

ELEKTROMEHANIČKE I ELEKTRIČKE PRETVORBE

ASINKRONI STROJEVI I POGONI

Akad. god. 2007. / 2008.

Prof. dr. sc. Drago Ban

MOTORI IZMJENIČNE STRUJE SE DIJELE NA:

Asinkrone

Sinkrone

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

- Princip okretnog magnetskog polja
Tesla pokazuje i koristi za objašnjenje kako radi sinkroni i asinkroni izmjenični motor.
- 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!

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 faza jednaki vremenskim, namoti potpuno simetrični a struje kroz njih jednakog oblika i iznosa stvarat će se okretno polje koje zovemo simetrično o.p.
- Tesla se na početku bavio dvofaznim asinkronim i sinkronim motorom jer mu je za laboratorijsku izvedbu to bilo najjednostavnije u njegovom kabineetu.

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.)

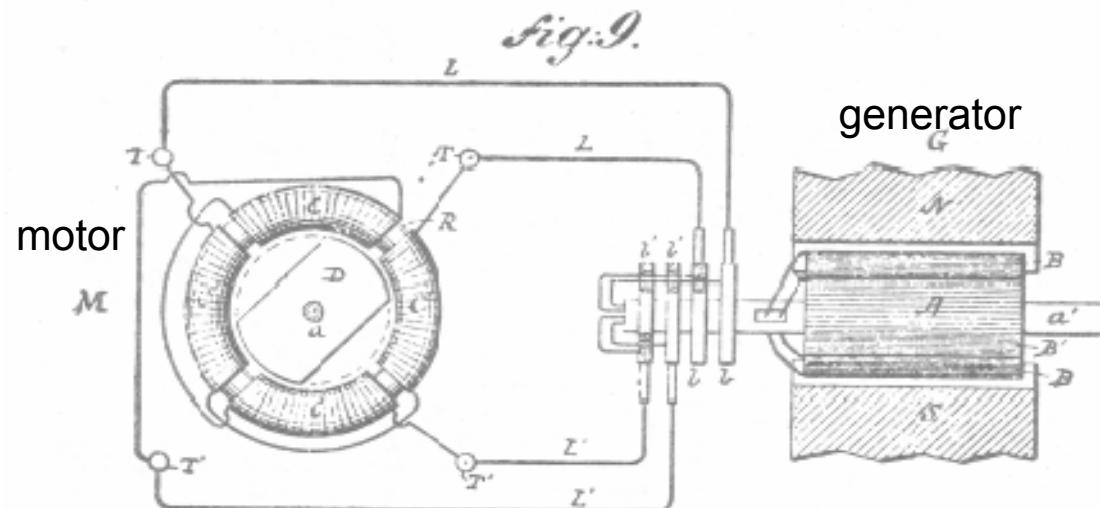
N. TESLA

4 Sheets—Sheet 2.

ELECTRO MAGNETIC MOTOR.

No. 381,968.

Patented May 1, 1888.



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.)

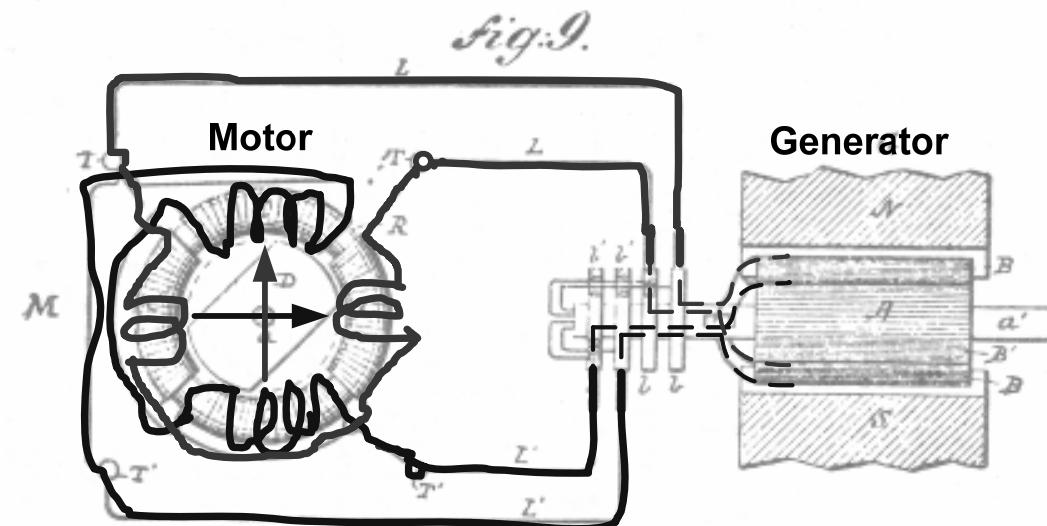
N. TESLA.

4 Sheets—Sheet 2.

ELECTRO MAGNETIC MOTOR.

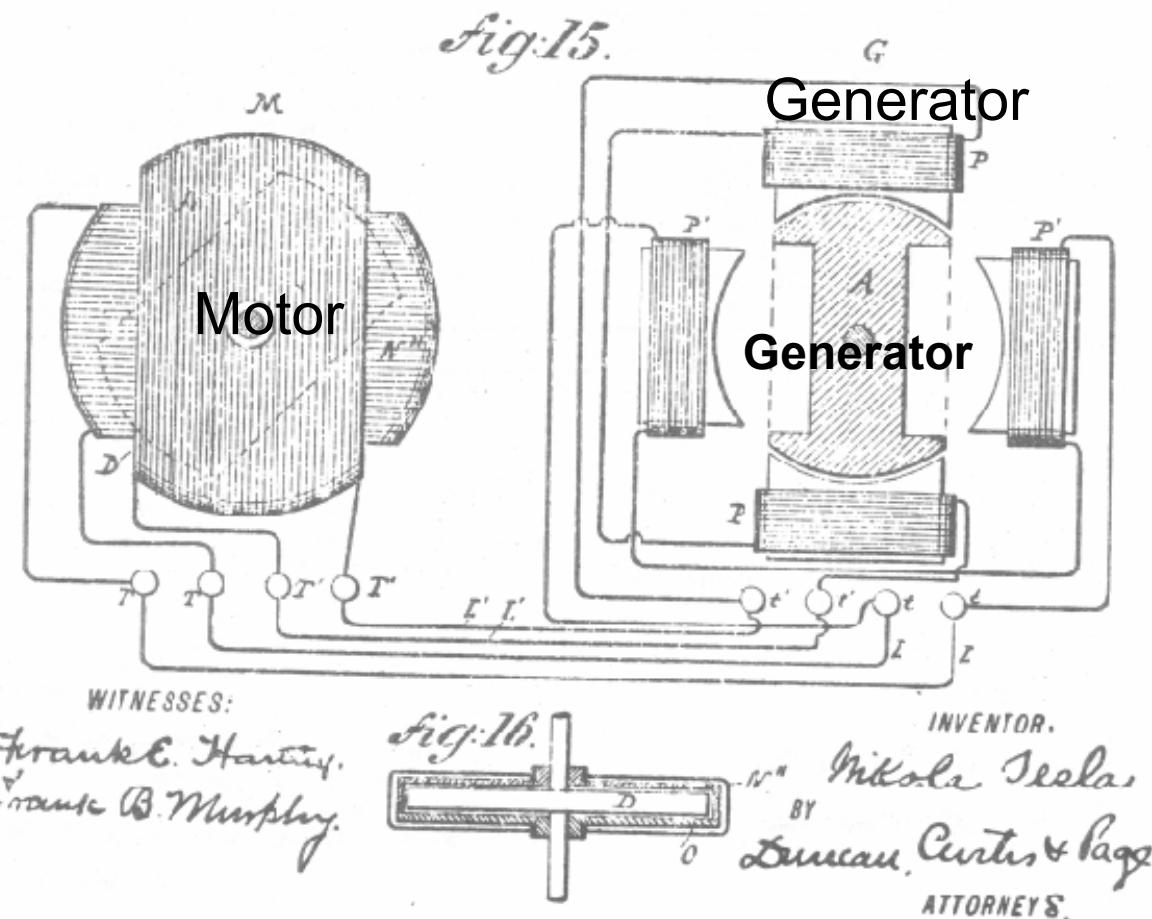
No. 381,968.

Patented May 1, 1888.



Dvofazni generator i dvofazni motor prema Teslinu
Patentu broj 381968

Dvofazni napon uzima se sa statora a ne s kliznih koluta



Dvofazni sustav generatora i motora prema Tesli

P-36

(No. Model.)

4 Sheets—Sheet 4

N. TESLA.

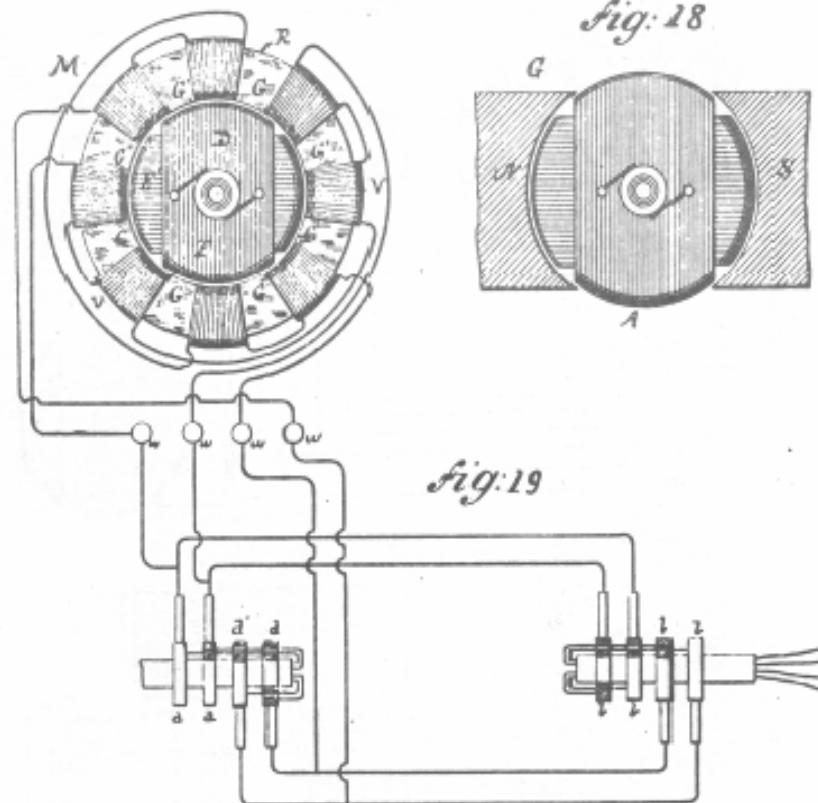
ELECTRO MAGNETIC MOTOR.

