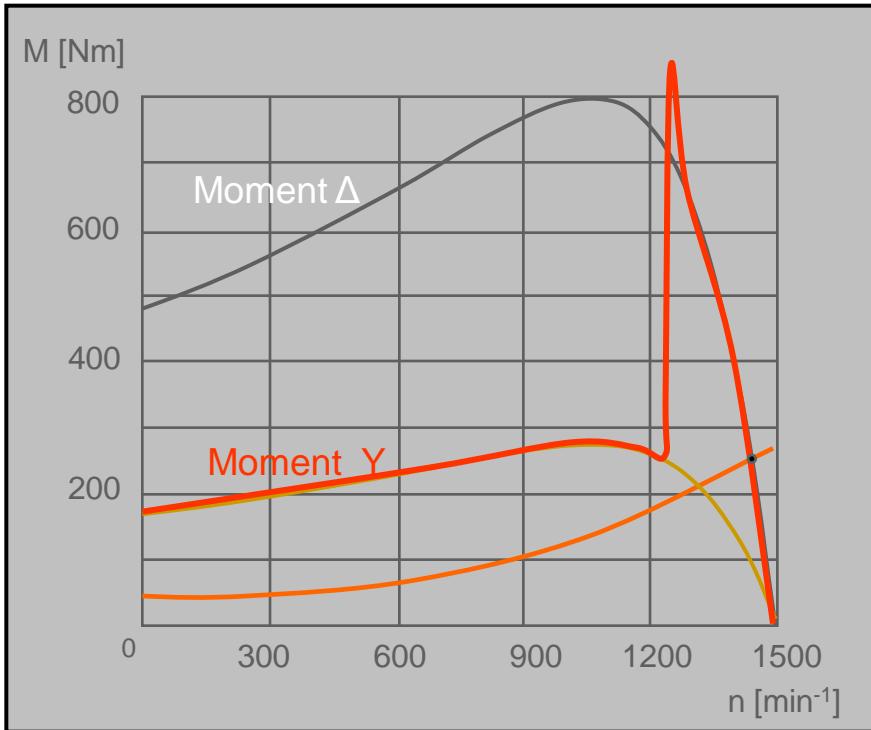
Nastavi prez.

# Spojna shema za pokretanje kavezognog asinkronog motora - direktnim priključkom na mrežu



Povratak

# Pokretanje kavezognog asinkronog motora preklopkom zvijezda - trokut



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

Direktni start

Pokretanje zvijezda - trokut

Pokretanje soft-start uređajem

U NAMOTU

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

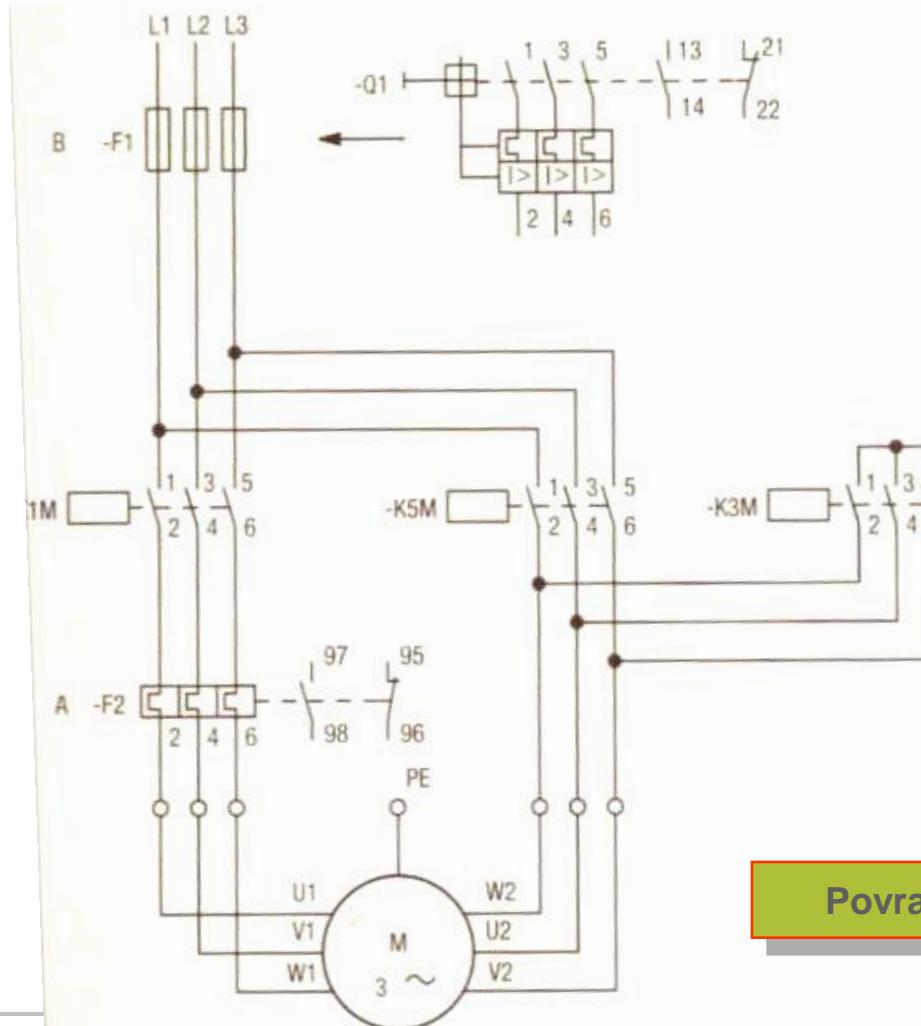
PREMA MREŽI

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

Shema

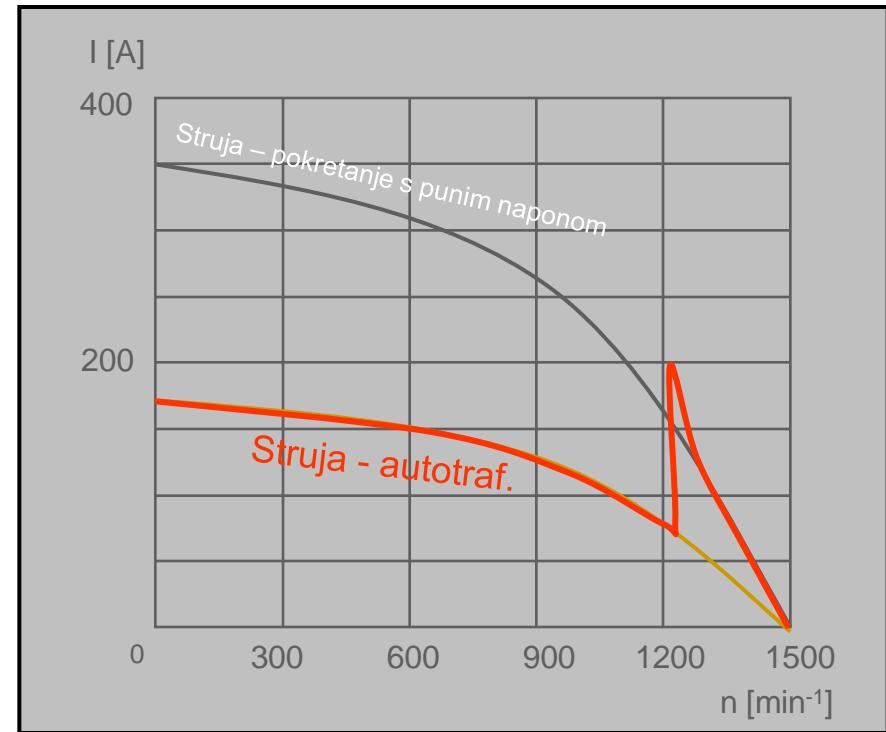
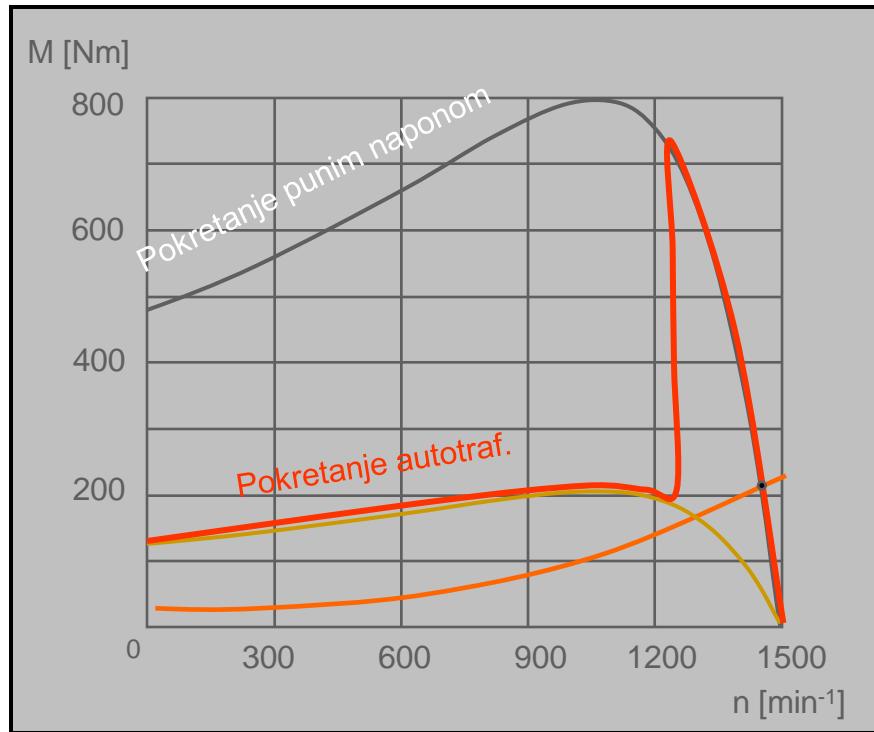
Nastavi prez.

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



Povratak

# Pokretanje kavezognog asinkronog motora – Autotransformatorom



Direktni start

Pokretanje zvijezda - trokut

Pokretanje soft-start uređajem

Pokretanje autotransformatorom

Shema

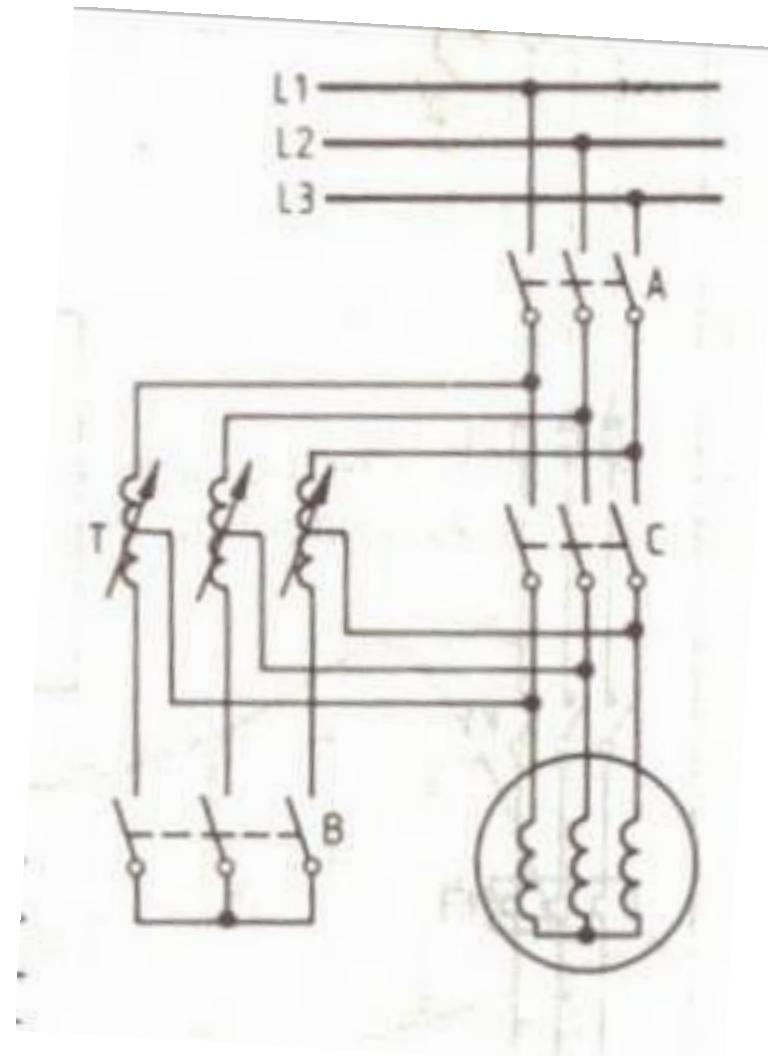
Nastavi prez.

# Pokretanje kaveznog asinkronog motora – Autotransformatorom

Potrebna su tri prekidača i autotrafo.  
Struja pokretanja se prilagodi mogućnostima mreže.

Pokretanje: zatvoreni prekidači (sklopke) A i B

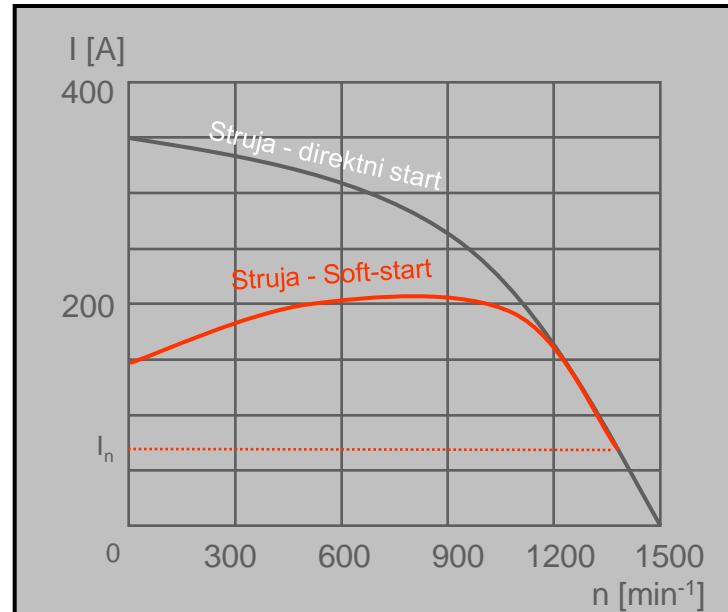
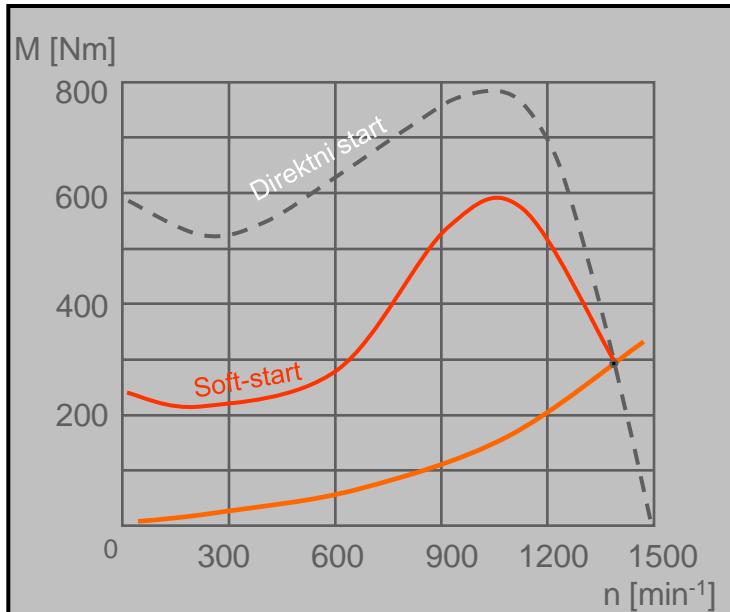
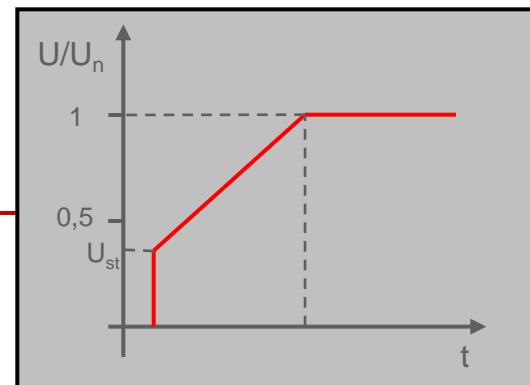
Normalni pogon: Zatvoreni prekidači A i C



Povratak

## “Soft start “ili lagano pokretanje

-Struja i napon tijekom zaleta bez strujnog limita



Direktni start

Pokretanje zvijezda - trokut

Pokretanje autotransformatorom

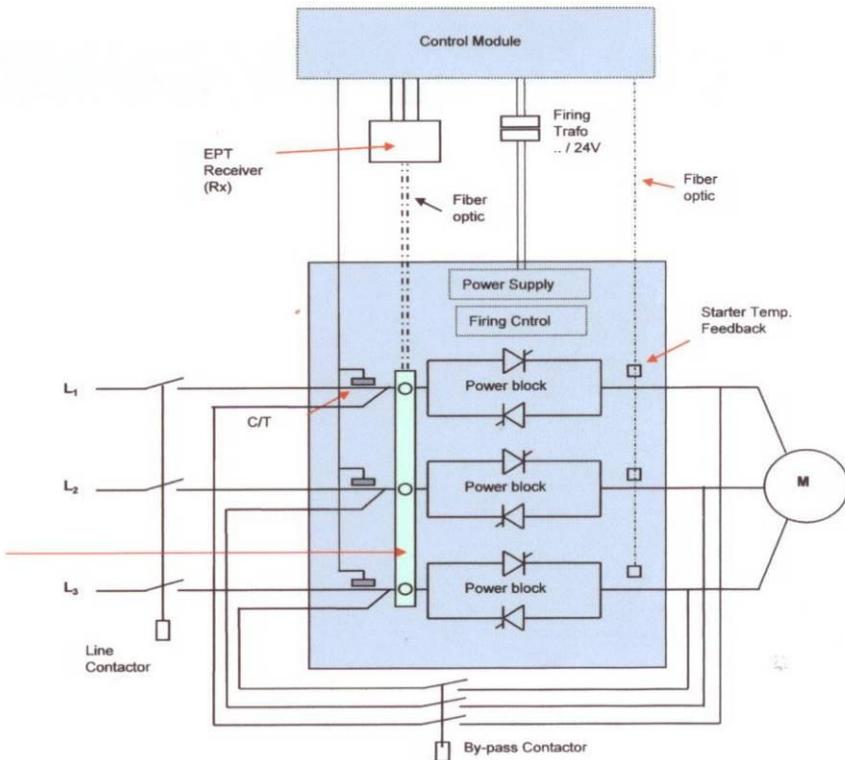
Pokretanje soft-start uređajem

Shema

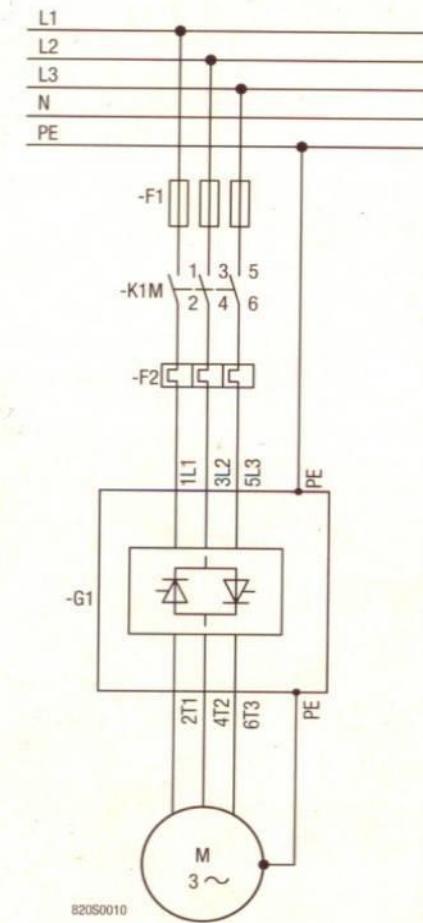
Nastavi prez.