No. 381,968

Patented May 1, 1888.

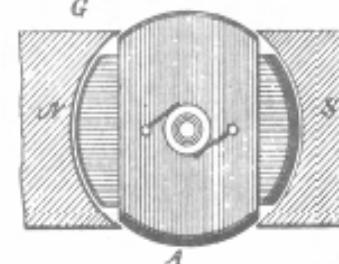
Motor

fig: 17



Generator

fig: 18



Suvremene izvedbe asinkronih strojeva i pogona

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

Osnovne podjele asinkronih strojeva

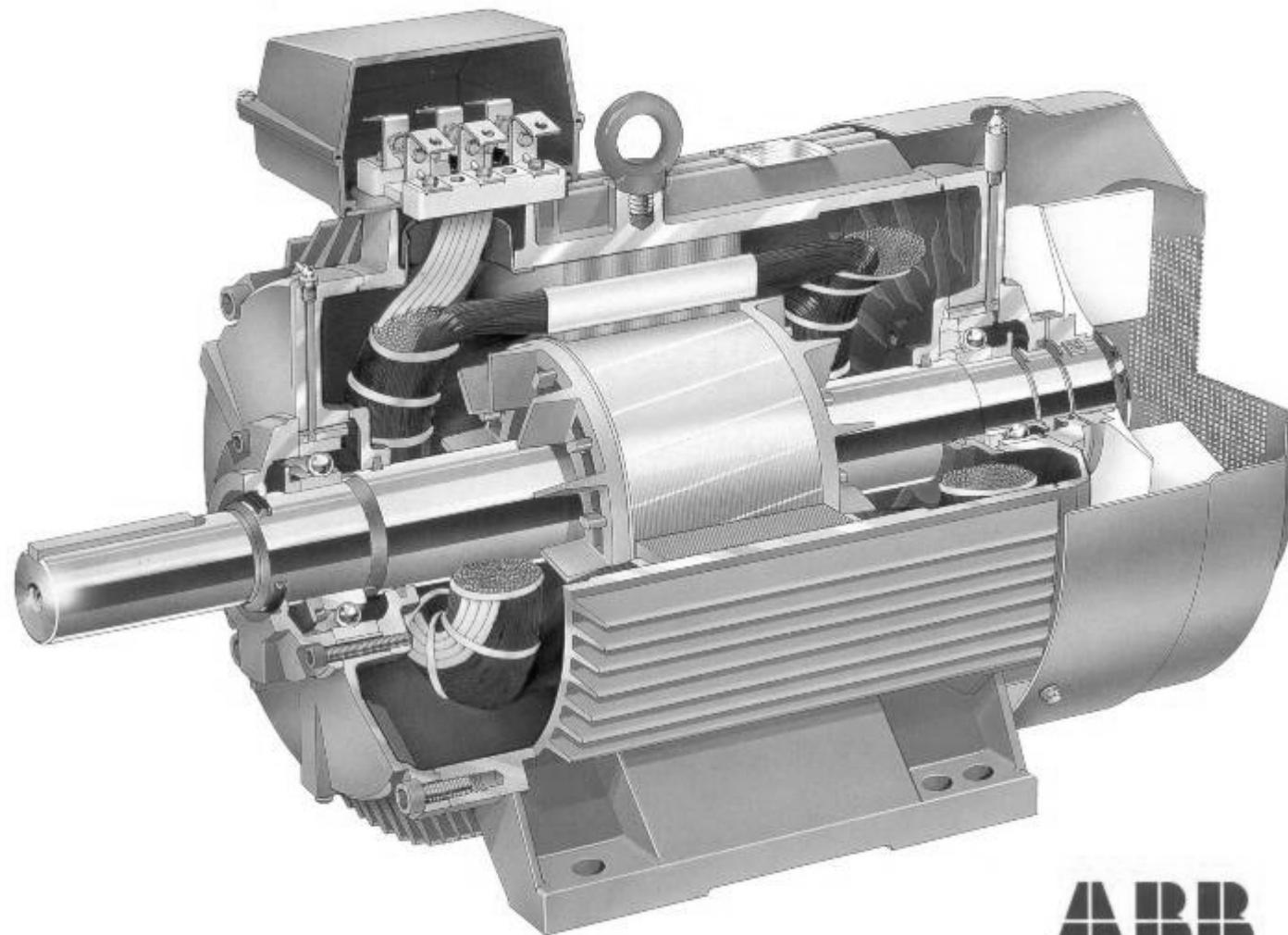
- Prema načinu rada se dijele na:
Rotirajuće (rotating machine) i
Linearne (linear machine)
- Prema izvedbi rotora se dijele na:
Asinkroni strojevi s kaveznim rotorom (engl. Squirrel-cage rotor induction motor) ;

Asinkrone strojevi s kliznokolutnim (namotanim) rotorom (wound rotor induction motor or slipring induction motor);

Asinkroni strojevi s masivnim rotorom (massive rotor induction motor).

- Prema broju faza i priključku na izvor napona se dijele na :
Trofazne, dvofazne i jednofazne (za male snage)
- Prema veličini napona:
Visokonaponski (iznad 1000V) i niskonaponski (do 1000V)

Suvremeni asinkroni kavezni motor



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.

Insulation

High-grade insulation and generous electrical dimensioning give the motor a high overload capacity.

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.

Corrosion protection

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

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. Integrally cast feet allow a very rigid mounting and also the vibration is minimal.

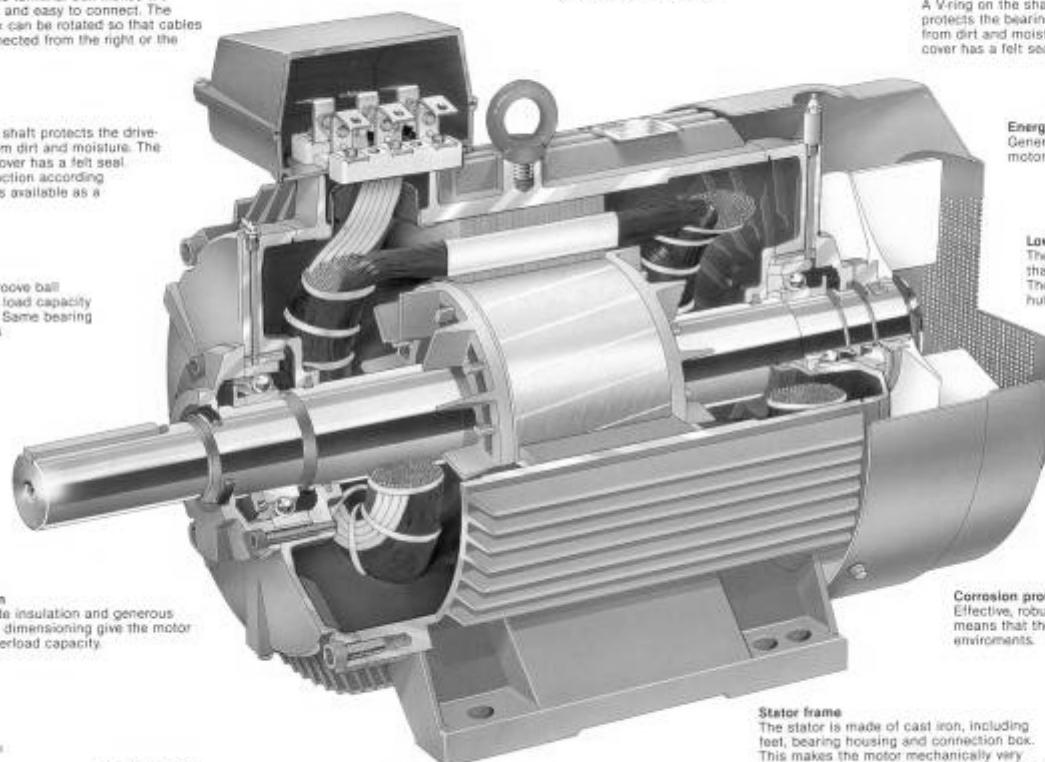


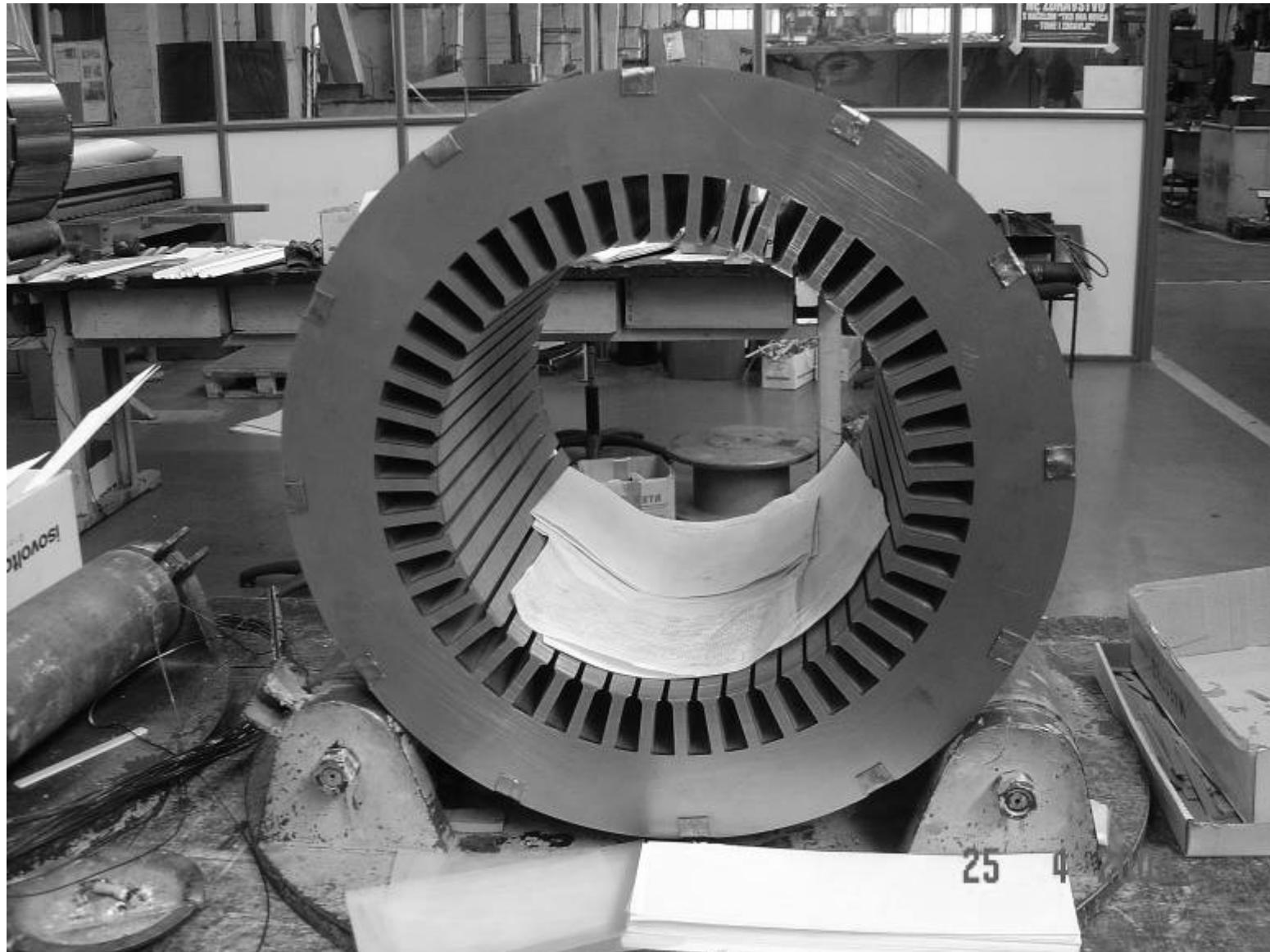
ABB Motors
Marketing Communications
P.O Box 633
FI-45101 Vaasa, Finland
Tel. +358 10 22 4900
Fax +358 10 22 47372