# Pokretanje kaveznog 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



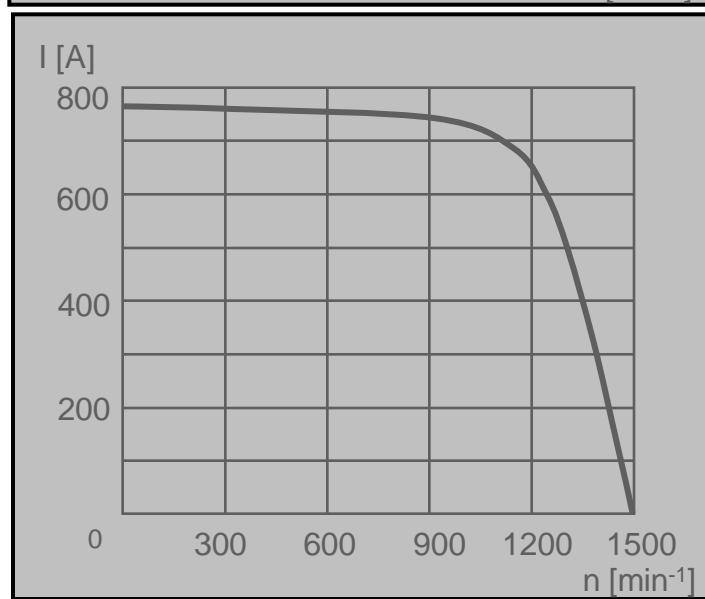
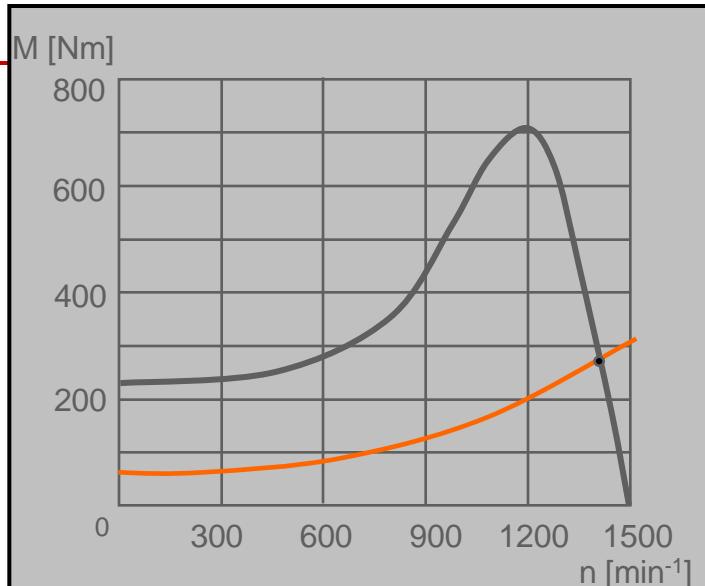
Soft start uređaj s “bajpas sklopnikom”



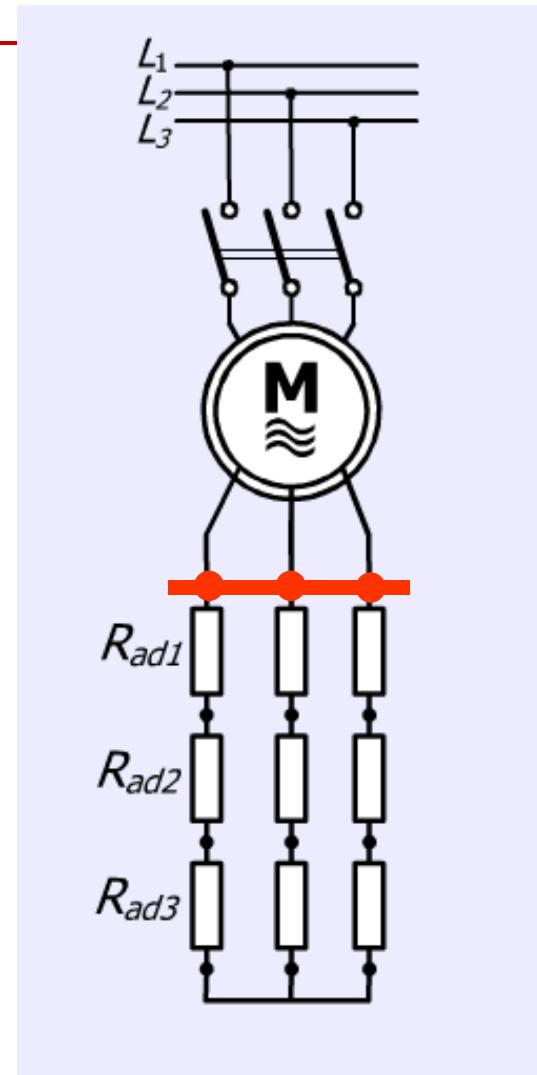
Priklučak na mrežu sa  
“Soft start” uređajem

Povratak

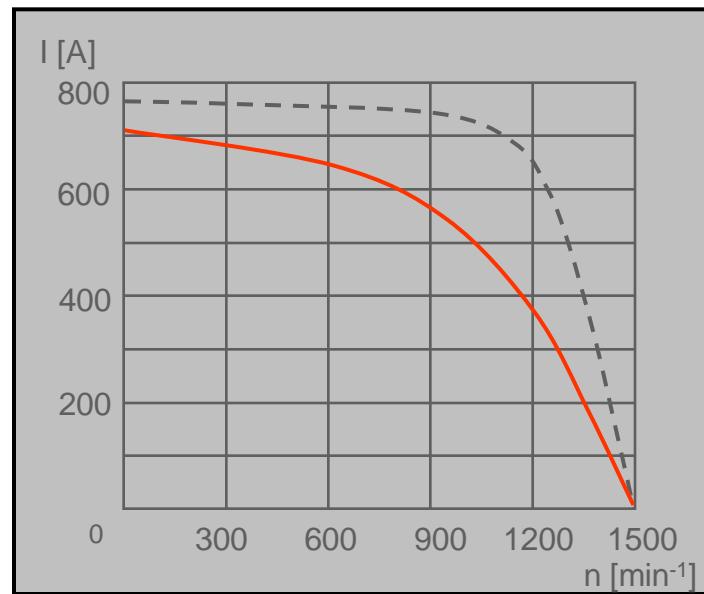
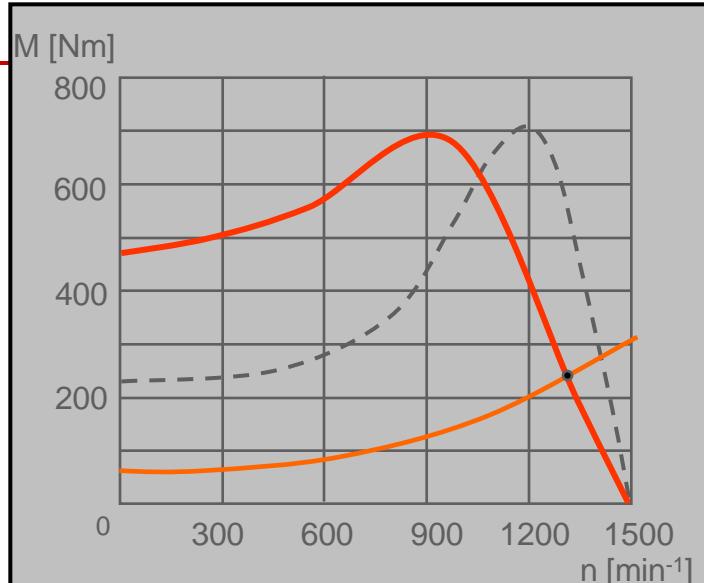
# Pokretanje klizno kolutnog asinkronog motora dodavanjem otpora u rotorski krug



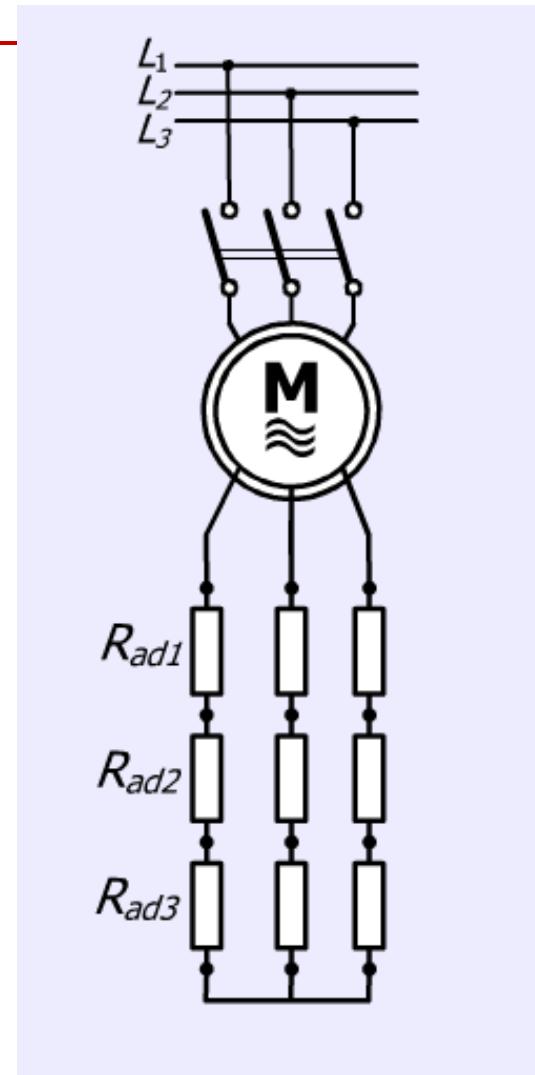
- R<sub>d</sub> = 0
- R<sub>d</sub> = Rad1
- R<sub>d</sub> = Rad1+Rad2
- R<sub>d</sub> = Rad1+Rad2+Rad3
- Nastavi prezentaciju



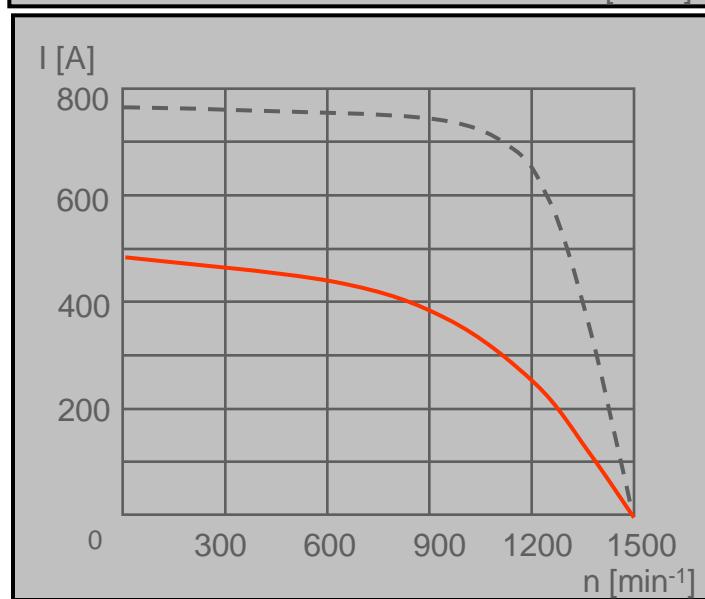
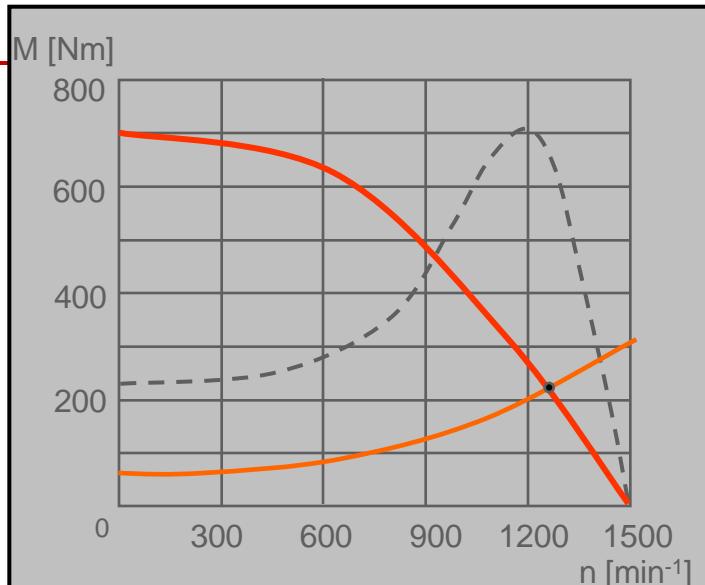
# Pokretanje klizno kolutnog asinkronog motora dodavanjem otpora u rotorski krug



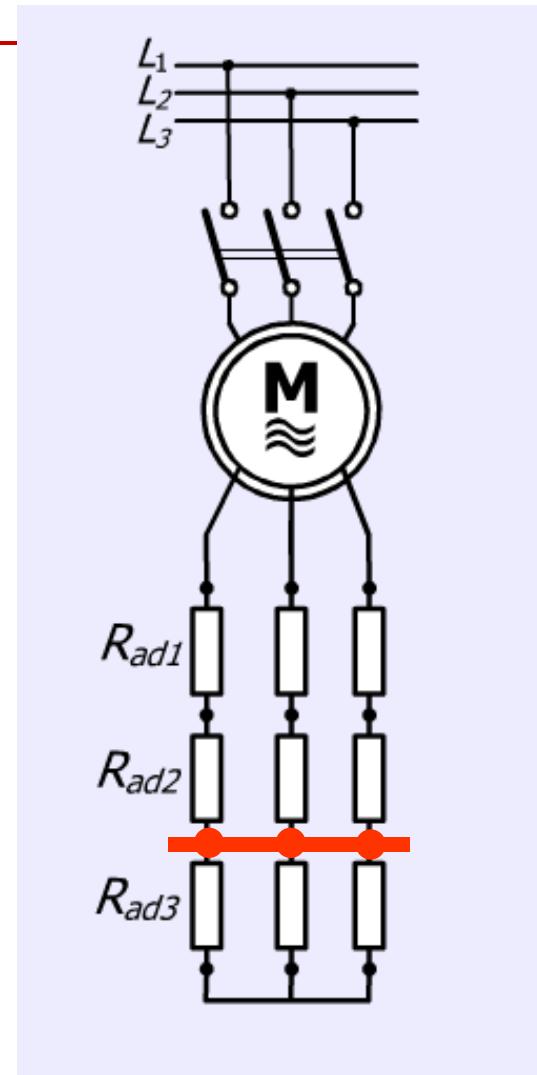
- R<sub>d</sub> = 0
- R<sub>d</sub> = Rad1
- R<sub>d</sub> = Rad1+Rad2
- R<sub>d</sub> = Rad1+Rad2+Rad3
- Nastavi prezentaciju



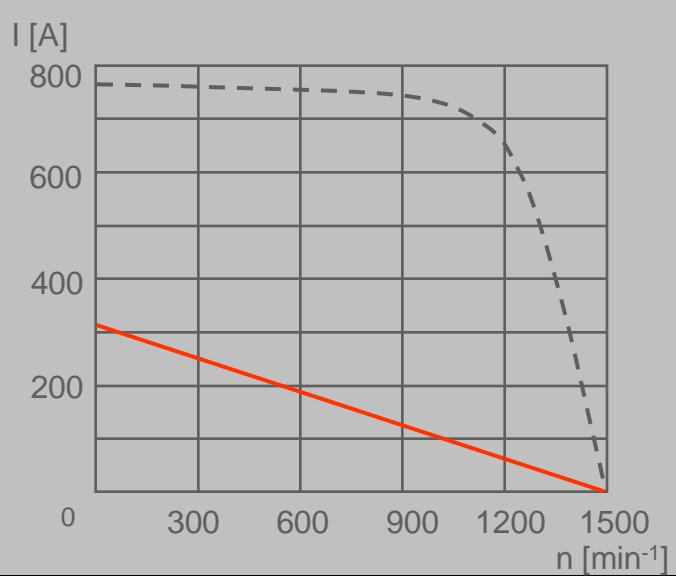
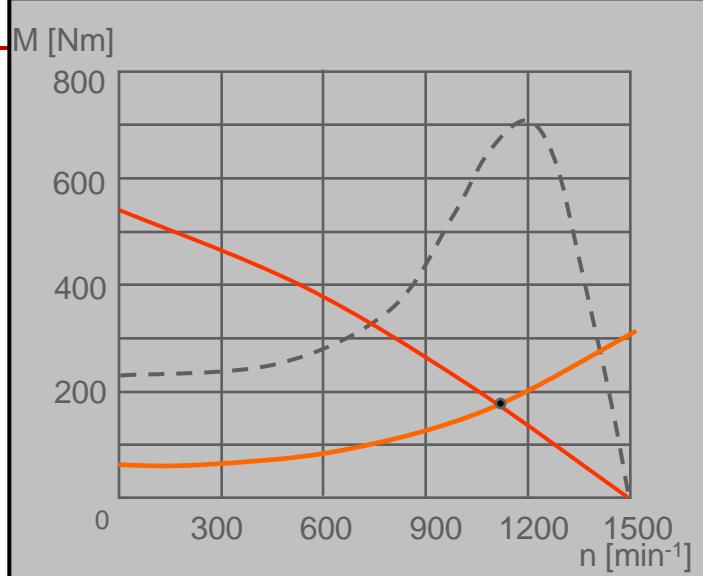
# Pokretanje klizno kolutnog asinkronog motora dodavanjem otpora u rotorski krug



- R<sub>d</sub> = 0
- R<sub>d</sub> = Rad1
- R<sub>d</sub> = Rad1+Rad2
- R<sub>d</sub> = Rad1+Rad2+Rad3
- Nastavi prezentaciju



# Pokretanje klizno kolutnog asinkronog motora dodavanjem otpora u rotorski krug



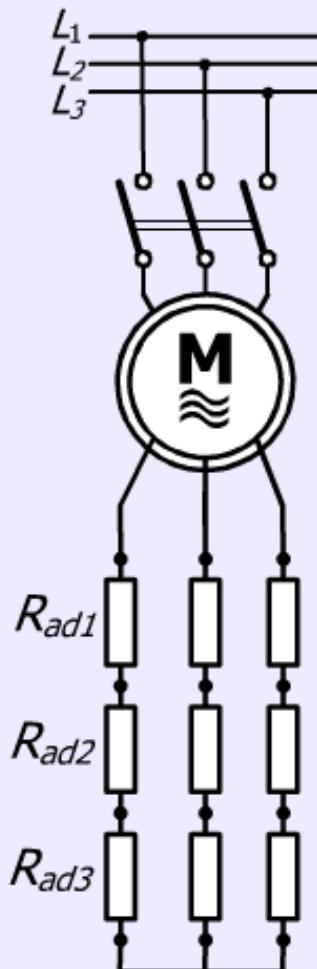
$R_d = 0$

$R_d = \text{Rad1}$

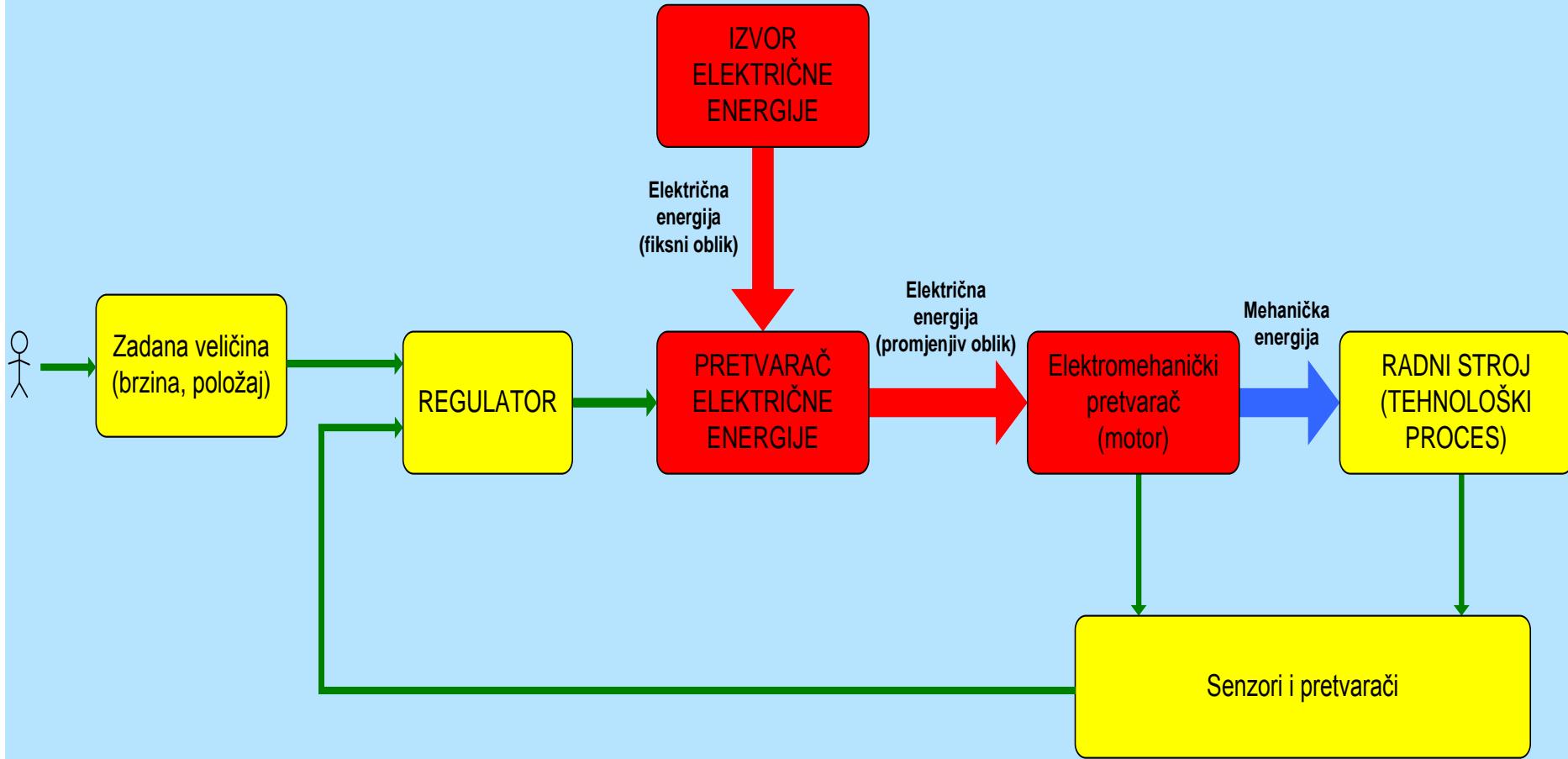
$R_d = \text{Rad1+Rad2}$

$R_d = \text{Rad1+Rad2+Rad3}$

[Nastavi prezentaciju](#)



# ELEKTROMOTORNI POGON- SUSTAV ZA PRETVORBE ELEKTRIČNE U ELEKTROMEHANIČKU ENERGIJU



# Regulacija brzine vrtnje asinkronog motora

---

- Brzina vrtnje motora je:

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

i ona se može regulirati (namještati) promjenom frekvencije  $f_1$ , broja pari polova p i promjenom klizanja s

- Mijenjanje brzine promjenom broja pari polova je moguće samo u grubim iznosima,  
Npr.: za  $f = 50$  Hz

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

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

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

Često se koristi u praksi i to najčešće kod primjene u stroju za pranje rublja. Motor sadrži dva namota, npr. jedan ima  $2p=2$ , a drugi  $2p=12$  (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:

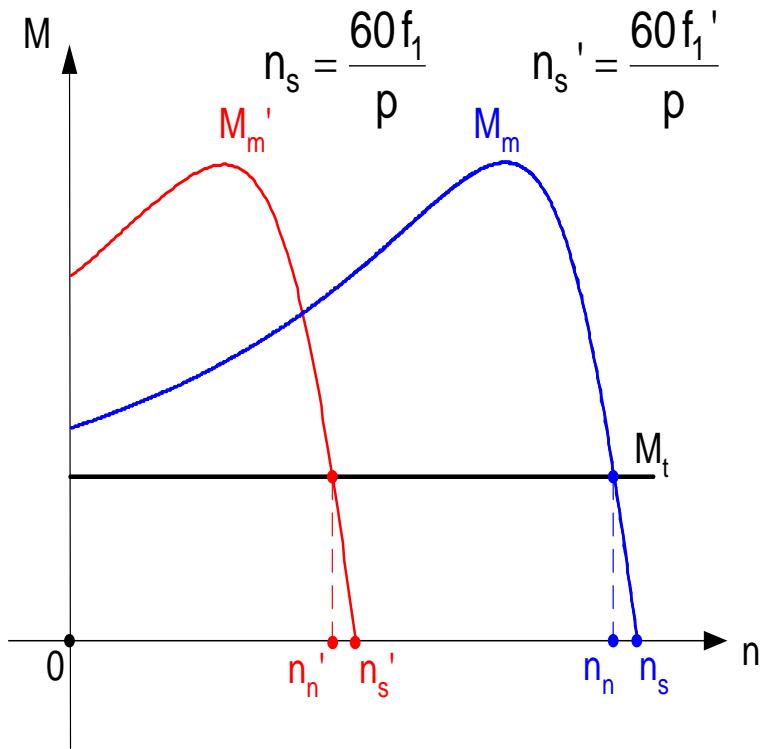
- brzina vrtnje radnih mehanizama,
- moment vrtnje,
- položaj (pozicija).

Najčešće se regulira brzina vrtnje

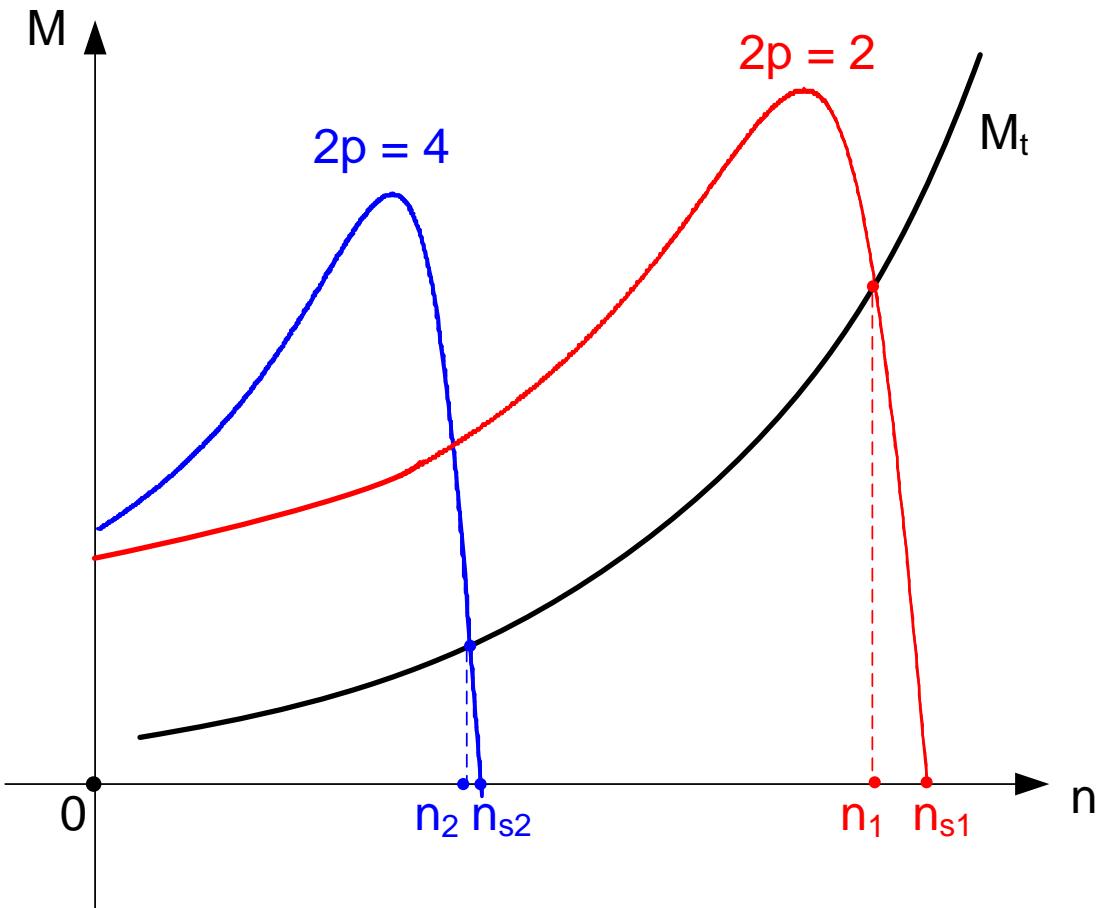
Da li će se regulirati brzina zbog ušteda energije, ovisi o tehničko-ekonomskim uvjetima (cijena energije - povrat investicije)

# 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  $n_{reg}$ . 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:

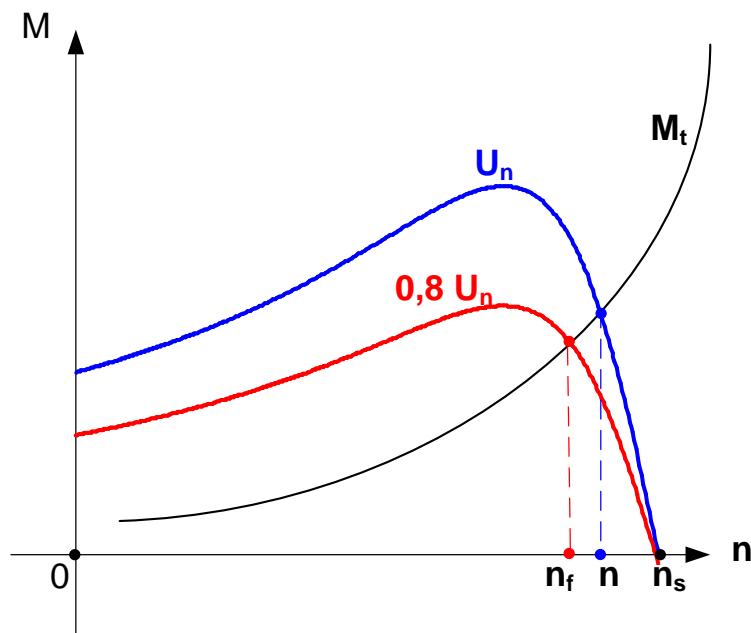


Primjer karakteristika polno preklopivog motora:  
 $2p = 4$  i  $2p = 2$

Preklapanje polova se može ostvariti sa dva ili više galvanski odvojenih namota u motoru ili jednim namotom izvedenim iz dva jednakaka 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 kako 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 direktno je proporcionalna frekvenciji:  $n = \frac{60f_s}{p}(1-s)$