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

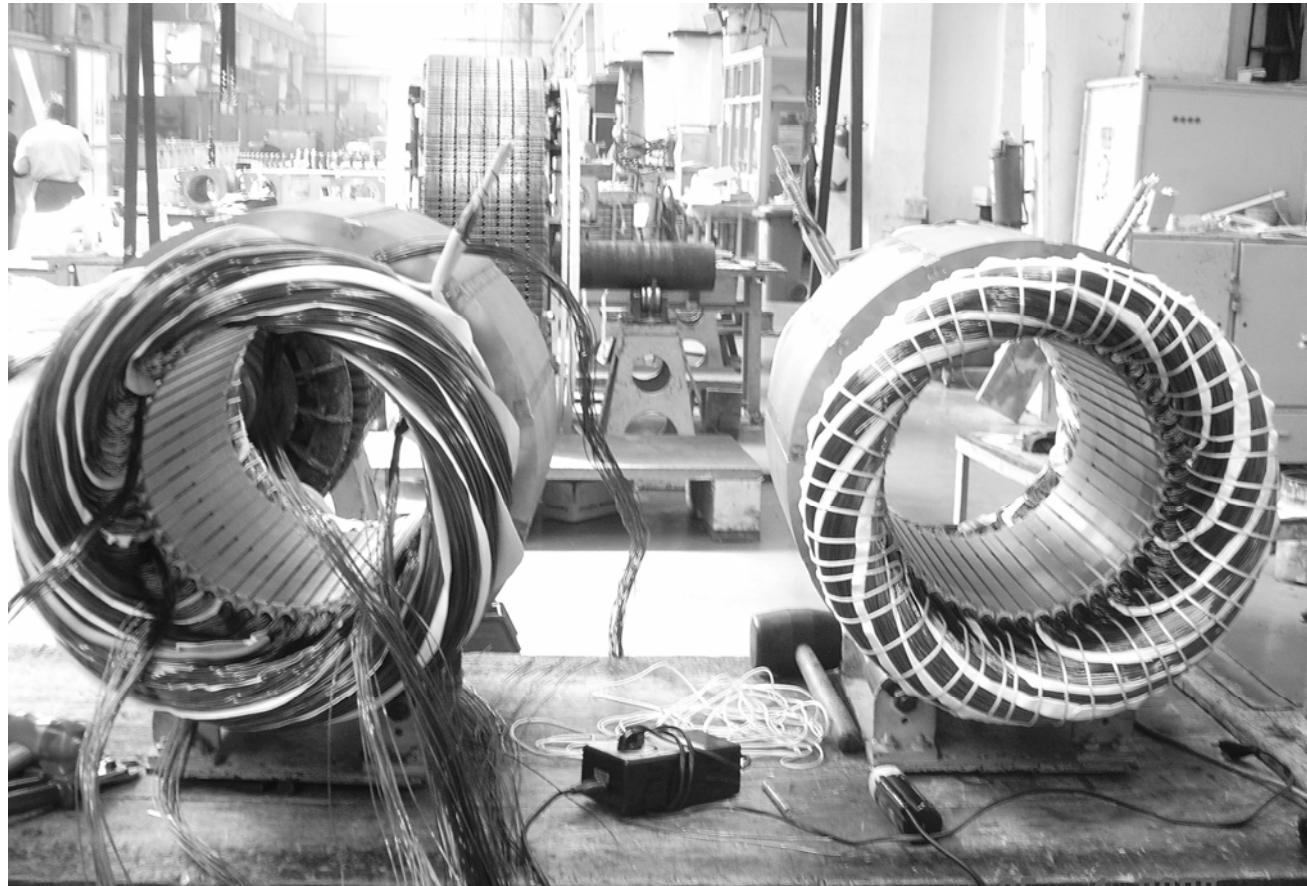
ABB Motors

ABB

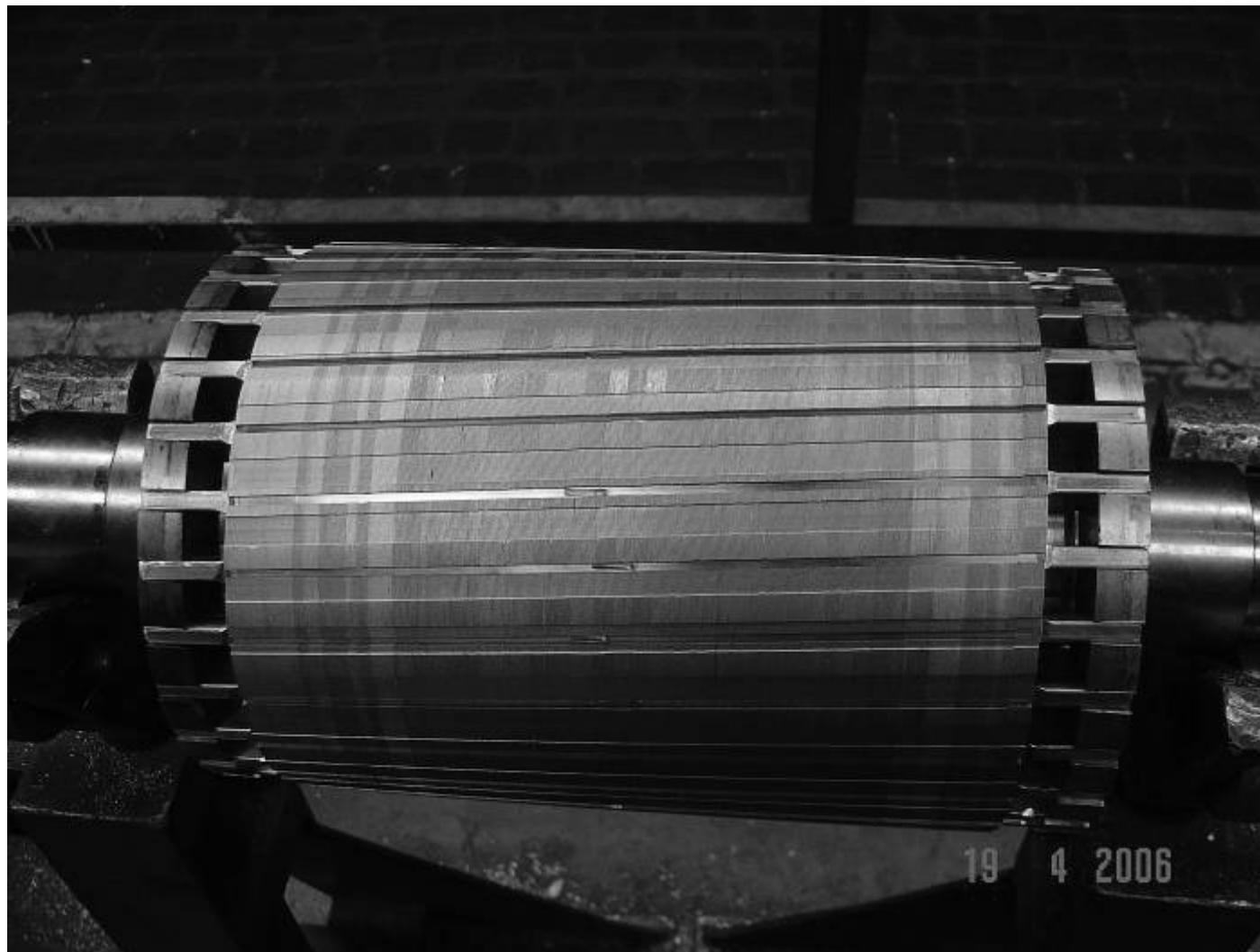
Statorski paket trofaznog asinkronog motora pripremljen za ulaganje namota



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



Kavezni rotor trofaznog asinkronog motora u fazi završne
izrade (tramvajski motor, 65 kW)