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

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

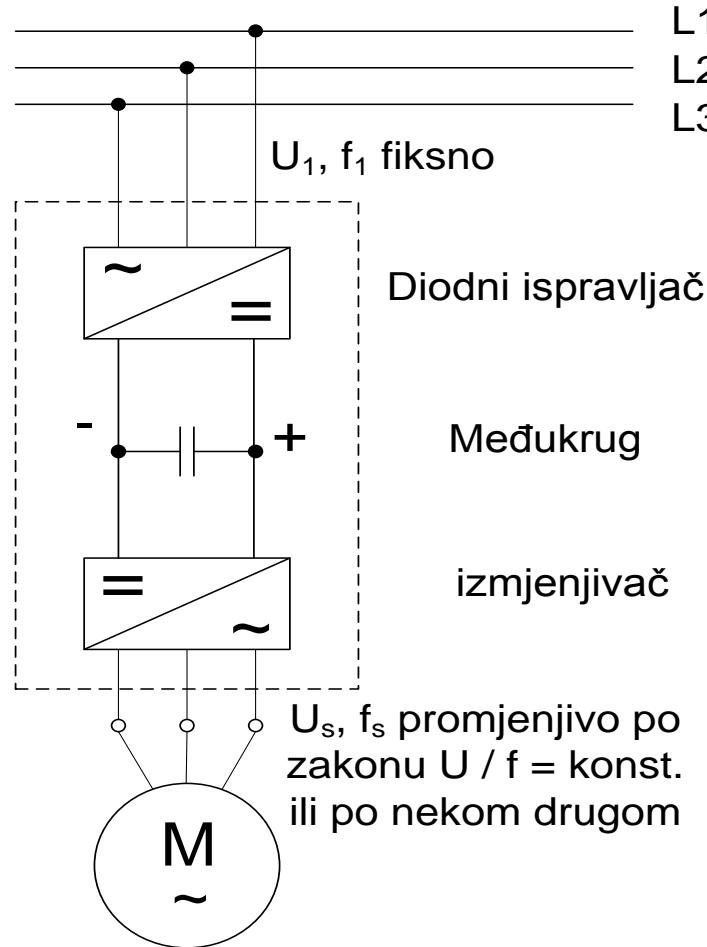
$\underbrace{\phantom{4,44}}$

$$\Phi$$

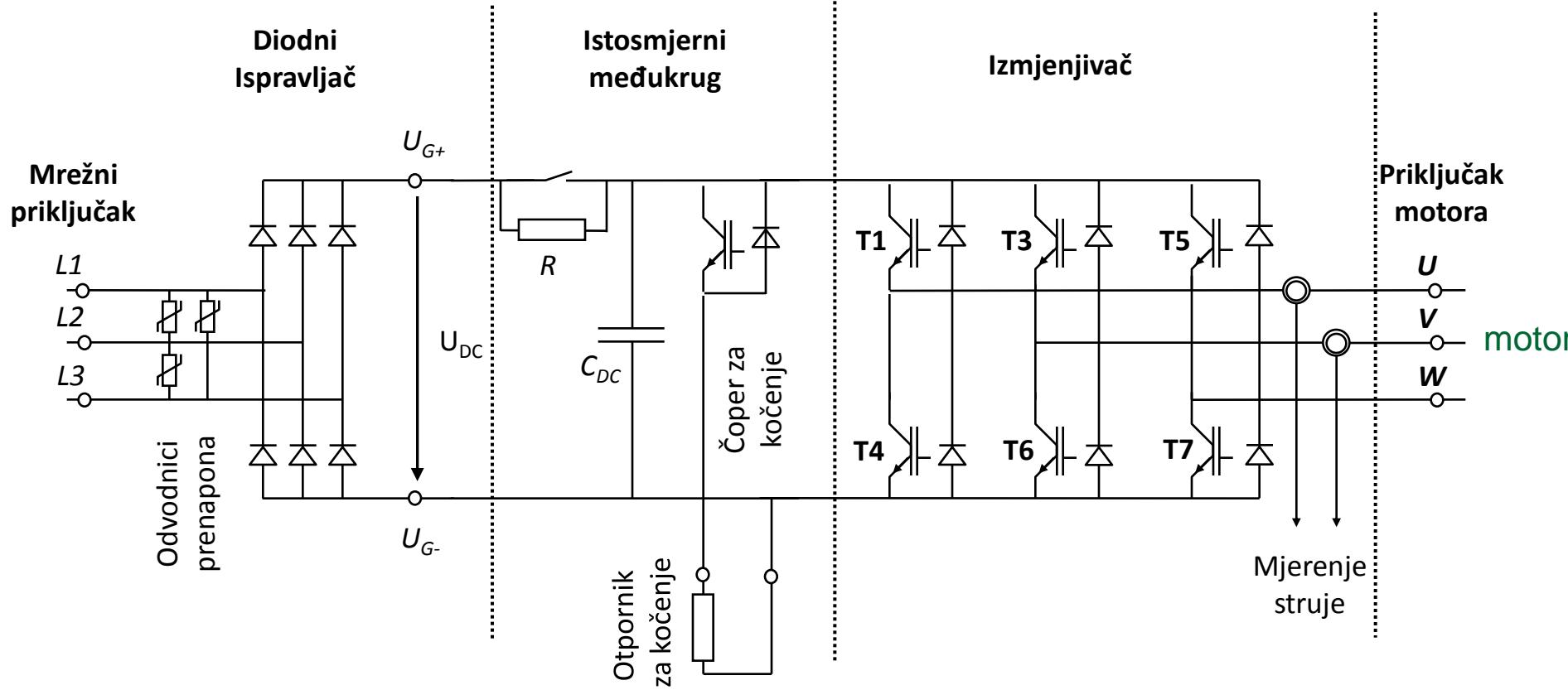
Promjenimo li frekvenciju  $f_1$  ne mijenjajući napon, doći će do promjena indukcije B odnosno mag. toka  $\Phi$ . Povećanje B nije moguće zbog zasićenja mag. kruga, a smanjenjem  $\Phi$  (pri povećanju  $f_1$ ) smanjuje se moment motora što opet nije dozvoljeno. Zbog toga se regulira po zakonu:

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

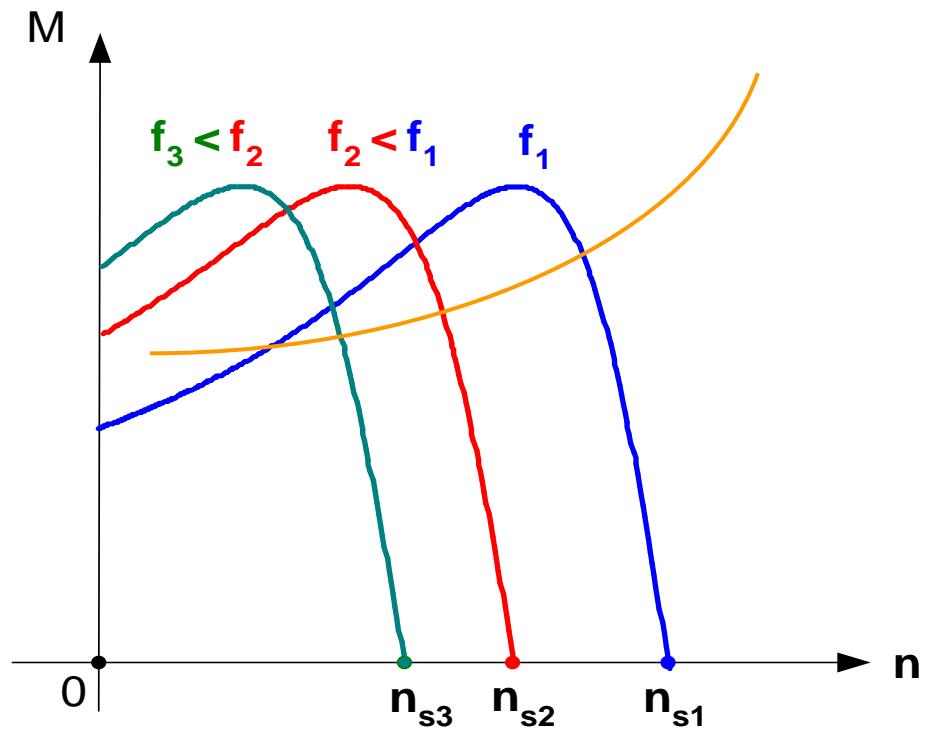
# Principna shema spoja asinkronog motora i pretvarača frekvencije na izmjeničnu mrežu



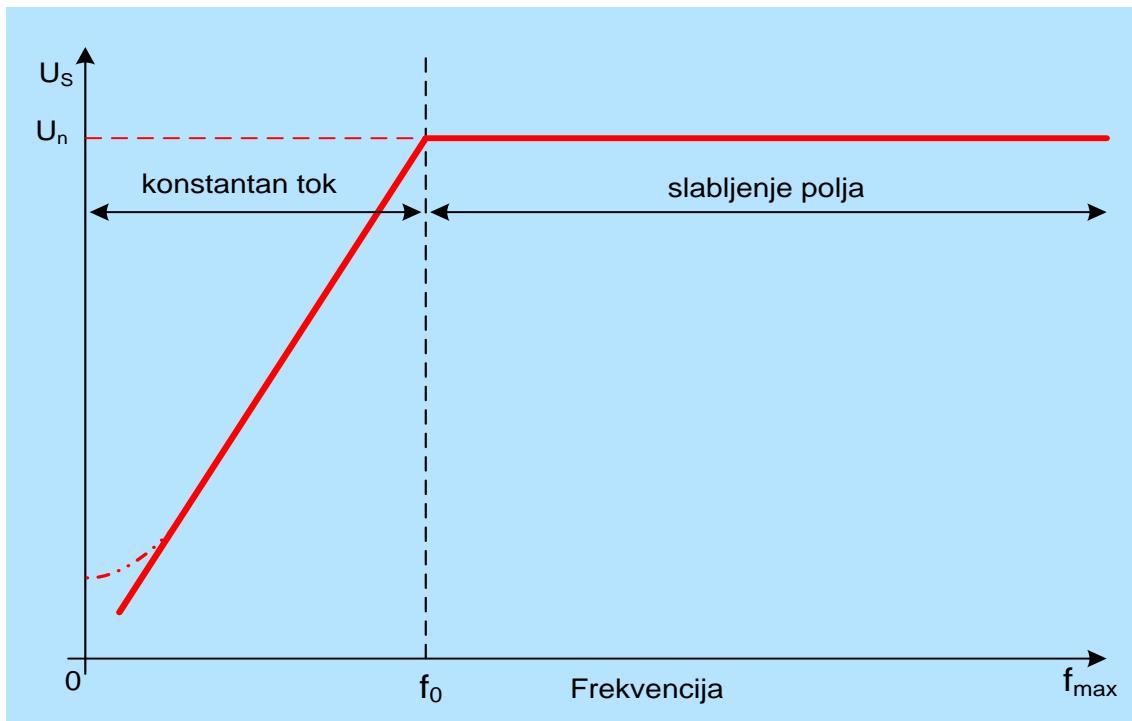
# Tipična struktura pretvarača frekvencije za asinkroni motor

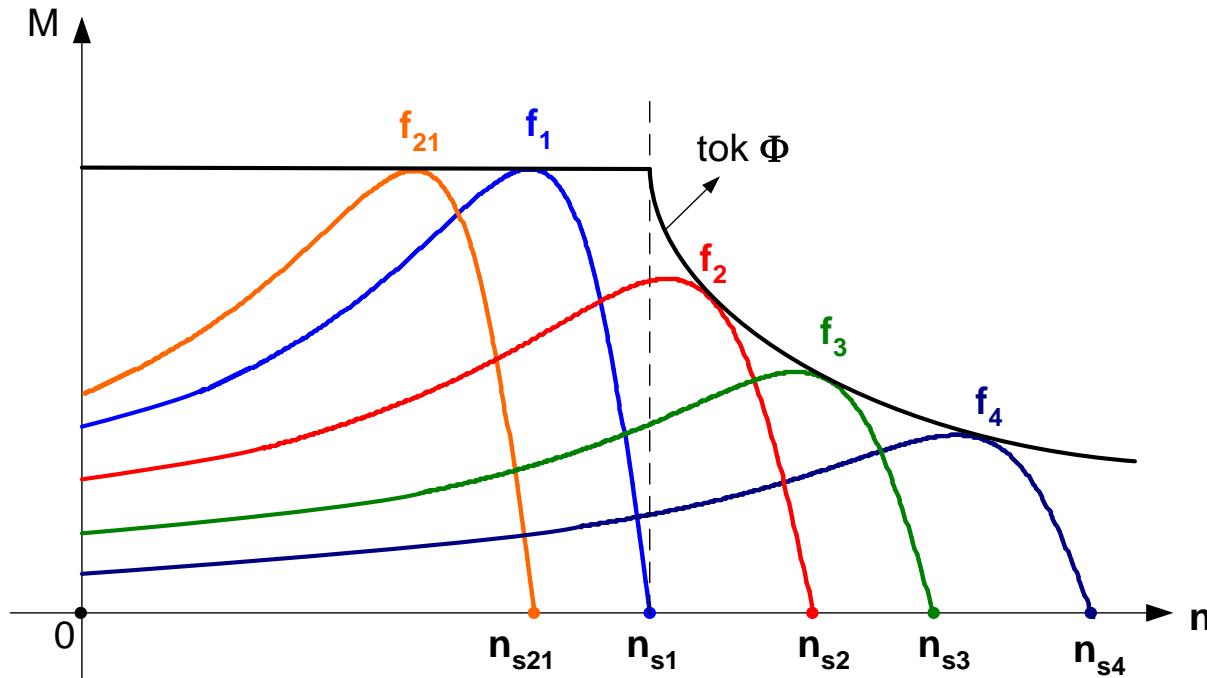


Istovremeno treba mijenjati napon i frekvenciju. Pri takvoj promjeni, koja se zove **skalarna regulacija**, momentne karakteristike izgledaju prema slici:



# Promjena frekvencije pri skalarnoj regulaciji asinkronog motora

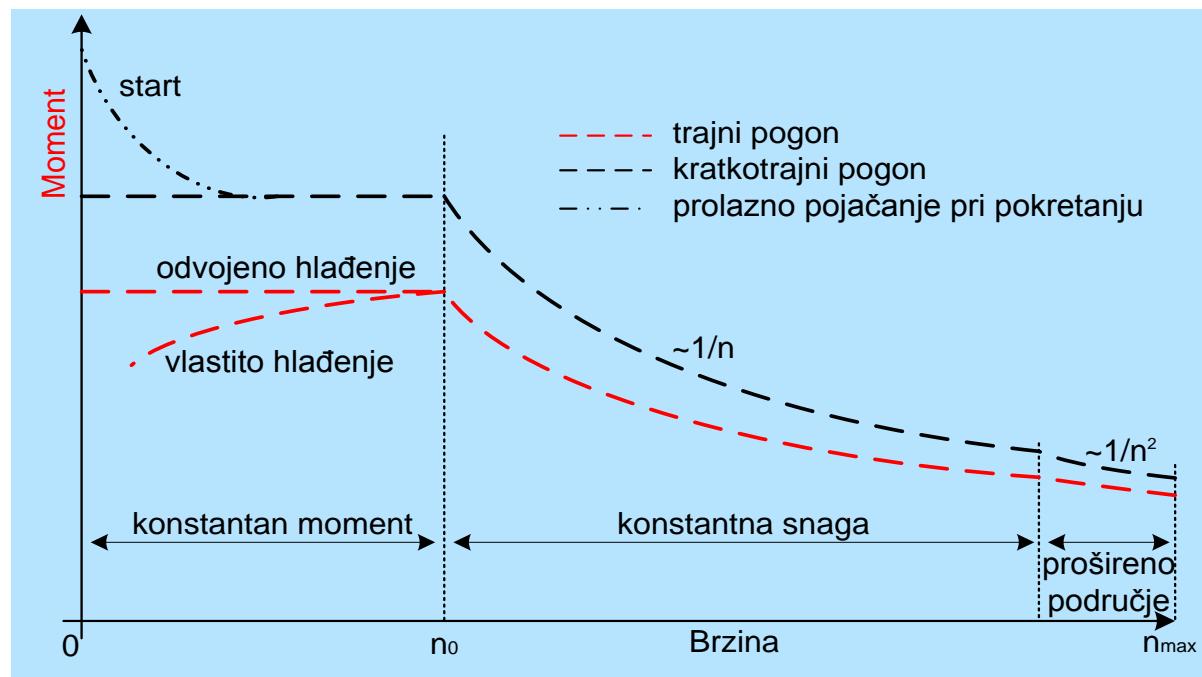




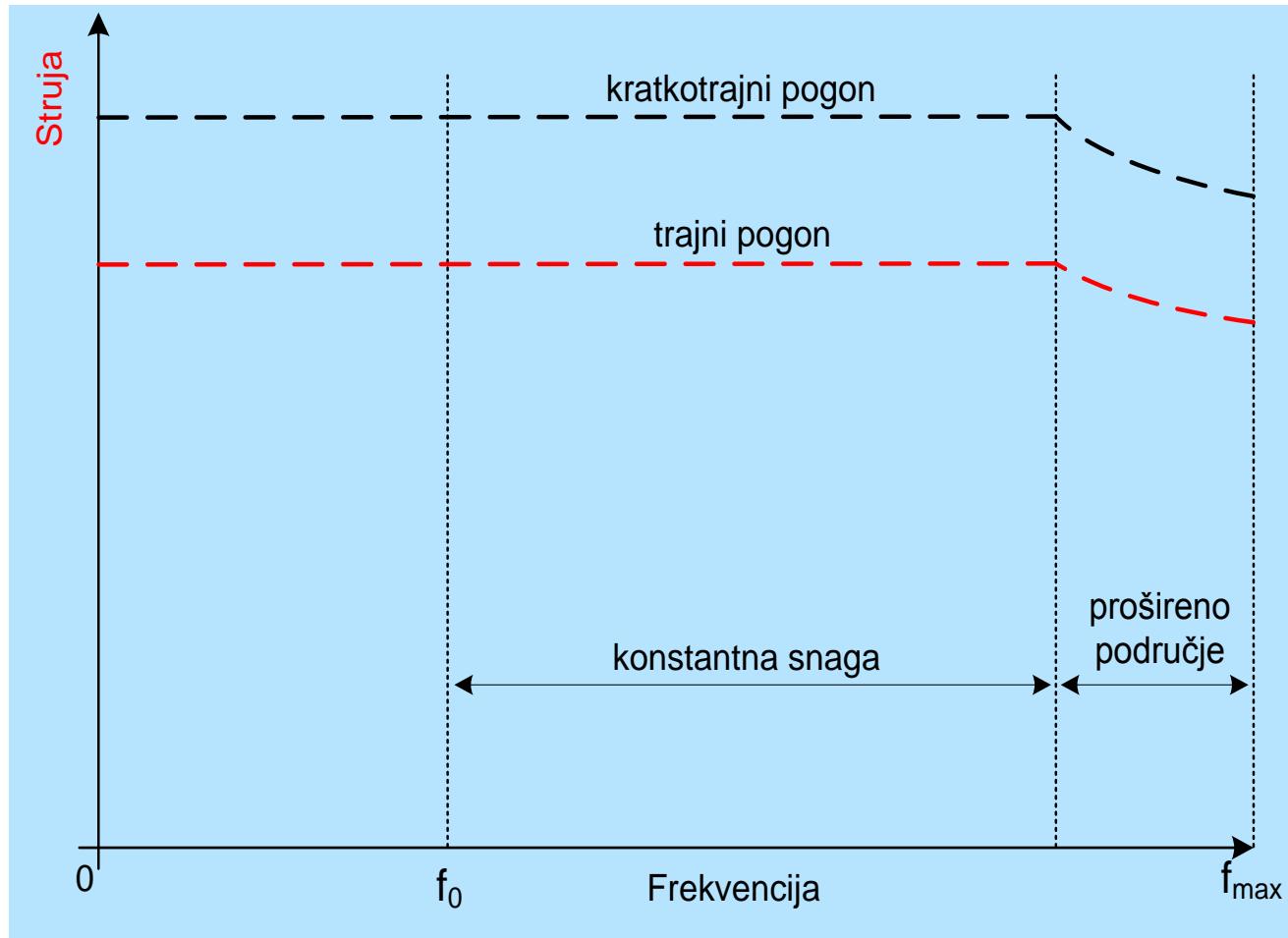
$f_1$  je osnovna frekvencija za koju je građen motor. Smanjivanje frekvencije  $f_1$ , daje nacrtanu karakteristiku  $U_{21} / f_{21} = \text{konst.}$ , tj. smanjen je napon i frekvencija u odnosu  $U / f = \text{konst.}$

Povećanje frekvencije  $f_1$  na  $f_2$  nije moguće po zakonu  $U / f = \text{konst.}$  jer je i 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 mag. toka**

# Ovisnost momenta motora o frekvenciji i načinu hlađenja pri skalarnoj regulaciji



# Dozvoljene veličine struje pri kratkotrajnom i trajnom pogonu reguliranog motora



# ZNAČAJ ELEKTROMOTORNIH POGONA

---

- U razvijenim zemljama svijeta se **60-65%** sve proizvedene električne energije pretvara u mehanički rad posredstvom elektromotornih pogona ( industrija, transport, domaćinstvo,.....)
- Elektromotorni pogoni mogu biti regulirani ili neregulirani
- Smatra se da je 10-15 % reguliranih pogona

# 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.

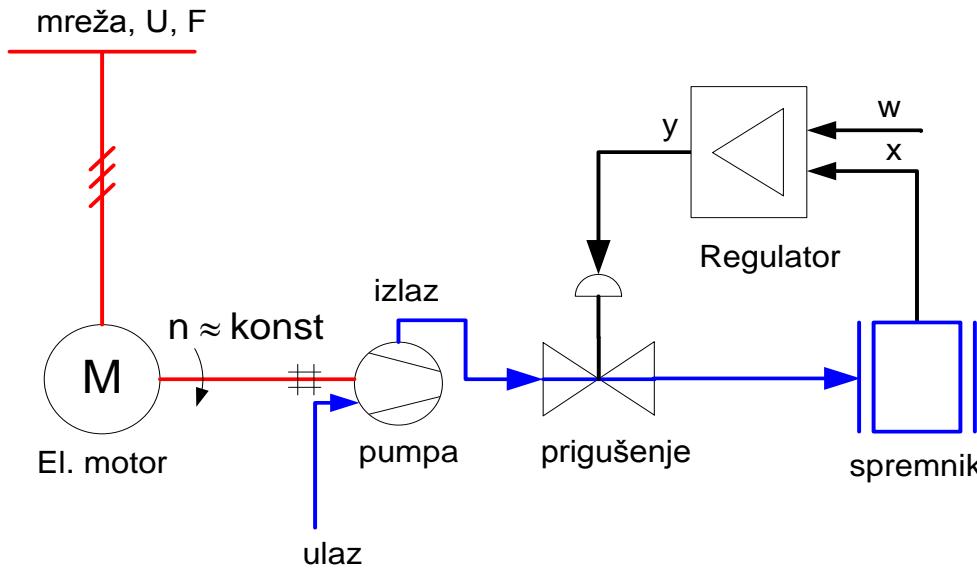
# Regulacija pogona zbog ušteda energije

---

- Najveće uštede električne energije mogu se postići reguliranim pogonom centrifugalnih pumpi, ventilatora i kompresora koji su potopterećeni 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.

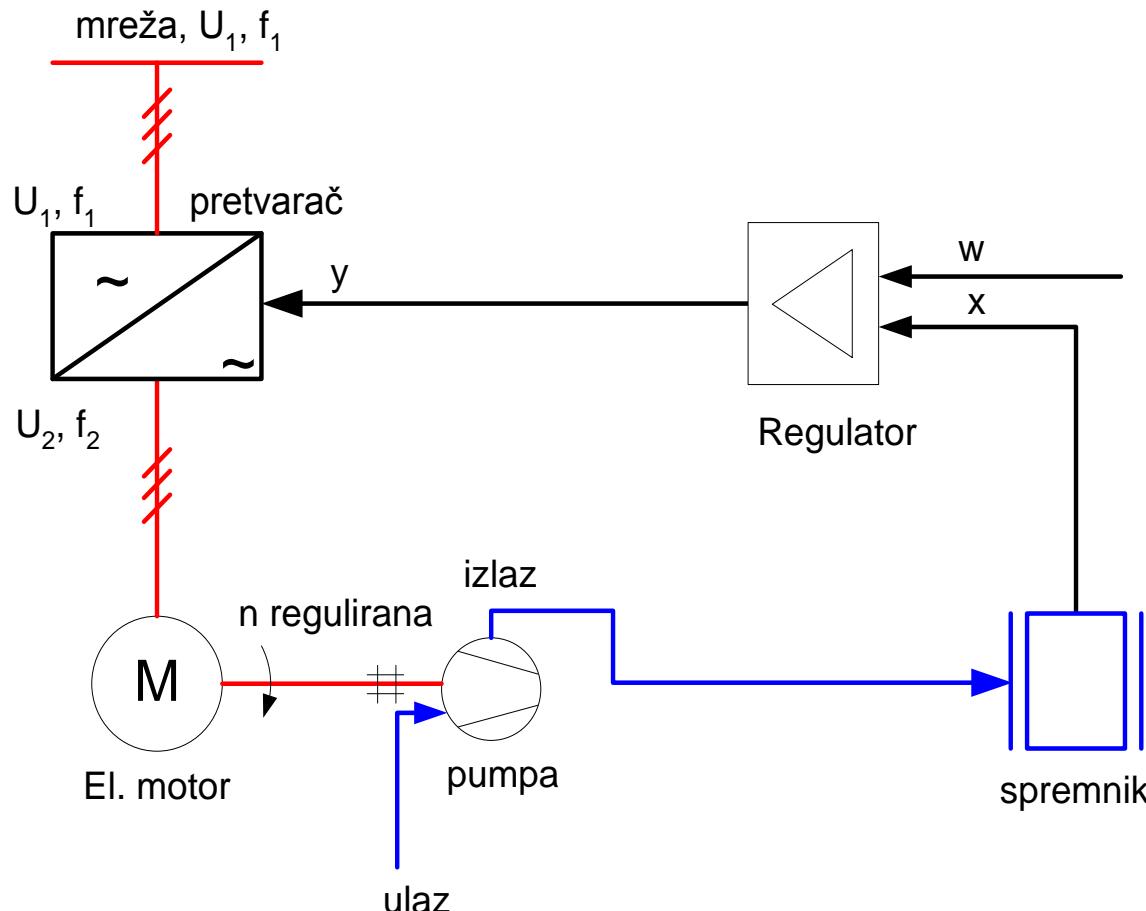
# Regulacija protoka nekog medija

- U nereguliranim elektromotornim pogonima protok medija  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{sec}$ ) 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.



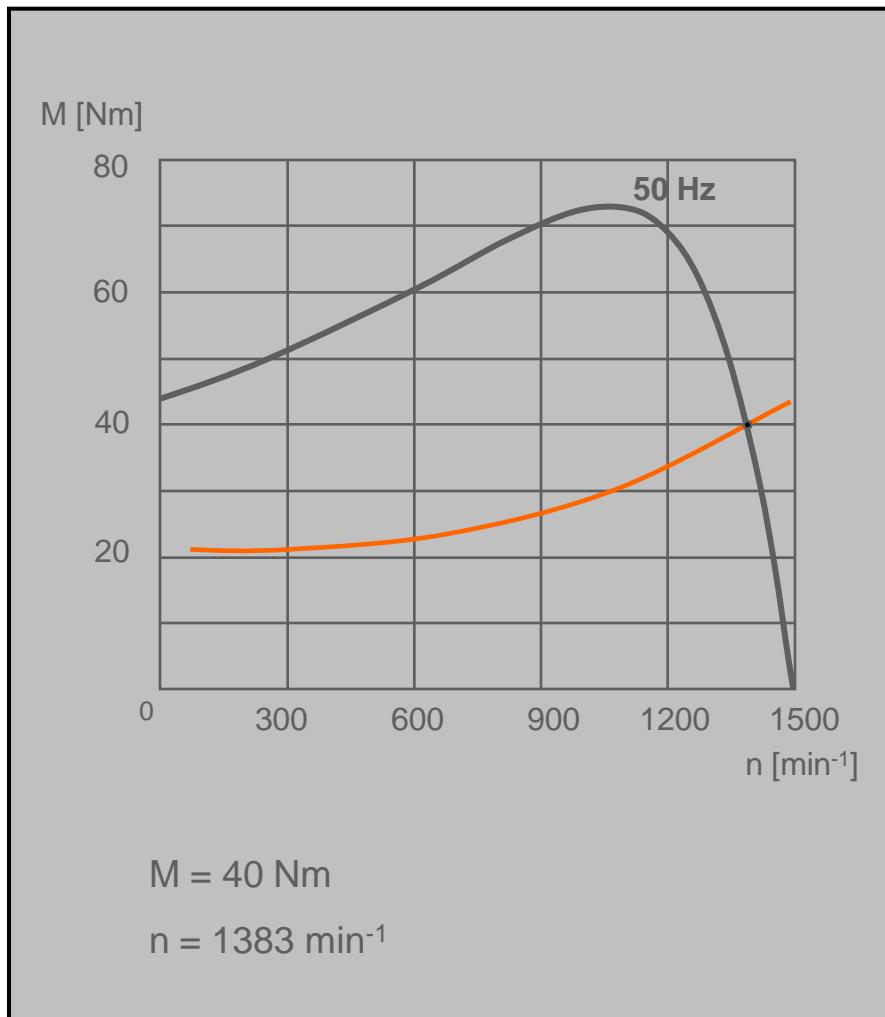
Sl. 1. EMP bez mogućnosti regulacije brzine vrtnje elektromotora, protok se regulira prigušenjem na ulazu u spremnik medija

# Regulacija protoka medija brzinom 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 frekvencije



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

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

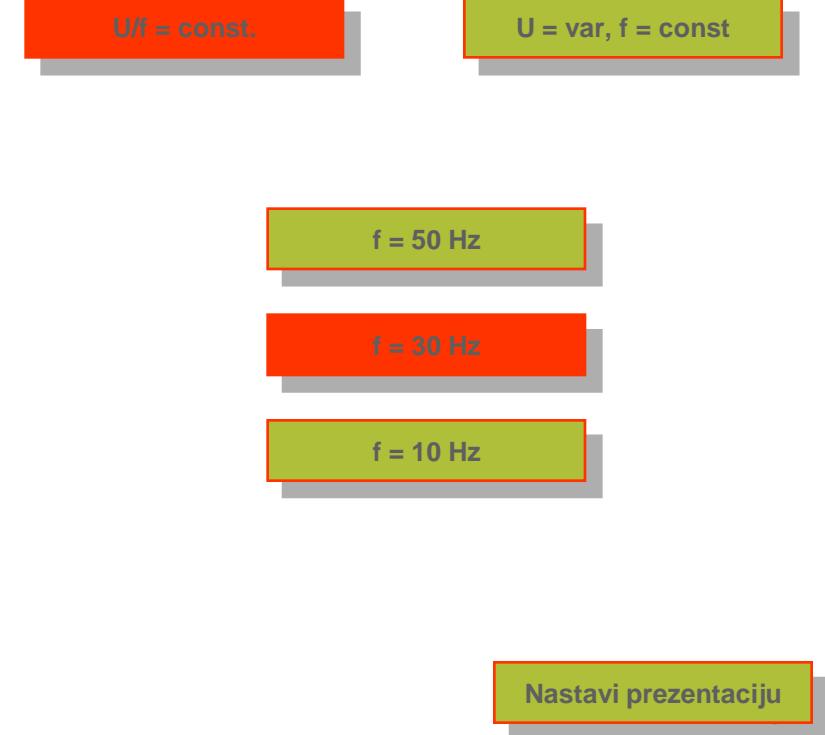
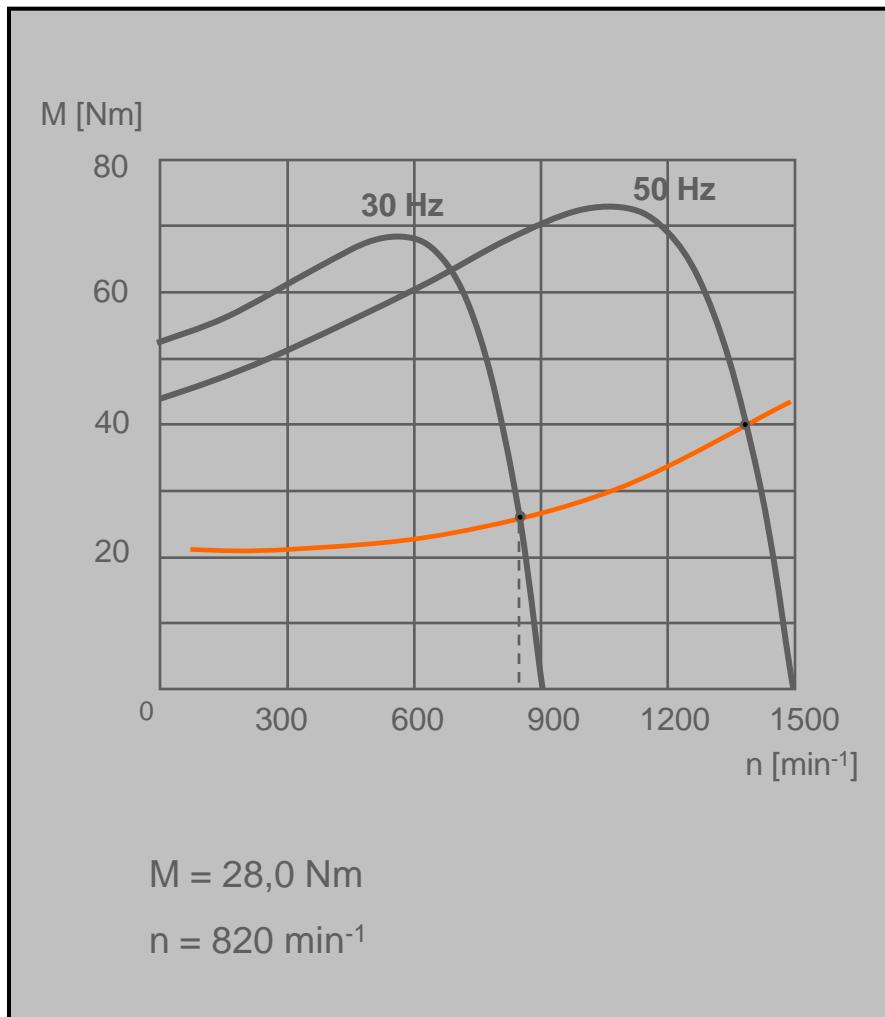
$f = 50 \text{ Hz}$