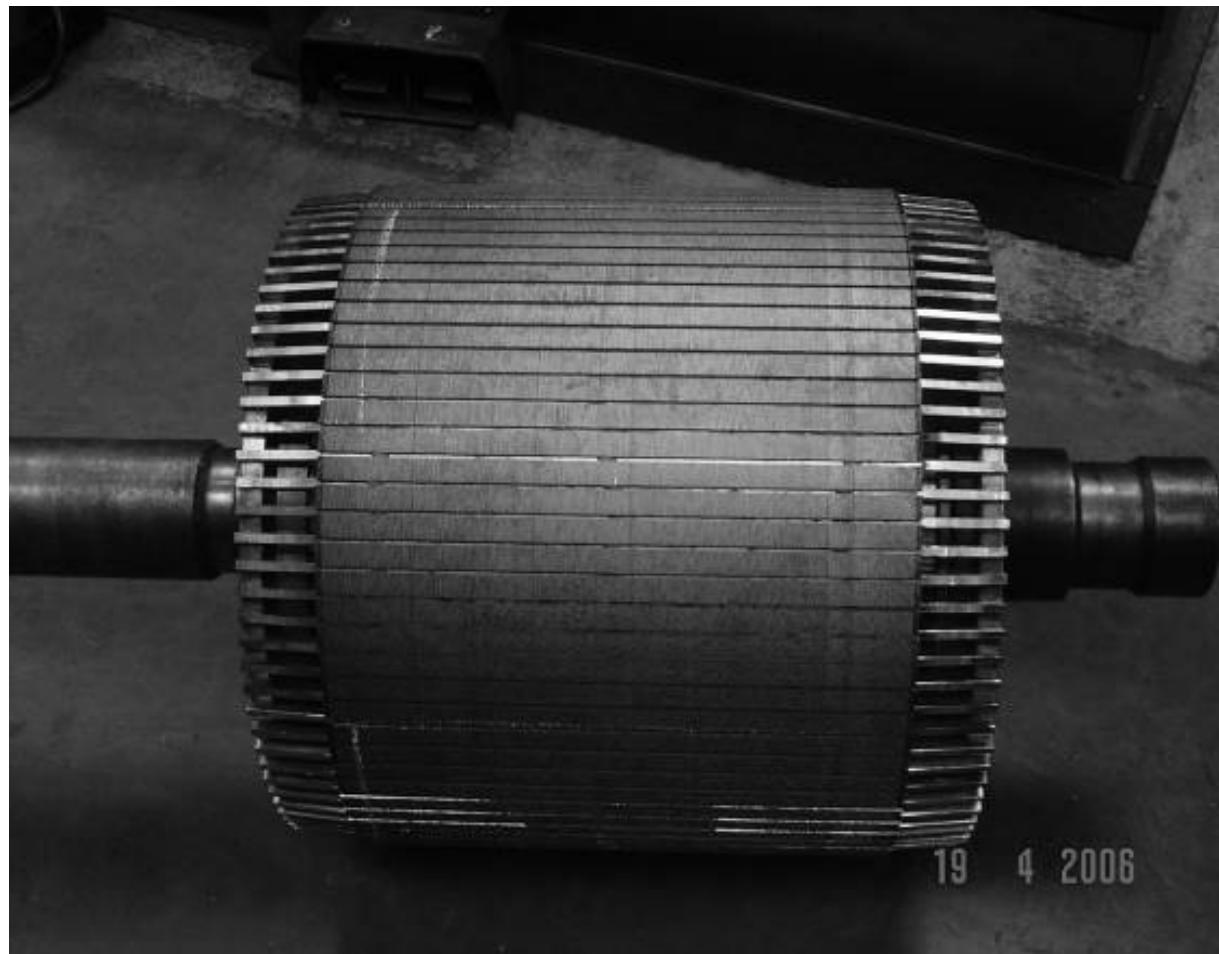


Stator novog asinkronog motora za visoki napon (6 kV, 50 Hz)



pogled na glave namota i izvode

Kavezni rotor trofaznog asinkronog motora u fazi završne obrade



**Motori naftovodnih pumpi u terminalu Omišalj, 6000 V, 50 Hz
(Protueksplozijska zaštita oklapanje)**

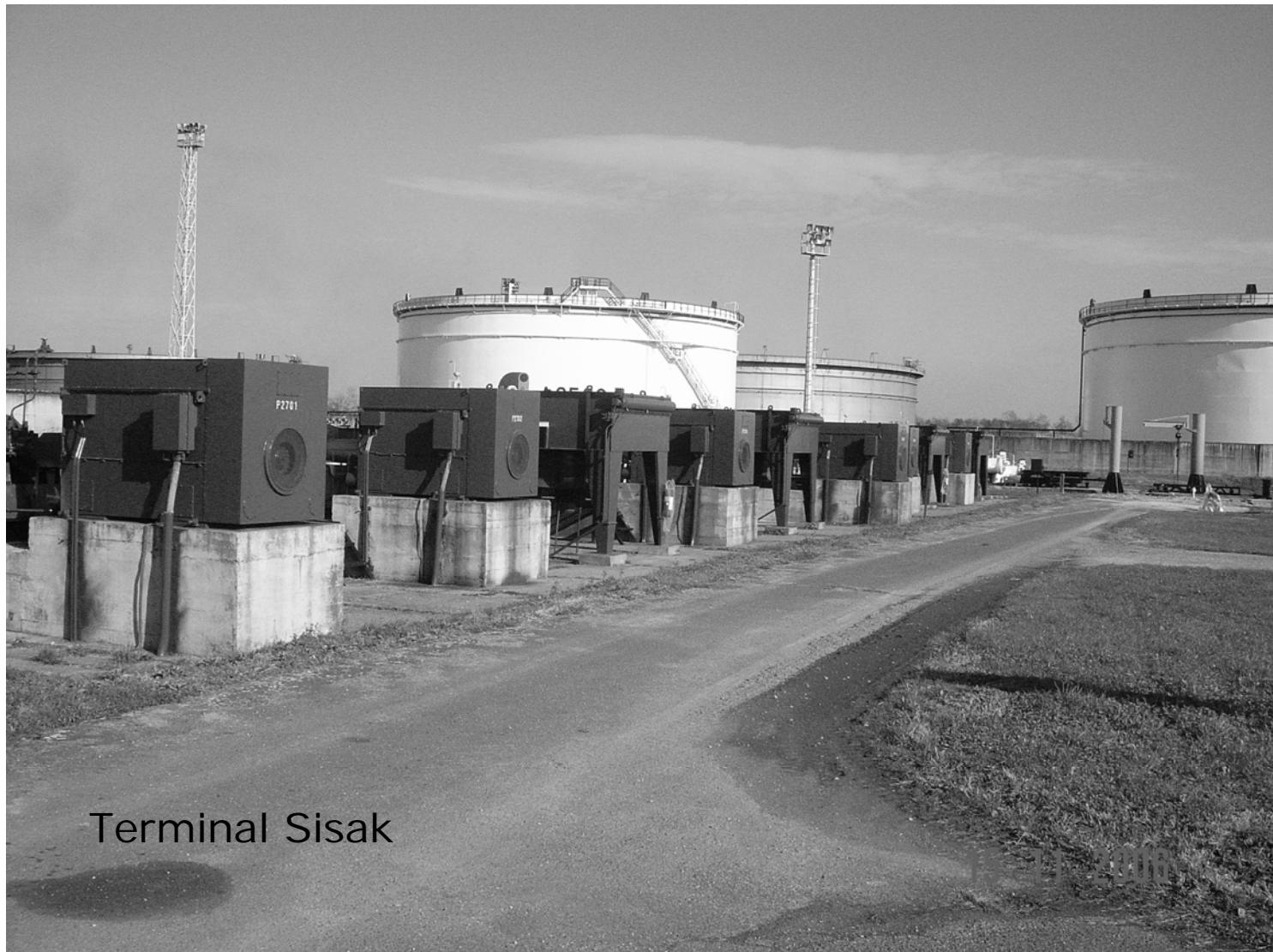


Terminal Omišalj

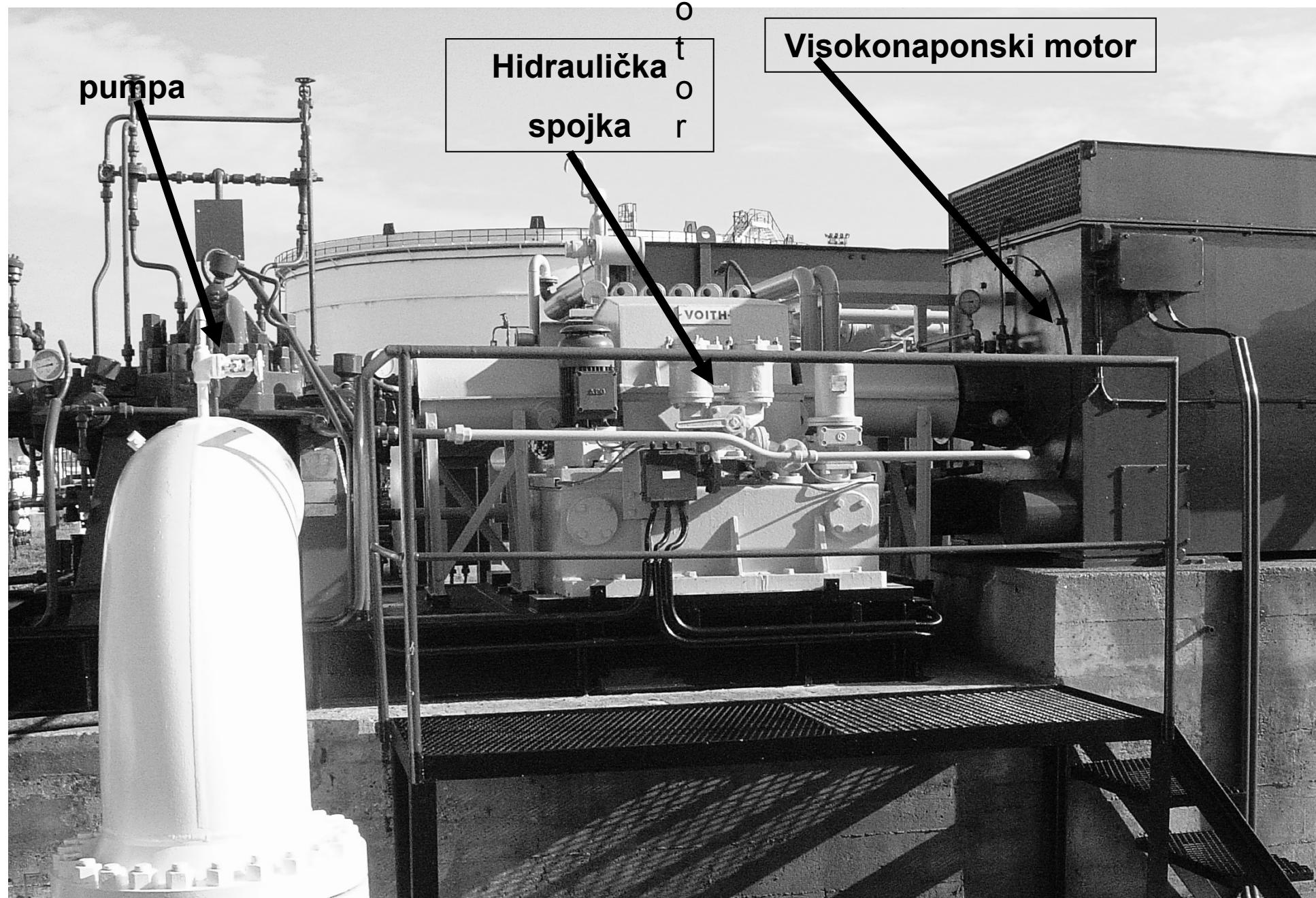
**Kavezni motori naftovodnih pumpi na terminalu Omišalj,
3500 kW, 6000 V, 50 Hz, 2p=4**



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



Terminal Sisak



N
M
O
t
o
r

**Motori naftovodnih pumpi u PS Melnice,
6000V, 50 Hz, 3300 kW**



Elektromotorni pogon –asinkroni motor +pumpa amdea otopine na CPS Molve



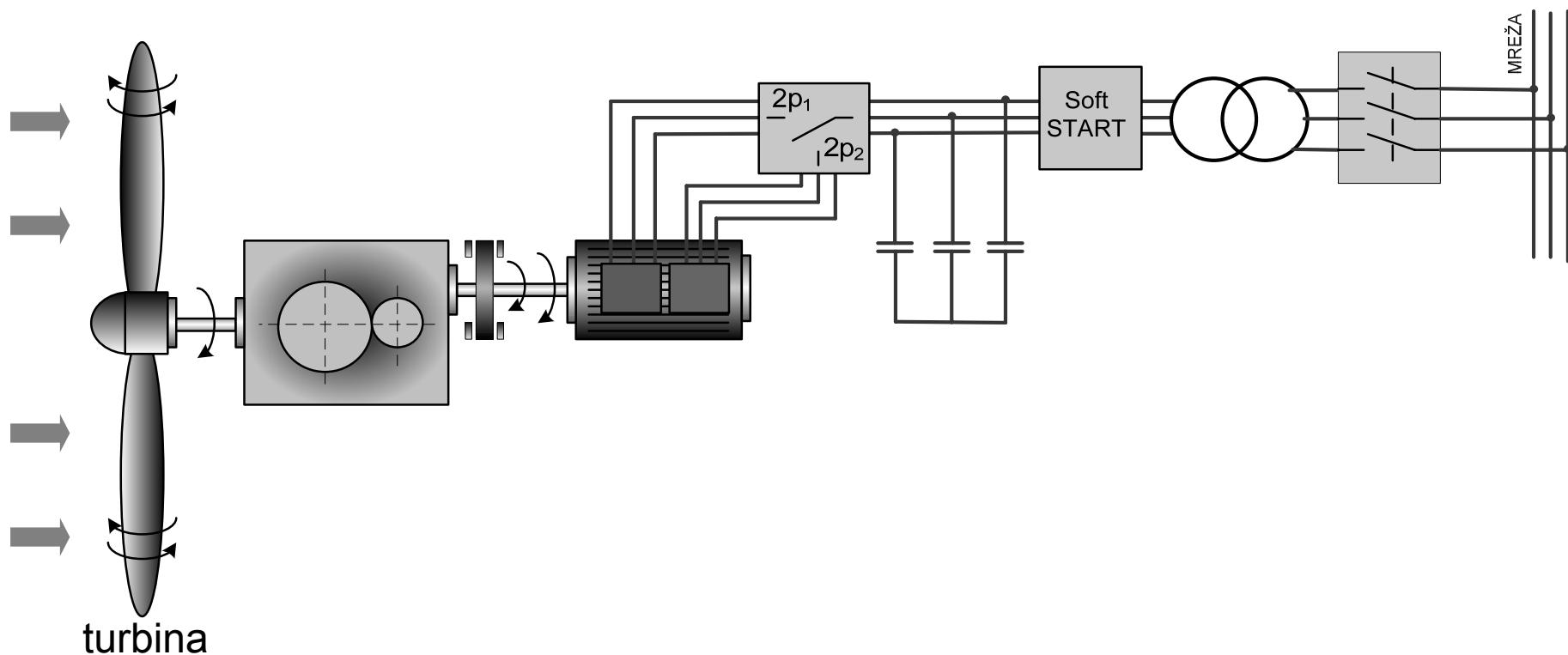
Frekvencijski regulirani motor, Exde II AT3

B

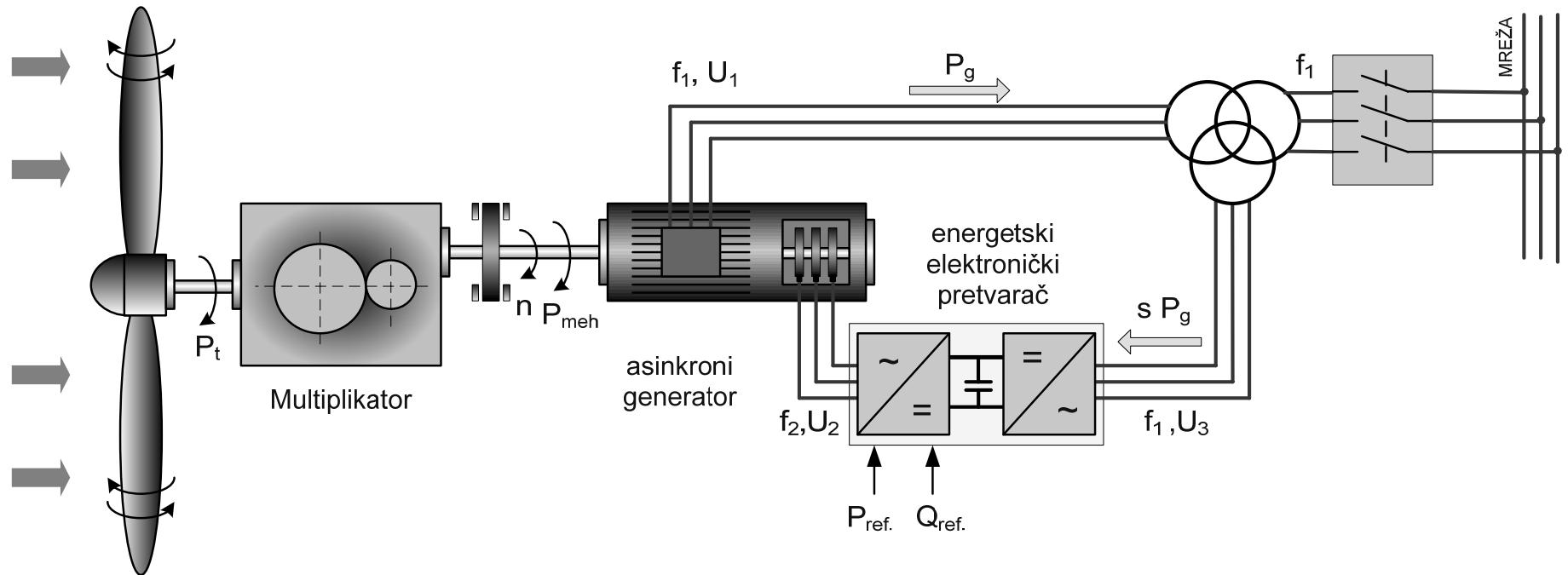
Elektromotorni pogon, motor 1800 kW, 2p=2, frekvencijski reguliran



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:

$$n_s = \frac{60f_1}{p} \quad \text{o/min}$$

gdje je f_1 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 vodič rotora koja zakreće rotor u smjeru okretnog polja.
- rotor se vrti brzinom vrtnje koja je uvijek različita od sinkrone, te se zbog toga motor zove asinkroni *

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

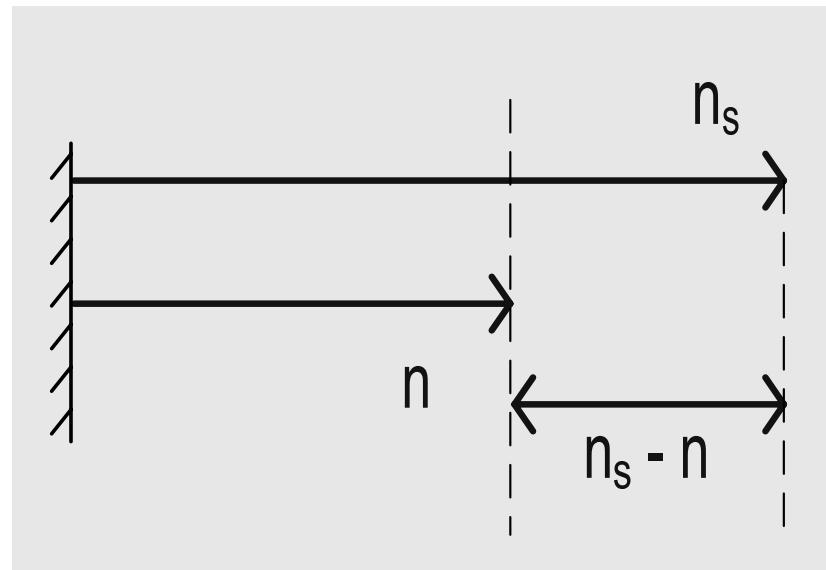
Pojam klizanja asinkronog stroja

- okretno polje se vrti sinkronom brzinom

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

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

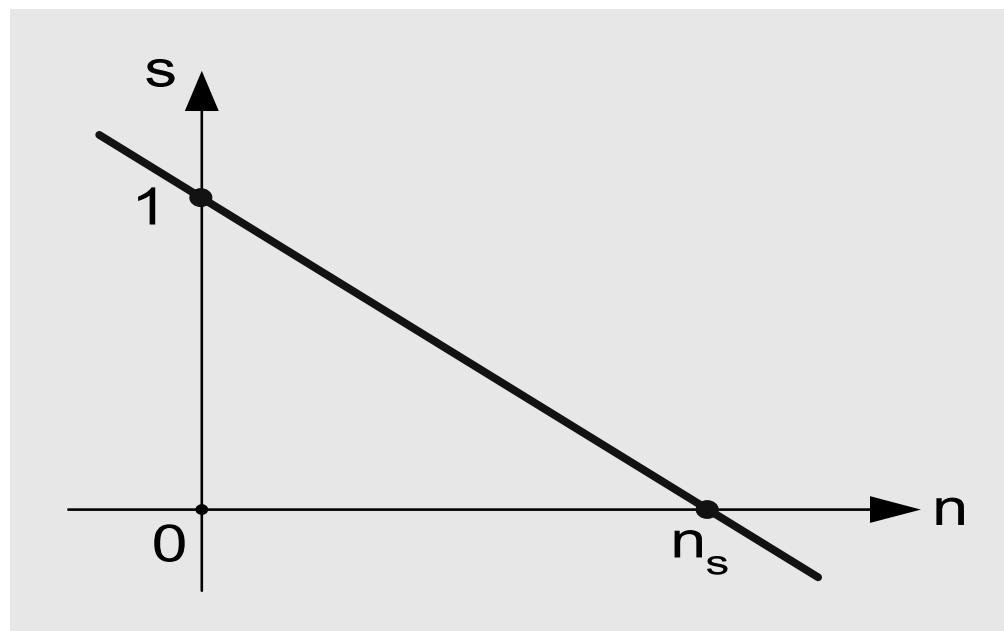
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$$