$f = 30 \text{ Hz}$

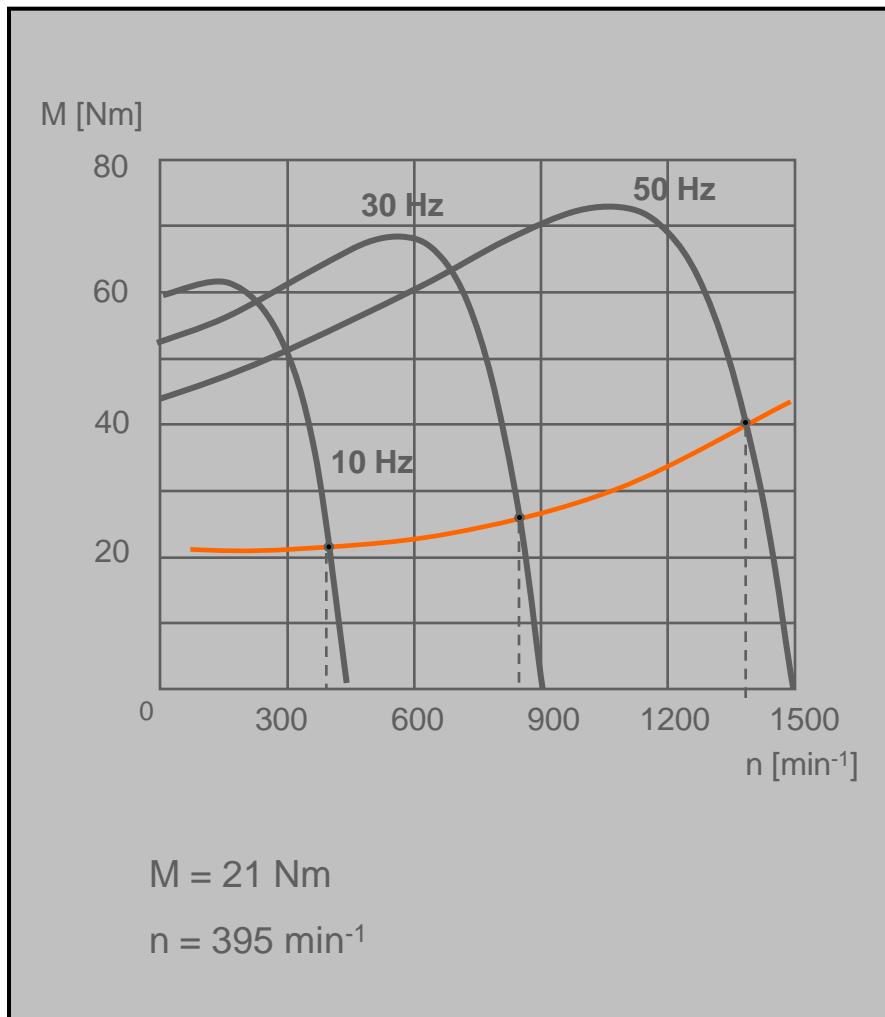
$f = 10 \text{ Hz}$

Nastavi prezentaciju

# Regulacija (namještanje) brzine vrtnje asinkronog motora promjenom frekvencije



# Regulacija (namještanje) brzine vrtnje asinkronog motora promjenom frekvencije



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

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

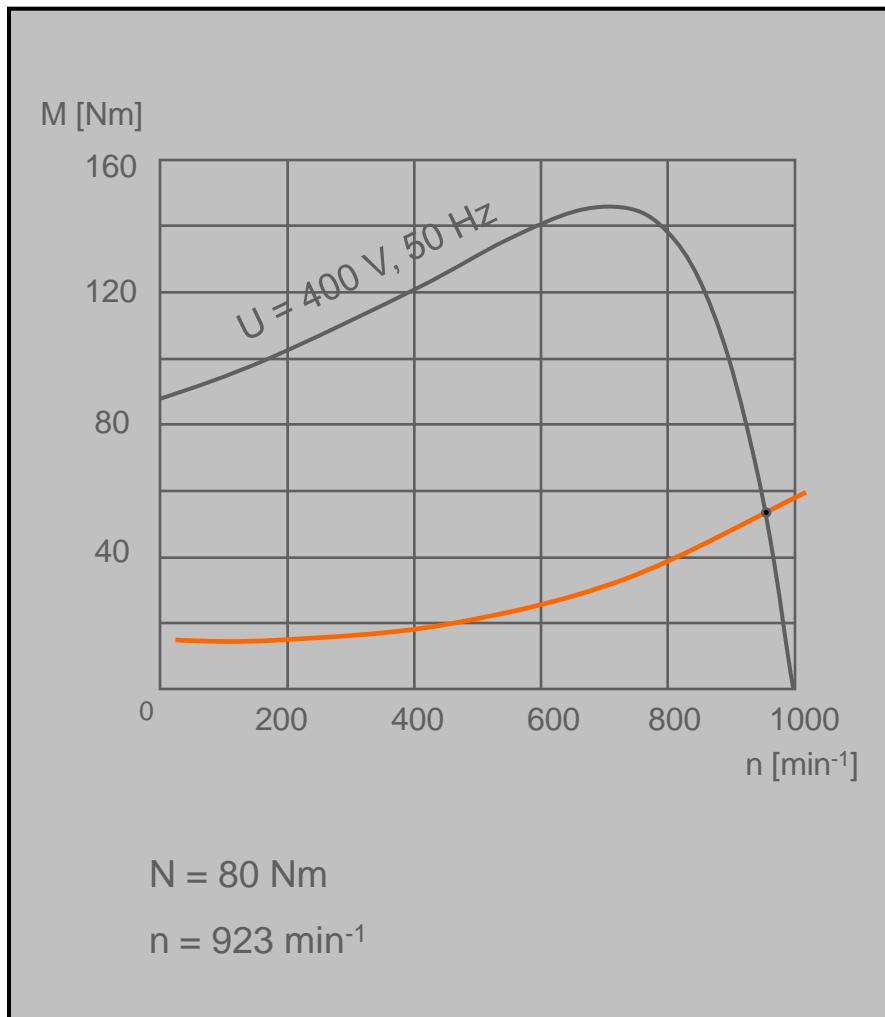
$f = 50 \text{ Hz}$

$f = 30 \text{ Hz}$

$f = 10 \text{ Hz}$

Nastavi prezentaciju

# Regulacija (namještanje) brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona



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

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

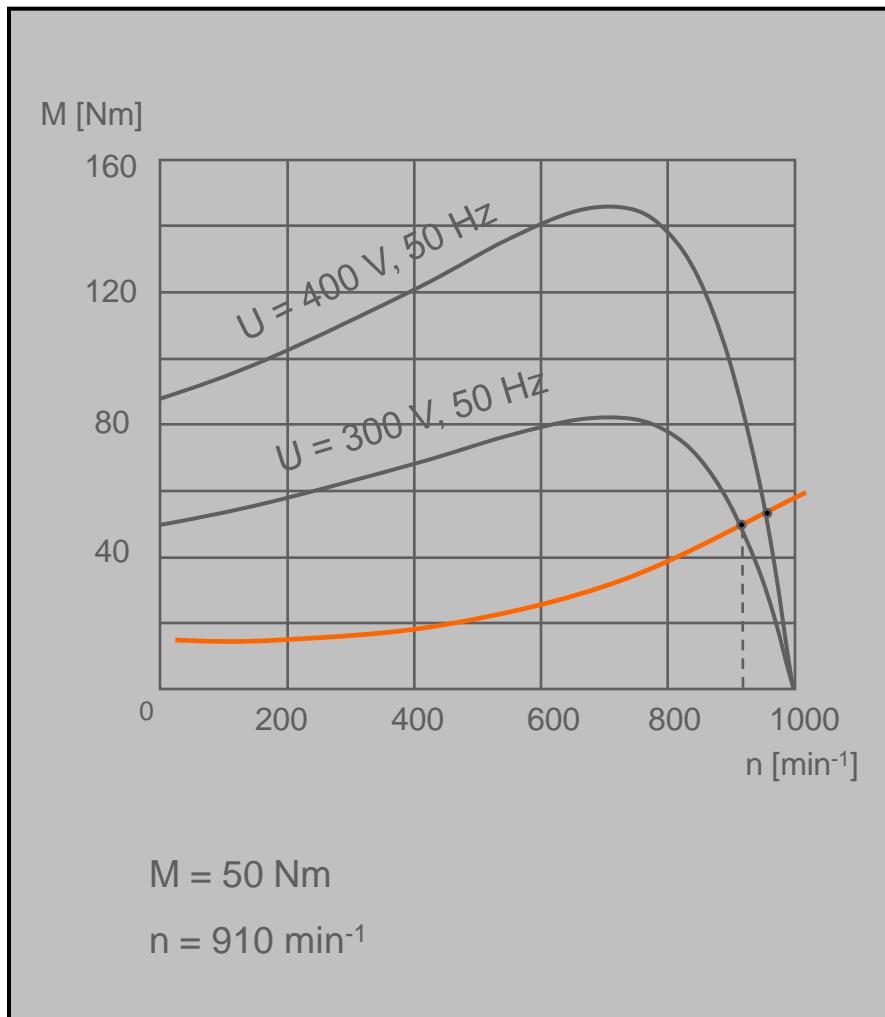
$U = 400 \text{ V}$

$U = 300 \text{ V}$

$U = 200 \text{ V}$

[Nastavi prezentaciju](#)

# Regulacija (namještanje) brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona



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

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

$U = 400 \text{ V}$

$U = 300 \text{ V}$

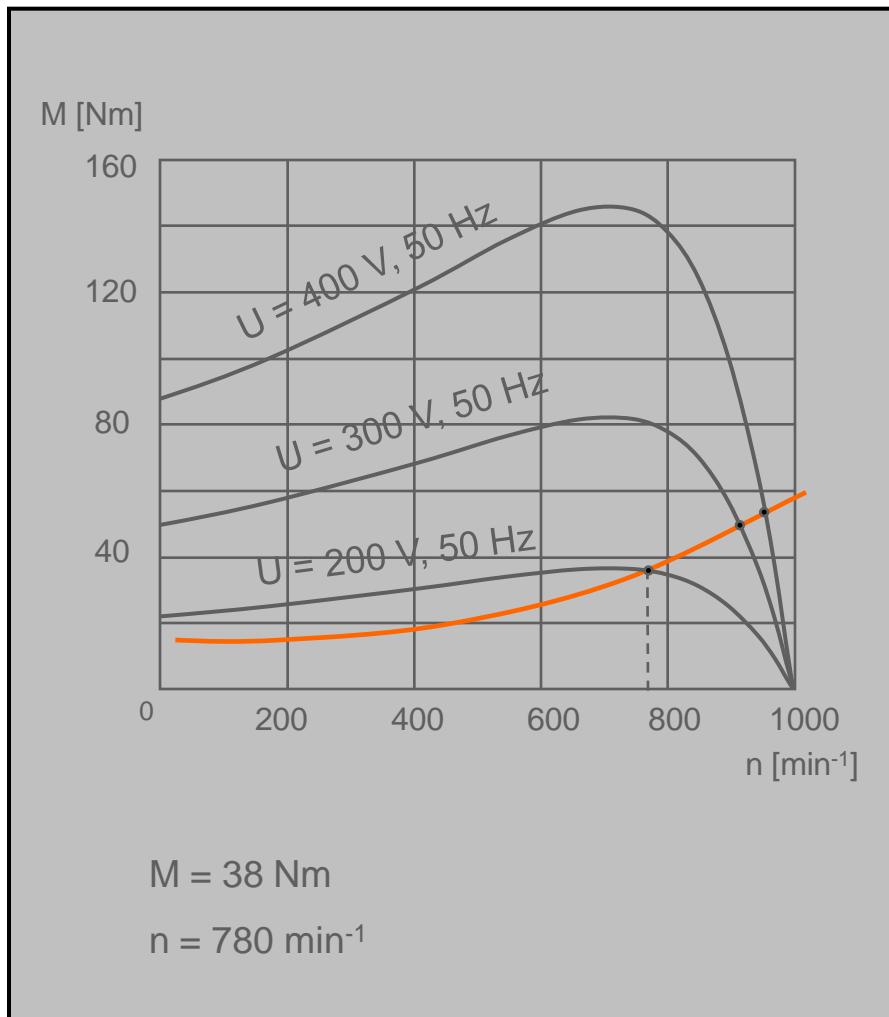
$U = 200 \text{ V}$

Nastavi prezentaciju

$M = 50 \text{ Nm}$

$n = 910 \text{ min}^{-1}$

# Regulacija (namještanje) brzine vrtnje asinkronog motora promjenom napona



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

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

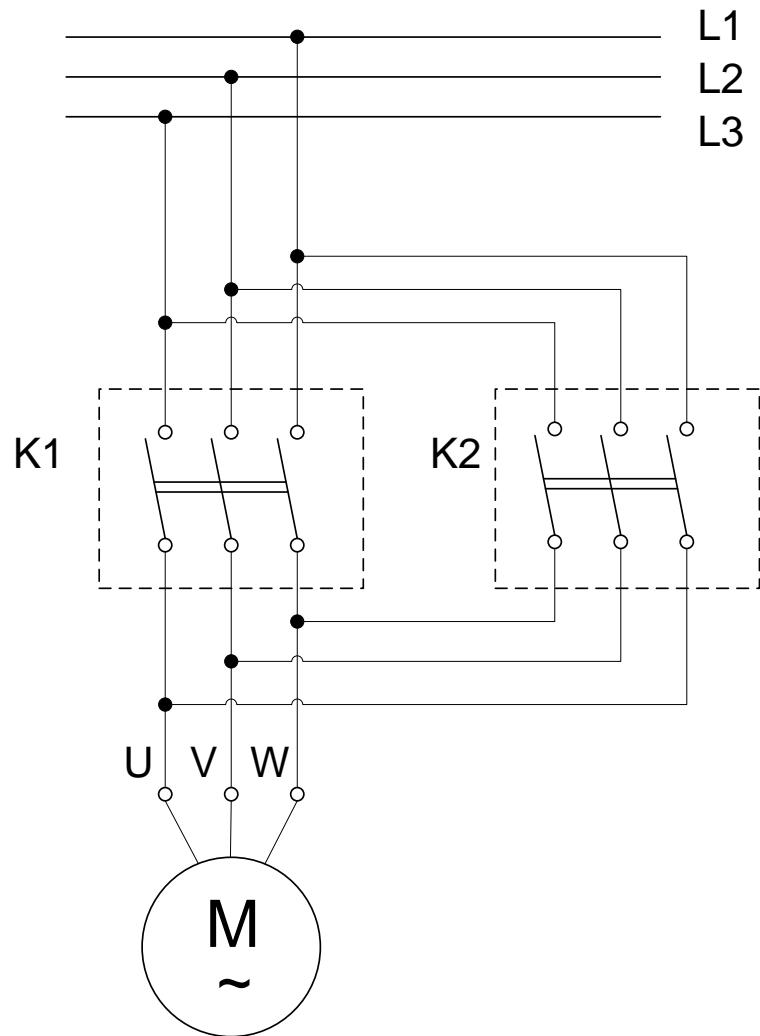
$U = 400 \text{ V}$

$U = 300 \text{ V}$

$U = 200 \text{ V}$

Nastavi prezentaciju

# Promjena smjera vrtnje asinkronog trofaznog motora



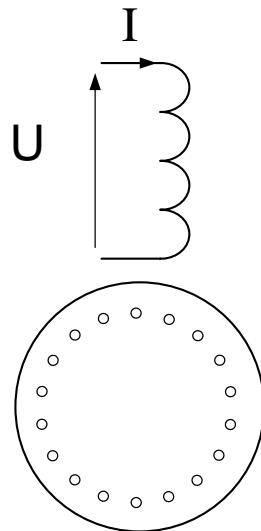
- Smjer vrtnje okretnog polja određen je redoslijedom faza. Želimo li ga promijeniti, dovoljno je međusobno zamijeniti priključke 2 od 3 fazna namota trofaznog motora. To se obično radi primjenom kontaktora (sklopnika).
- U, V i W – oznake stezaljki motora
- L1, L2 i L3 – oznake faza mreže
- K1 i K2 – kontaktori (skloplnici)

---

# JEDNOFAZNI ASINKRONI MOTOR

# Jednofazni asinkroni motor

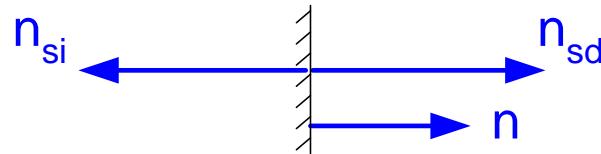
To je obično kavezni motor koji ima samo jedan namot na statoru te se priključuje na jednofazni izmjenični namot.



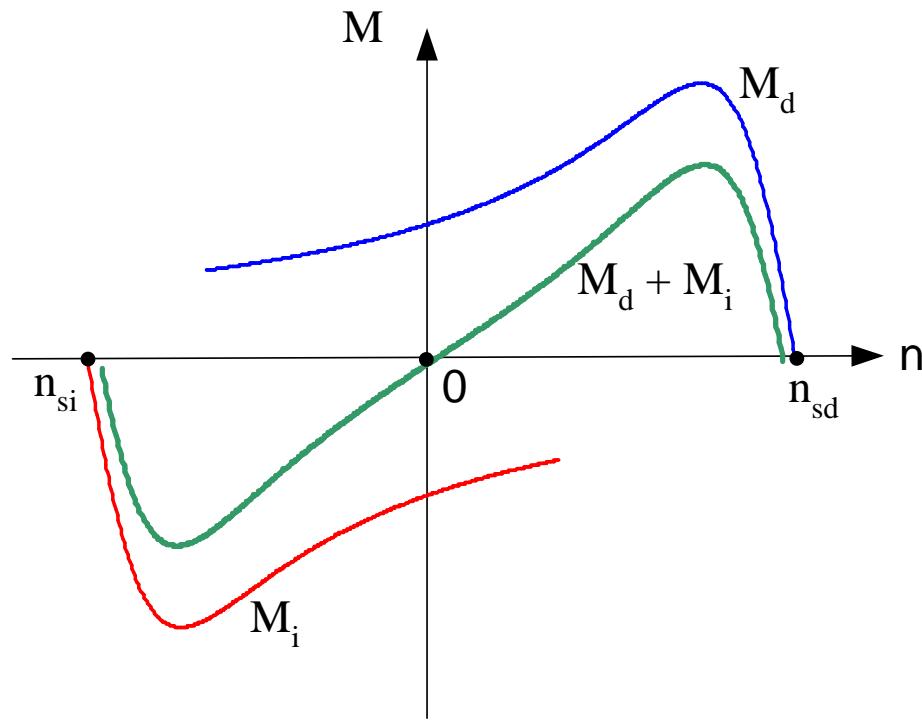
Dok rotor miruje, njegovo je klizanje prema direktnom i inverznom protjecanju stvorenim strujom namota statora jednako:

$$s_d = s_i = 1$$

Okretna protjecanja  $\Theta_d$  i  $\Theta_i$  imaju jednake amplitude i brzine vrtnje, ali suprotnog smjera:



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

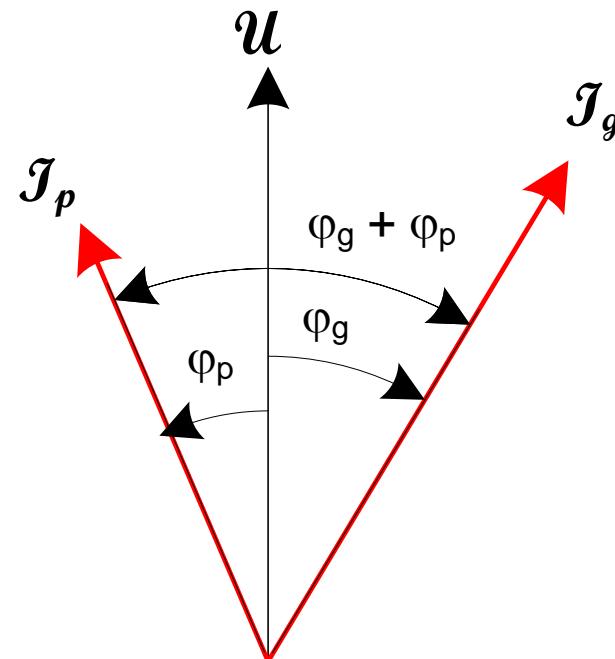
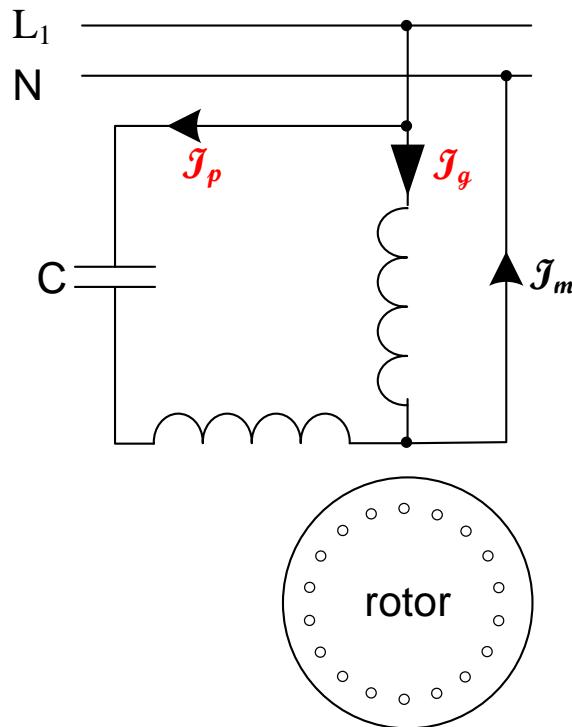