- brzina vrtnje rotora je nakon definicije klizanja s:

$$n = n_s (1 - s) = \frac{60 f_1}{p} (1 - s) \quad [\text{o/min}]$$

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

- klizanje u tehnički prihvatljivim iznosima mora biti sasvim mala veličina (zbog utjecaja na gubitke energije) te se zbog toga iskazuje u postocima :

$$s [\%] = \frac{n_s - n}{n_s} 100 \%$$

- klizanje se obično kreće između 0,1 i 4 %. Veća vrijednost odnosi se na motore manjih snaga (oko 1kW)

- Primjer iz kataloga

Motor snage 180 W, 400 V, 50HZ, 2p=2 ima brzinu vrtnje pri nazivnom opterećenju 2905 o/min

Klizanje je :

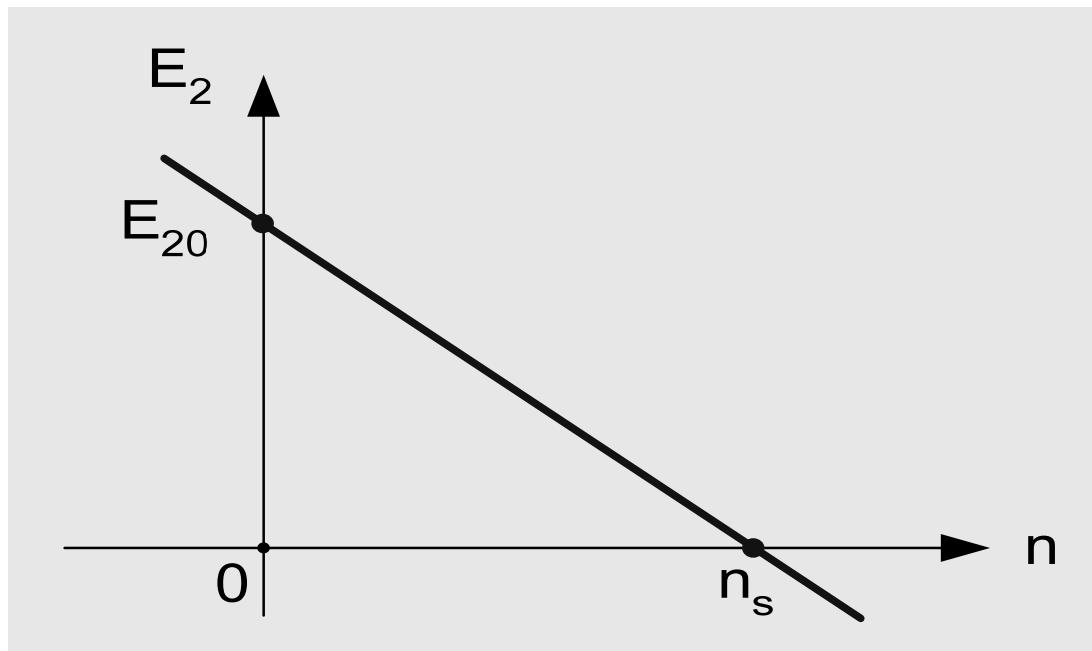
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{3000 - 2900}{3000} 100 = 3,33\%$$

- **Motor snage 10 000 kW , 10 000 V, 50 Hz 2p = 4 , nazivna brzina vrtnje n= 1491 o/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_{20}
- nakon što se rotor počne vrtjeti, mijenja se relativna brzina okretnog polja statora prema rotoru, a napon E_2 mijenja se prema:
$$E_2 = E_{20} s$$
- 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 naziv asinkroni motor.



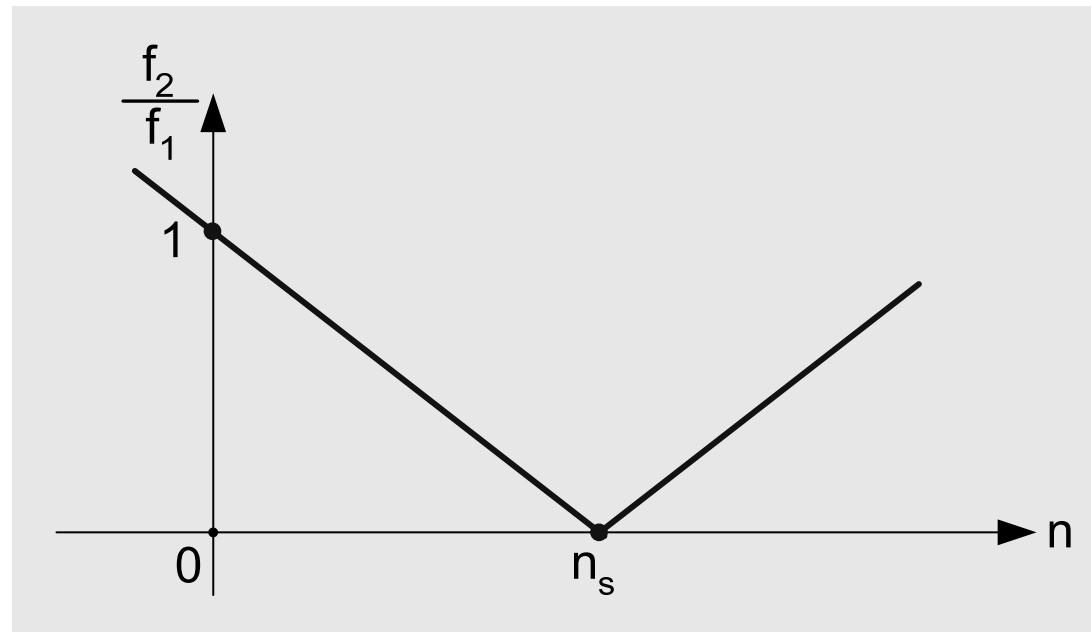
Frekvencija rotorskih struja

- Inducirani napon i struja rotora imat će frekvenciju:

$$f_2 = \frac{p(n_s - n)}{60} = sf_1$$

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 magnetsko polje stvoreno statorskim strujama vrti jednakom brzinom kao i rotorsko okretno polje stvoreno rotorskim strujama. Njihova relativna brzina mora biti jednaka nuli, polja su u sinkronizmu.

$$N_{\text{rotora}} + n_{\text{okretnog polja rotora u odnosu na rotor}} = n_{\text{okretnog polja statora}}$$

- 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 moguća je uvijek pretvorba osim pri vrtnji rotora sinkronom brzinom statorskog polja kada je klizanje jednako nuli.

Asinkroni stroj je pri tome prirodno puno prihvatljiviji za primjenu jer su na raspolaganju velike mogućnosti promjena rotorske brzine vrtnje i frekvencije.

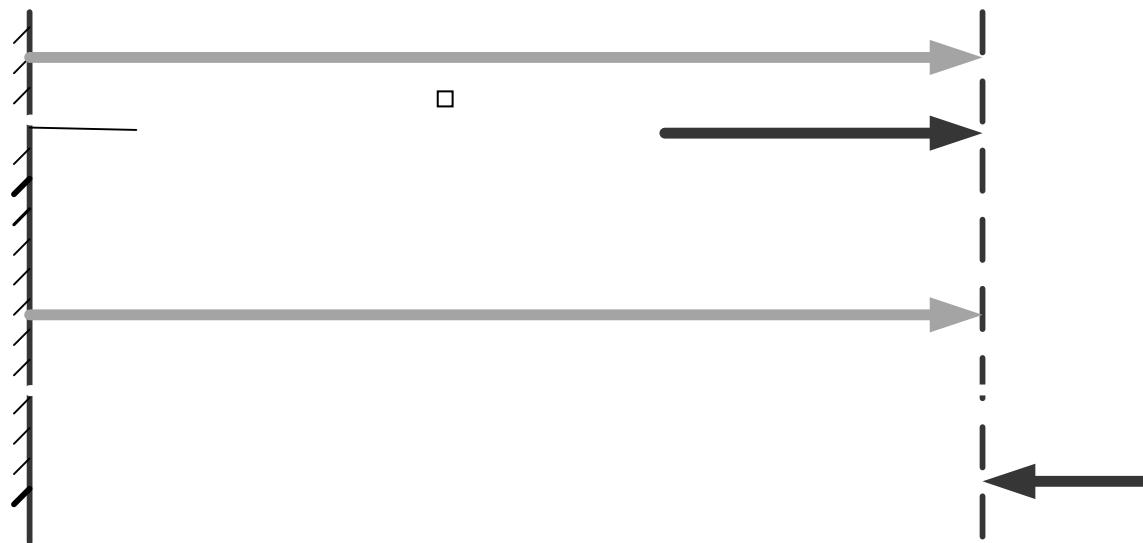
Odnosi brzina vrtnje u asinkronom stroju

n_1 frekvencija vrtnje statorskog okretnog polja

n frekvencija vrtnje rotora

n_2 frekvencija vrtnje rotorskog okretnog polja u odnosu na rotor

$$n + n_2 = n_1$$



- Asinkroni stroj u mirovanju ($s=1$) možemo razmatrati i koristiti kao transformator:

$$\frac{E_{20}}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} \frac{f_{n2}}{f_{n1}} \frac{f_2}{f_1}$$