$M_d$  – moment direktnog protjecanja  
 $M_i$  – moment inverznog protjecanja  
 $M_d + M_i$  – ukupni moment jednofaznog motora

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  $\mathcal{I}_g$  i pomoćne  $\mathcal{I}_p$  faze

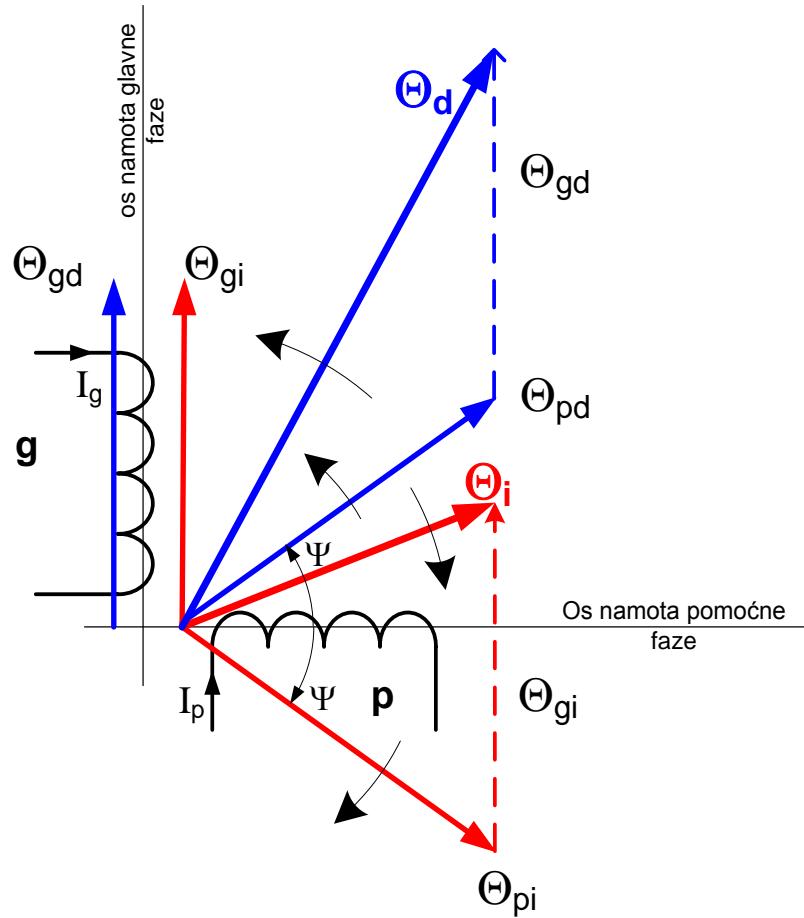
# Reverziranje (promjena smjera vrtnje) motora s pomoćnom fazom

---

Struja u namotu svake faze stvara svoje pulsirajuće protjecanje koje možemo prikazati s dva okretna protjecanja  $\Theta_d$  i  $\Theta_i$ .

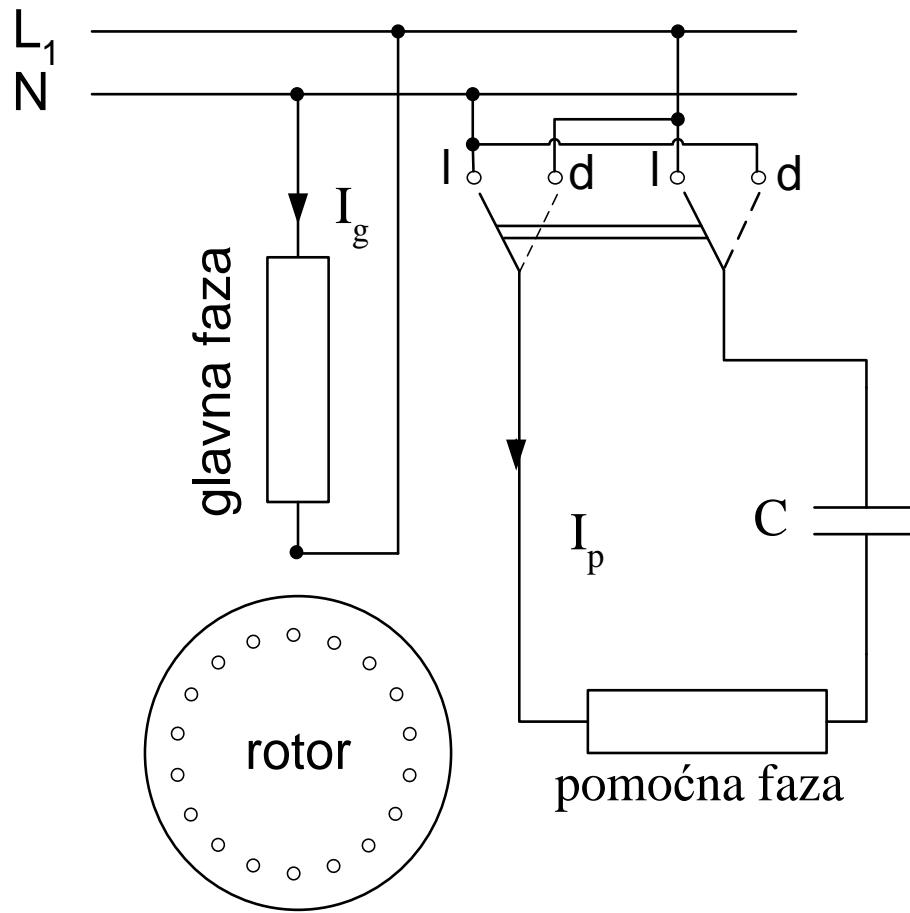
Kako znamo iz teorije okretnog polja, os okretnog protjecanja se nalazi u osi namota određene faze u trenutku kada struja tog namota prolazi kroz maksimum, a iznos tog protjecanja je  $\Theta_d = \Theta_i = \frac{1}{2} \Theta_1$ . Struja u fazi u kojoj je kondenzator je prošla svoj maksimum prije faze u kojoj nije kondenzator za kut  $\Psi = \pi/2 + -\psi$  gdje je  $\psi$  fazni pomak  $\varphi_{gl} + \varphi_p$ .

# Smjer vrtnje i reverziranje motora s pomoćnom fazom



Direktno je protjecanje veće od inverznog pa se rotor vrti u smjeru toga rezultirajućeg protjecanja  $\Theta_d$ . Okretno rezultantno 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 pomoćne faze (l-ljevo, d-desno)



# Jednofazni asinkroni strojevi

---

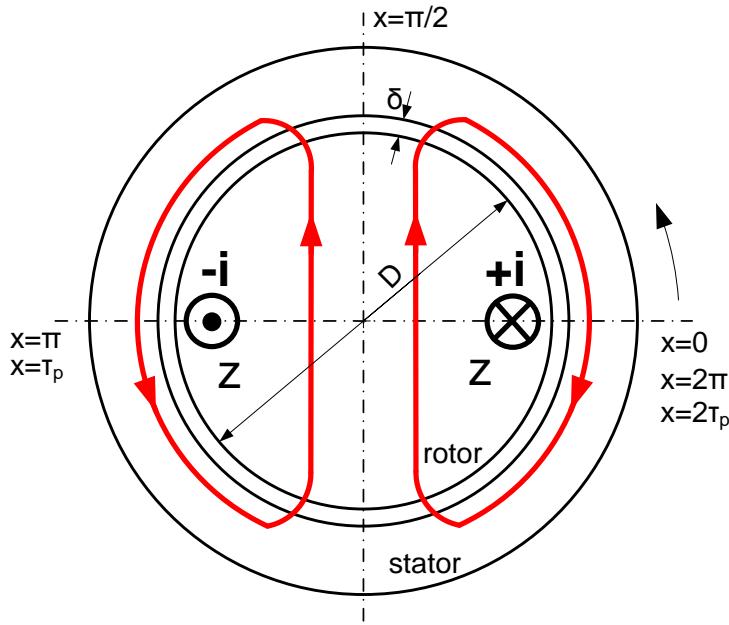
- Detaljno o asinkronim motorima s pomoćnom fazom za zalet možete pronaći u knjizi Prof. Wolfa: Osnove električnih strojeva

---

Slajdovi u nastavku mogu Vam pomoći ako ste zaboravili kako se stvaraju mirna, pulzirajuća i okretna magnetska polja

---

MIRNA,  
PULZIRAJUĆA I  
OKRETNA  
MAGNETSKA  
POLJA



- Neka svitkom smještenim na rotoru teče struja  $i$ , broj vodiča u svitku neka je  $z$
- Stvaraju se 2 magnetska pola,  $2p=2$
- polni korak je  $\tau_p = D\pi/2p$

a) magnetsko polje jednog svitka na rotoru, broj polova  $2p$

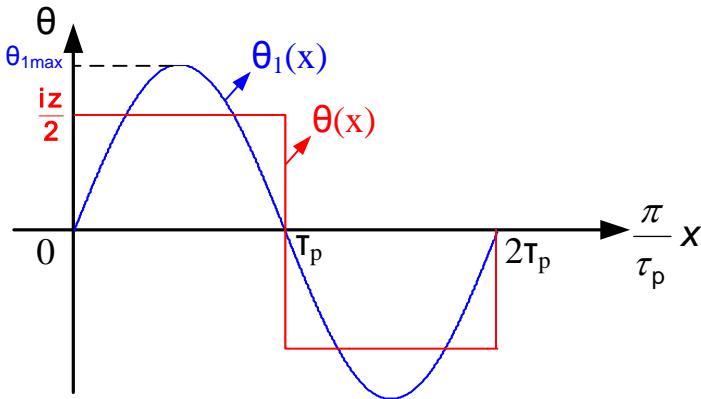
- broj pari polova obično označavamo s  $p$ , a ukupni broj polova je onda  $2p$ . Za jednu silnicu se primjenom zakona protjecanja može pisati:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = 2H_\delta \delta + H_{Fe} \ell_{Fe} = i z$$

- zanemarimo li pad napona kroz željezo statora i rotora zbog  $\mu_{Fe} \gg$ , dobijemo:

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = 2H_\delta \delta$$

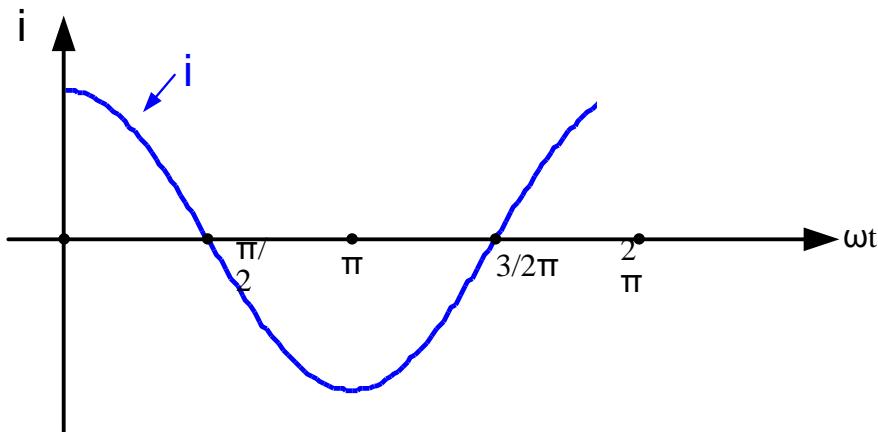
$$H_\delta \delta = \frac{iz}{2} = \Theta_\delta \quad B_\delta = \mu_0 H_\delta$$



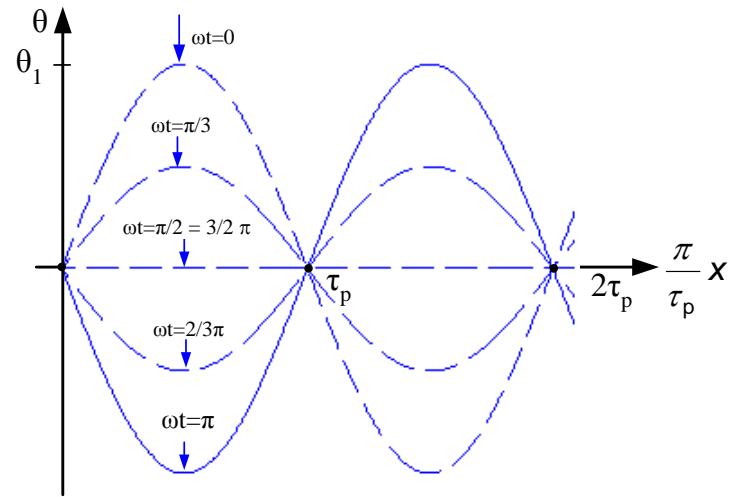
- dobili smo protjecanje  $\theta$  raspodijeljeno uzduž oboda stroja prema slici ( crveno). Ono je konst. jer je zračni raspor  $\delta$  konstantan i struja vremenski nepromjenjiva.

- osnovni harmonik protjecanja je:  $\theta_1(x) = \theta_{1\text{max}} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right)$
- indukcija magnetskog polja uzduž raspora je :  $B_\delta = \mu_0 H_\delta = \mu_0 \frac{i \cdot z}{2\delta}$ 
  - $H_\delta$  je jakost magnetskog polja u zračnom rasporu
- teče li svitkom istosmjerna struja  $i_0$ , stvara se dvopolno mirno (stojeće) magnetsko polje iznosa prema slici b)
- prostorna raspodjela magnetske indukcije  $B_\delta(x)$  je istog oblika kao i protjecanje, iznosi su proporcionalni

- teče li svitkom (slika a ) izmjenična struja oblika  $i=I\sqrt{2}\cos\omega t$ , stvorit će se pulsirajuće dvopolno magnetsko polje kojemu se veličina na svakom mjestu oboda (zračnog raspora) mijenja od maksimalne do minimalne, u skladu s promjenom veličine struje

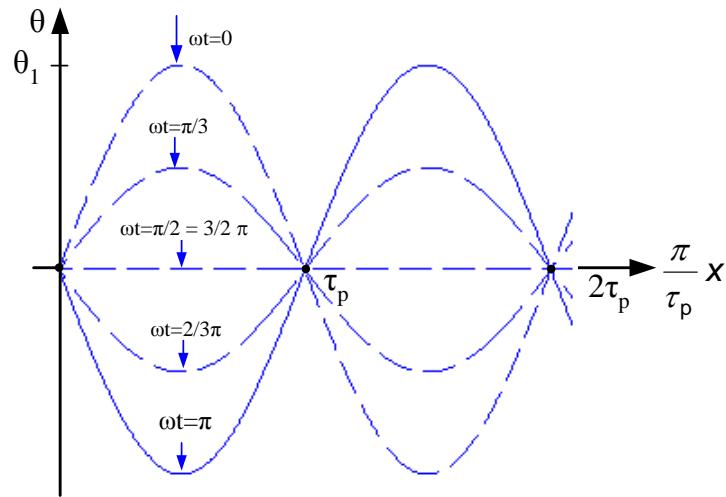


Promjena struje svitka  $i=I\sqrt{2} \cos\omega t$



Pulsirajuće protjecanje jednog svitka,  
osnovni harmonik

- Stvoreno pulsirajuće magnetsko polje se može prikazati izrazom:



$$\Theta(x,t) = \Theta_{1t} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right)$$

$$\Theta(x,t) = \Theta_1 \cos(\omega t) \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right)$$

$\Theta_1$  – amplituda protjecanja u trenutku  $\omega t=0$   
(kada je struja maksimalna)  
 $\Theta_{1t} = \Theta_1 \cos(\omega t)$

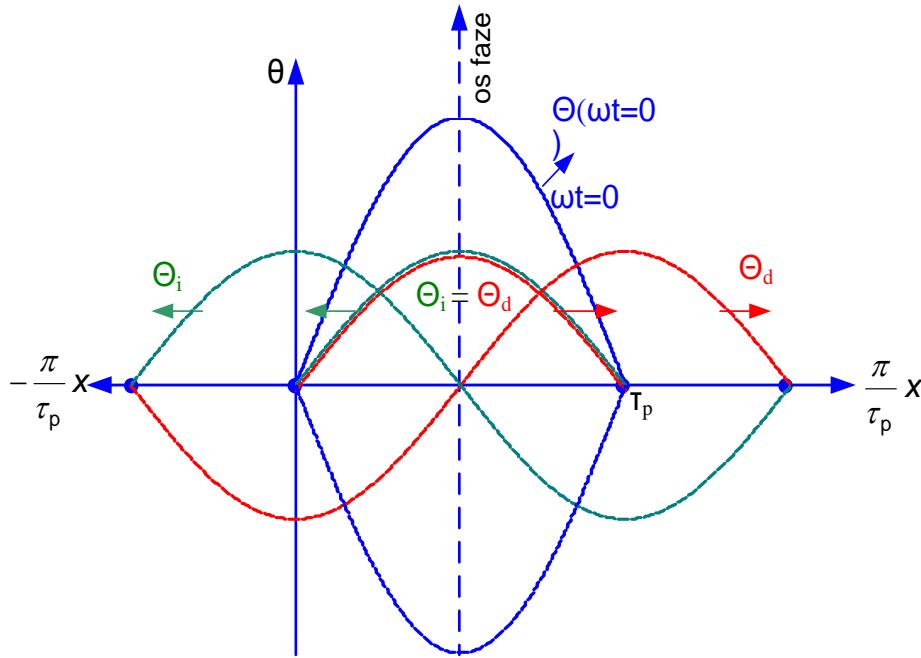
- Pulsirajuće protjecanje se može prikazati s 2 okretna protjecanja, svako pola amplitude i vrtnje u suprotnu stranu:

$$\Theta_1 \cos(\omega t) \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) = \frac{1}{2} \Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \omega t\right) + \frac{1}{2} \Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x + \omega t\right)$$

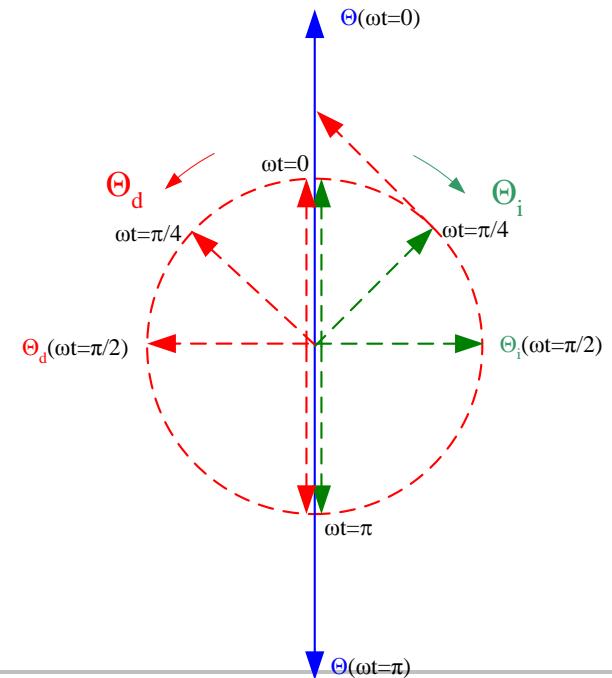
- Uobičajeni je naziv **direktno protjecanje i inverzno protjecanje** (engleski CW i CCW):

$$\Theta_{x,t} = \Theta_d + \Theta_i$$

- Prikaz pulsirajućeg protjecanja s dva vektora:



- Prostorna raspodjela pulsirajućeg protjecanja, prikaz s dvije okretne komponente



- Val protjecanja konstantne amplitude giba se po obodu brzinom koju dobijemo na slijedeći način:

$$\frac{1}{2} \Theta_1 \sin \left( \frac{\pi}{\tau_p} x - \omega t \right) = \text{konst.}$$

to će biti kada je :

$$\sin \left( \frac{\pi}{\tau_p} x - \omega t \right) = \text{konst.} \text{ odnosno } \left( \frac{\pi}{\tau_p} x - \omega t \right) = \text{konst.}$$

$x \rightarrow$  položaj na obodu,  $\omega$  kružna frekvencija

$$x = vt + x_0$$

$$\text{za } x_0 = 0$$

$$\left( \frac{\pi}{\tau_p} v - \omega \right) t = \text{konst.} \Rightarrow \left( \frac{\pi}{\tau_p} v - \omega \right) = 0$$

- slijedi električna brzina gibanja vala protjecanja po obodu stroja:

$$v = \omega \frac{\tau_p}{\pi}$$

a mehanička kutna brzina  $\omega_m$  koja odgovara brzini v će biti:

$$\omega_m = \frac{v}{D/2} = \omega \frac{\tau_p}{\pi} \frac{2}{D} = \frac{\omega}{p}$$

- za negativni (inverzni) val se dobije na isti način:

$$\omega_m = -\frac{\omega}{p}$$

- $\omega_m$  je stvarna kutna brzina kojom se prostorno kreće val za razliku od električne kutne brzine  $\omega$  koja prikazuje električni kut prevaljen u 1 sekundi
- električna kutna brzina vala je kružna frekvencija  $2\pi f$ . Tom bi se brzinom val kretao po obodu kada bi stroj bio dvopolni:  $p=1$ ,  $\alpha_{el}=\alpha_{meh}$

- Kutna brzina okretnog protjecanja  $\omega_m$  i kružna frekvencija  $\omega$  struje koja uzbudjuje polje vezane su izrazom:

$$\omega_m = \frac{\omega}{p}$$

- U vremenu  $T=1/f$  potrebnom da struja prođe 1 cijelu periodu okretno polje se zakrene u prostoru za kut:

$$\alpha_g = \omega_m T = \frac{\omega}{p} T = \frac{2\pi f}{p} \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{p}$$

odnosno za električni kut:

$$\alpha = 2\pi$$

To je upravo kut koji odgovara jednom paru polova.

## Zaključak:

---

Okretno polje kreće se uvijek takvom brzinom da prijeđe 1 par polova dok struja prijeđe jednu punu periodu.

U praksi se često koristi pojam brzine vrtnje  $n$  umjesto kutne brzine  $\omega_m$ . Brzina vrtnje  $n$  pokazuje koliko ima punih okretaja u 1 minuti ili 1 sekundi:

$$1 \text{ puni okretaj} = 2\pi \text{ radijana}$$

$$n \text{ okretaja u minuti} = n/60 \text{ okretaja u sekundi}$$

pa brzini vrtnje  $n$  odgovara kutna brzina:

$$\omega_m = \frac{2\pi n}{60} \text{ rad/s}$$

Brzina vrtnje okretnog polja biti će:

$$n = \frac{60 \omega_m}{2\pi} = \frac{60 2 \pi f}{2\pi p} = \frac{60 f}{p}$$

a veza frekvencije induciranog napona i brzine vrtnje polja:

$$f = \frac{p n}{60} [\text{Hz}]$$

# Trofazna okretna polja

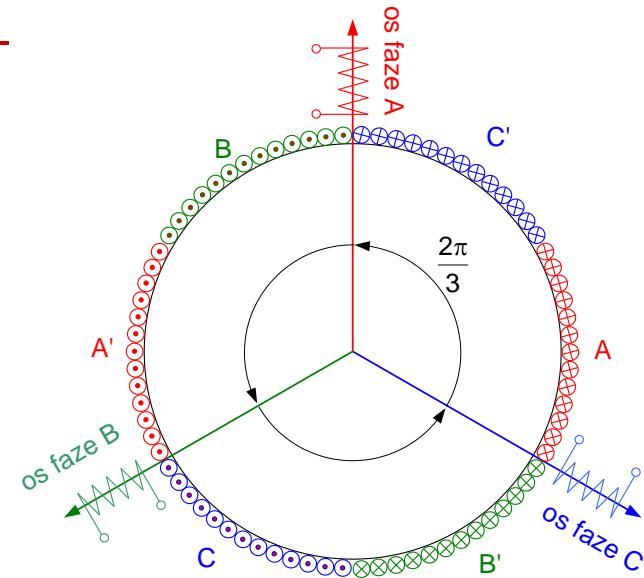
- Osnovni prostorni harmonički članovi protjecanja triju prostorno za  $2\pi/3$  pomaknutih namota (faza) A, B i C su:

$$\Theta_{x,A} = \Theta_{1A} \sin \frac{\pi}{\tau_p} x$$

$$\Theta_{x,B} = \Theta_{1B} \sin \left( \frac{\pi}{\tau_p} x - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$\Theta_{x,C} = \Theta_{1C} \sin \left( \frac{\pi}{\tau_p} x - \frac{4\pi}{3} \right)$$

Sljedeća  
faza

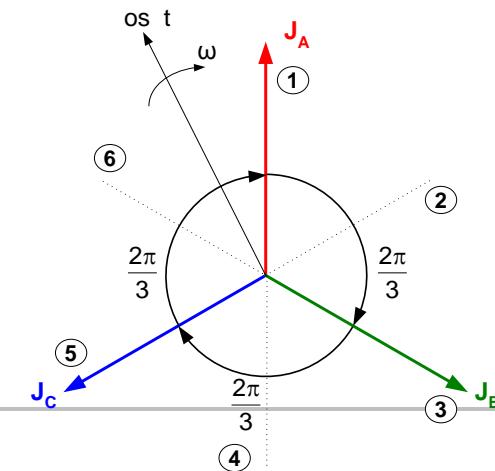


- Ako namotima A, B i C teku izmjenične struje vremenski (fazno) međusobno pomaknute za  $2\pi/3$ , u svakom namotu se stvaraju pulsirajuća protjecanja:

$$\Theta_{x,tA} = \Theta_{1A} \cos \omega t \sin \frac{\pi}{\tau_p} x$$

$$\Theta_{x,tB} = \Theta_{1B} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \sin \left( \frac{\pi}{\tau_p} x - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$\Theta_{x,tC} = \Theta_{1C} \cos(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \sin \left( \frac{\pi}{\tau_p} x - \frac{4\pi}{3} \right)$$



- ako su struje u svim svitcima jednake i ako su brojevi vodiča (zavoja) jednak, amplitude protjecanja u osima faza A, B i C su jednake
- Pulsirajuća protjecanja svake faze možemo prikazati sa dva okretna protjecanja:

$$\begin{aligned}\Theta_{x,tA} &= \frac{1}{2}\Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p}x - \omega t\right) + \frac{1}{2}\Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p}x + \omega t\right) \\ \Theta_{x,tB} &= \frac{1}{2}\Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p}x - \omega t\right) + \frac{1}{2}\Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p}x + \omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \Theta_{x,tC} &= \frac{1}{2}\Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p}x - \omega t\right) + \frac{1}{2}\Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p}x + \omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}\quad \boxed{+}$$

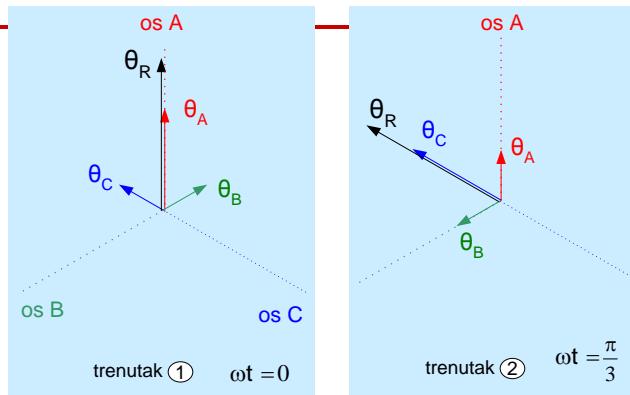
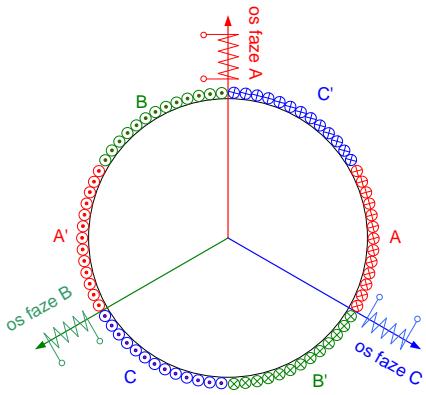

---


$$\sum \Theta_{x,tABC} = \frac{3}{2}\Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p}x - \omega t\right) + 0$$

- Zbrojim li sva 3 direktna i sva tri inverzna vala protjecanja dobijemo direktno okretno protjecanje amplitude 50% veće od protjecanja jedne faze. Inverzna protjecanja se poništavaju,  $\sum \Theta_i = 0$ .
- Okretna protjecanja bez inverzne komponente se nazivaju **simetrična okretna protjecanja (polja)**. Ona se vrte sinkronom brzinom:

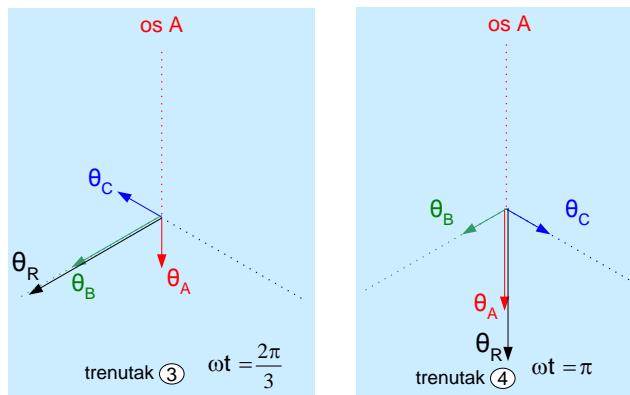
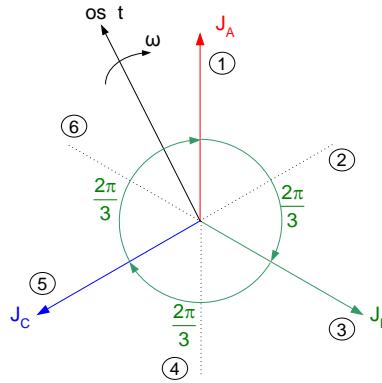
# Trofazna okretna protjecanja (polja), prikaz rotirajućim vektorima

Prostorna raspodjela 3-faznih namota:

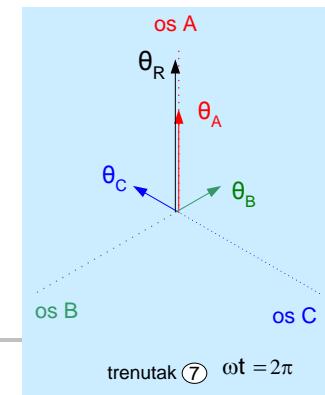
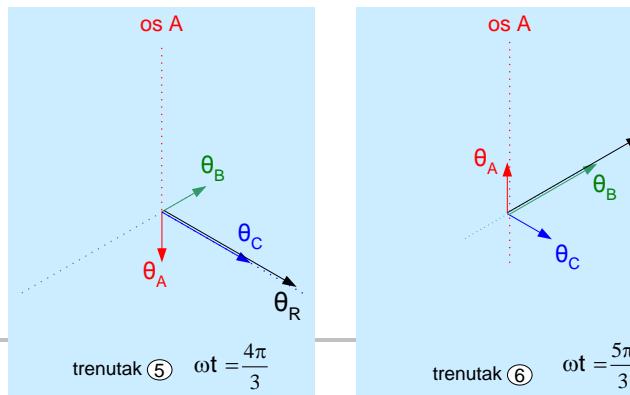


- $\theta_A$  – protjecanje faze A
- $\theta_B$  – protjecanje faze B
- $\theta_C$  – protjecanje faze C
- $\theta_R$  – rezultantno protjecanje

Fazorska slika struja kroz namote:



**Sljedeći trenutak**



- Promotrimo položaje i iznose rezultirajućeg protjecanja R u prostoru za trenutke kada je vremenska os t u položajima 1 do 7:

---

# Programski prikaz okretnog magnetskog polja



Program

## Protjecanja m-faznih namota

---

- Ako se općenito uzme m-faznih namota i simetrično ih se raspodijeli po obodu nekog stroja s prostornim pomakom za kut:

$$\alpha = \frac{2\pi}{m}$$

i ako tim namotima teku struje fazno (vremenski) pomaknute za kut:

$$\alpha = \frac{2\pi}{m}$$

stupnjeva, stvorit će se simetrično okretno polje amplitude  $\Theta_d$ :

$$\Theta_d = \frac{m}{2} \Theta_1$$

i brzine vrtnje:

$$n = \frac{60f}{p} \text{ [ min}^{-1}\text{ ]}$$

- Analitički je to jednostavno prikazati izrazima:

za 1. fazu

$$\Theta_{1,x,t} = \Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) \cos\omega t$$

za 2. fazu

$$\Theta_{2,x,t} = \Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \frac{2\pi}{m}\right) \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{m}\right)$$

:

za n - tu fazu

$$\Theta_{n,x,t} = \Theta_1 \sin\left[\frac{\pi}{\tau_p} x - (n-1)\frac{2\pi}{m}\right] \cos\left[\omega t - (n-1)\frac{2\pi}{m}\right]$$

za m - tu fazu

$$\Theta_{m,x,t} = \Theta_1 \sin\left[\frac{\pi}{\tau_p} x - (m-1)\frac{2\pi}{m}\right] \cos\left[\omega t - (m-1)\frac{2\pi}{m}\right]$$

- Prikazivanjem umnoška  $\sin [ ] \cos [ ]$ , zbrojem dvaju sinusnih izraza i sumiranjem istih dobili bi rezultat:

$$\Theta_d = \frac{m}{2} \Theta_1, \quad \Theta_i = 0$$

- Simetrična okretna protjecanja m-faznog sustava:
  - prostorni pomak faznih namota mora biti jednak vremenskom pomaku struja;
  - ostali uvjeti kao kod 3-faznog sustava
- U praksi koristimo:
  - najčešće 3 faze, vrlo rijetko više od 3 (specijalni strojevi): jednofazni sustav jer je instalacija i dovod struje najjednostavniji; industrija, proizvodnja i prijenos električne energije koriste trofazne sustave

## Nesimetrična okretna protjecanja

- Ako nisu ispunjeni uvjeti za simetrično okretno polje, a postoji prostorni i vremenski (fazni) pomak, stvorit će se okretna protjecanja, ali ne više simetrična (kružna) nego eliptična.

Program