- Zbog $f_2 = f_1$

$$\frac{E_{20}}{E_1} = \frac{N_2}{N_1} \frac{f_{n2}}{f_{n1}}$$

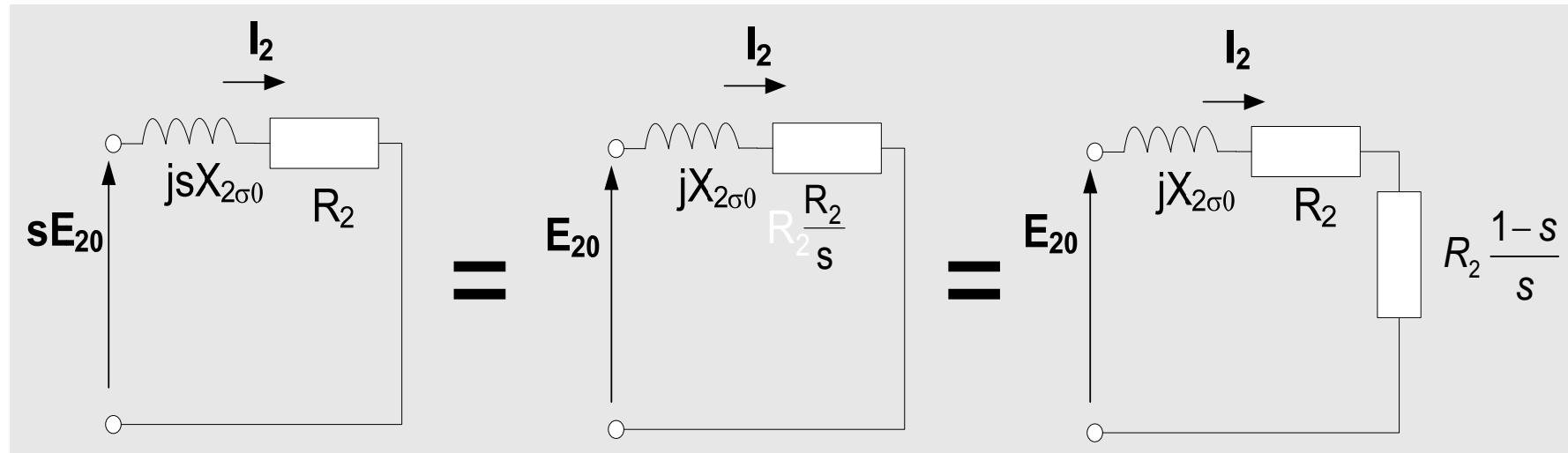
E_2 – napon faze statora

E_{20} – napon faze rotora

f_{n1} i f_{n2} - 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_2 - stvarni otpor u rotoru

$R_2 \frac{1-s}{s}$ - ekvivalent mehaničkog rada

Rotorska struja

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

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2\sigma}^2(s)}}$$

- U mirovanju je

$$E_2 = E_{20}$$

$$X_{2\sigma 0} = \omega_2 L_{2\sigma} = 2\pi f_2 L_{2\sigma}, \quad f_2 = f_1, \quad s = 1$$

- U vrtnji je

$$X_{2\sigma} = 2\pi f_1 s L_{2\sigma} = s X_{2\sigma 0}$$

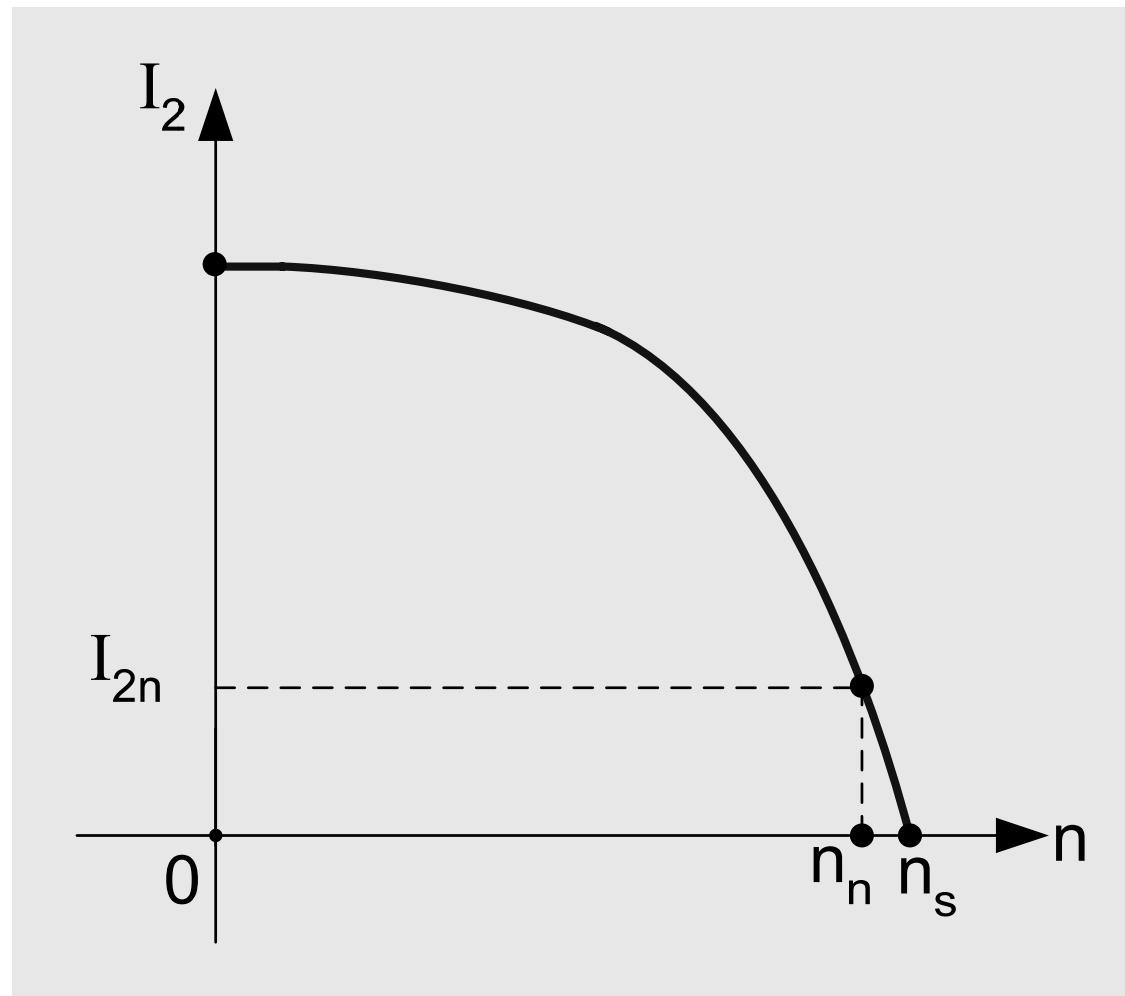
stoga je:

$$I_2(s) = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (sX_{2\sigma 0})^2}} = \frac{E_{20}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2\sigma 0}^2}}$$

- za $s=0$, struja je $I_2(s)=0$

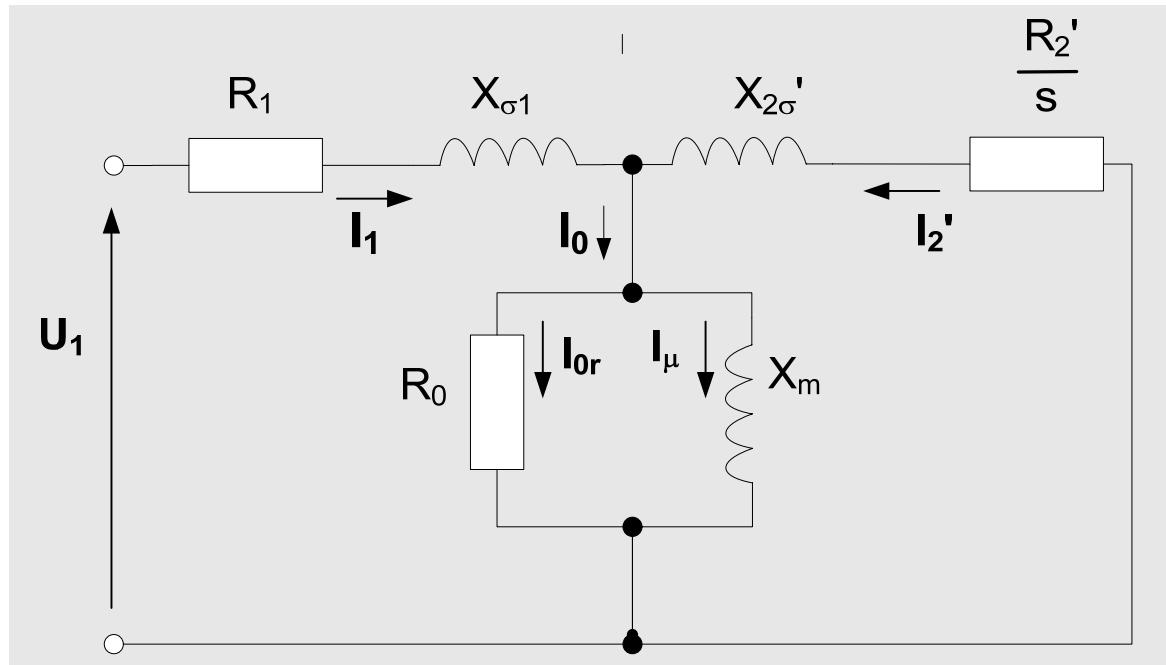
- U kratkom spoju (zakočen rotor) može se zanemariti poprečna grana pa je struja rotora:

$$I_k = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_{\sigma 1} + X_{\sigma 2}')^2}}$$



Nadomjesna shema asinkronog stroja

- slično transformatoru, asinkroni motor možemo prikazati nadomjesnom shemom (modelom) prema slici:

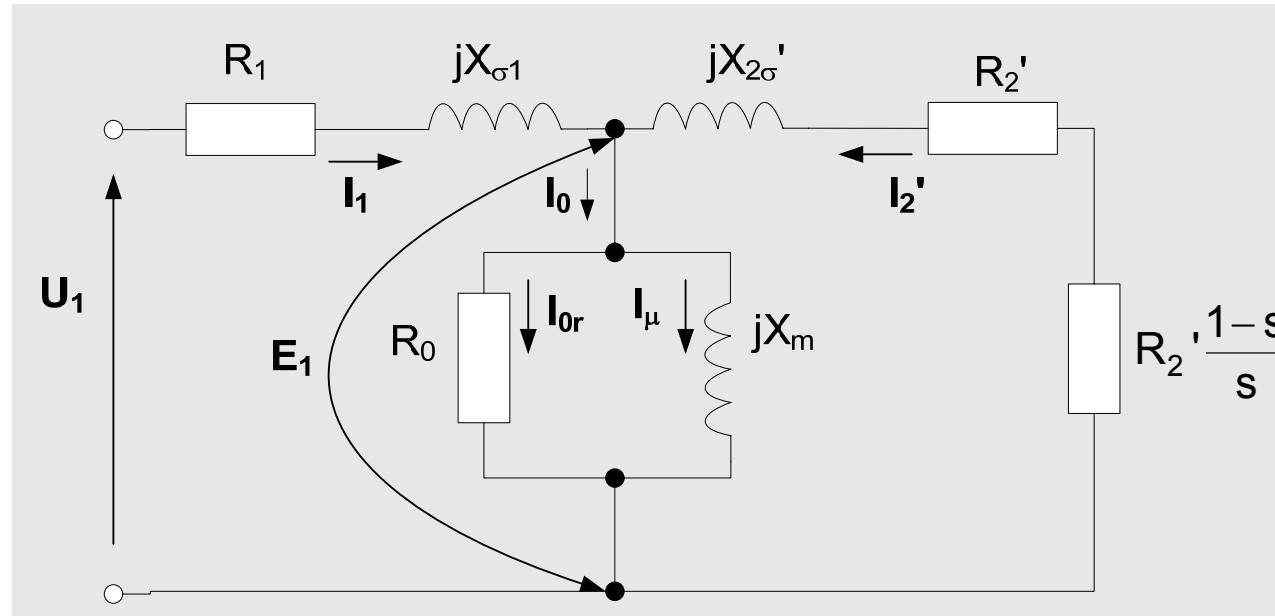


R_1 i $X_{\sigma 1}$ - statorski otpori i rasipna reaktancija

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

R_2' / s i $X_{2\sigma}'$ - rotorski otpor i rasipna reaktancija

- nadomjesna shema se može prikazati u obliku kojem se dade izvesti energetska bilanca motora:



- struje, snage i momente možemo računati primjenom nadomjesne sheme z bilo koje pogonsko stanje

$$I = \frac{U_1}{Z}$$

Pogonska stanja asinkronog stroja

- prazni hod motora – na osovini nema opterećenja, klizanje $s \ll R_2/s \gg$, I_0 mala
- kratki spoj motora – rotor zakočen ili miruje, klizanje $s=1$, Z_k prema shemi, I_k vrlo velika
- opterećenje na osovini – klizanje malo (1-5%), struja ovisna o opterećenju

Energetska bilanca asinkronog stroja

Prema nadomjesnoj shemi za stacionarno stanje:

- iz mreže motor uzima:

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1$$

m_1 – broj faza

φ_1 – fazni pomak struje i napona

- na radnom otporu statora se troši:

$$P_{Cu1} = m_1 I_1^2 R_1$$

- u željezu statora (na R_0):

$$P_{Fe1} = m_1 E_1^2 / R_0 = m_1 I_{0r}^2 R_0$$

- snaga okretnog mag. polja:

$$P_{okr} = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe1}$$

$$P_{okr} = m_2 I_2^2 R_2 / s = m_2 I_2^2 R_2 + m_2 I_2^2 R_2 (1-s) / s$$

- gubici u željezu rotora se zanemare zbog male frekvencije $f_2 \ll$

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

$$P_{2el} = m_2 I_2^2 R_2 \quad \text{– gubici u namotu rotora}$$

$$P_{2meh} = m_2 I_2^2 R_2 (1-s) / s \quad \text{– razvijena mehanička snaga}$$

$$\frac{P_{2el}}{P_{2meh}} = \frac{m_2 I_2^2 R_2}{m_2 I_2^2 R_2 \frac{1-s}{s}} = \frac{s}{1-s}$$

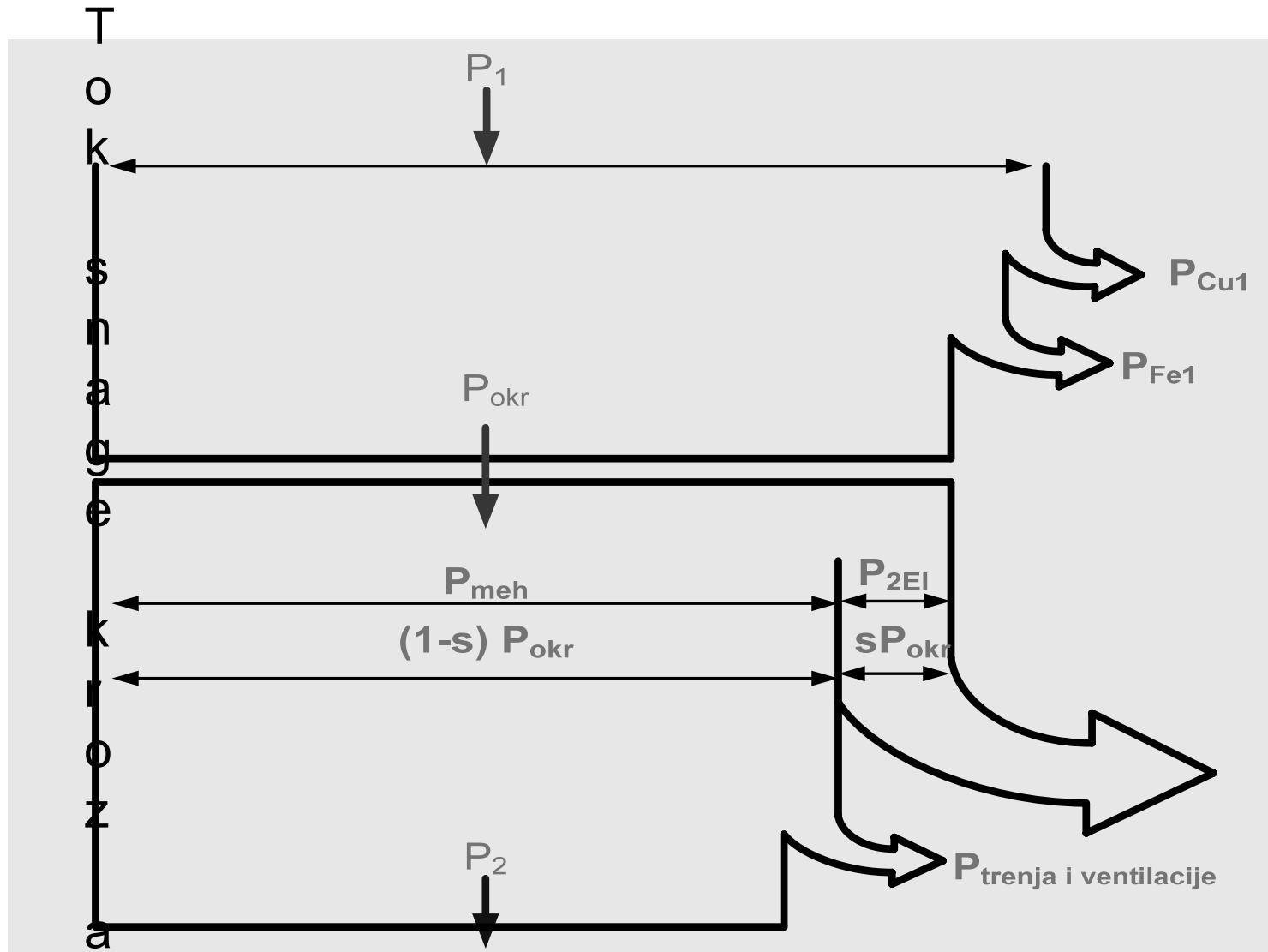
■ $P_{2el} = s P_{okr}$

- gubici u rotoru direktno su proporcionalni klizanju stroja, stoga s mora biti što manje za prihvatljivu pretvorbu energije. Klizanje ne može biti 0, ali treba biti malo. obično (0,5-5%)

Na primjer:

- mali motori	< 20 kW	$s = 3-5\%$
- srednji motori	< 500 kW	$s = 1,5-2\%$
- veliki motori	> 1000 kW	$s = 0,5-1\%$

Tok snage i gubitci asinkronog motora (bilanca snage)



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

- Za stvaranje okretnog mag. polja asinkroni stroj uzima iz mreže jalovu snagu

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin\phi_1$$

- Prividna snaga motora je: $S = m_1 U_1 I_1$
 - Motor je uvijek 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:

asinkroni trofazni motor, snaga 1000 kW
napon 6000 V, frekvencija 50 Hz
brzina vrtnje 1485 okr/min, $\cos\phi=0,88$
nazivna struja 115 A

Momentna karakteristika

$$\begin{aligned} M &= \frac{P}{\omega} = \frac{P_{meh}}{\omega_{meh}} = \frac{(1-s) P_{okr}}{(1-s) \omega_{sm}} = \frac{P_{okr}}{\omega_{sm}} = \frac{m_2 I_2^2 R_2}{\omega_{sm} s} = \\ &= - \frac{m_2 E_{20}^2}{\omega_{sm} \left[\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_{2\sigma 0}^2 \right]} \frac{R_2}{s} = \\ &= - \frac{30 m_2 E_{20}^2 R_2}{n_s \pi \left[\left(\frac{R_2}{s} \right)^2 + X_{2\sigma 0}^2 \right]} \frac{1}{s} \quad [N \cdot m] \end{aligned}$$

- zanemarili smo u nadomjesnoj shemi $Z_1=R_1+jX_{\sigma 1}$ i dobili izraz u kojem je razvijeni mehanički moment na osovini funkcija samo jedne varijable s
- ostali su parametri u nadomjesnoj shemi konstantni. Ako se uzme potpuna nadomjesna shema dobije se precizniji izraz za moment.

Točnija momentna karakteristika-poprečna grana premještena na ulaz sheme

Iz nadomjesne sheme računamo struju i moment:

$$I_r' = \frac{U_s}{\left(R_s + \frac{R_r'}{s} \right) + j(X_{ss} + X_{sr}')}$$

○

○

- 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

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

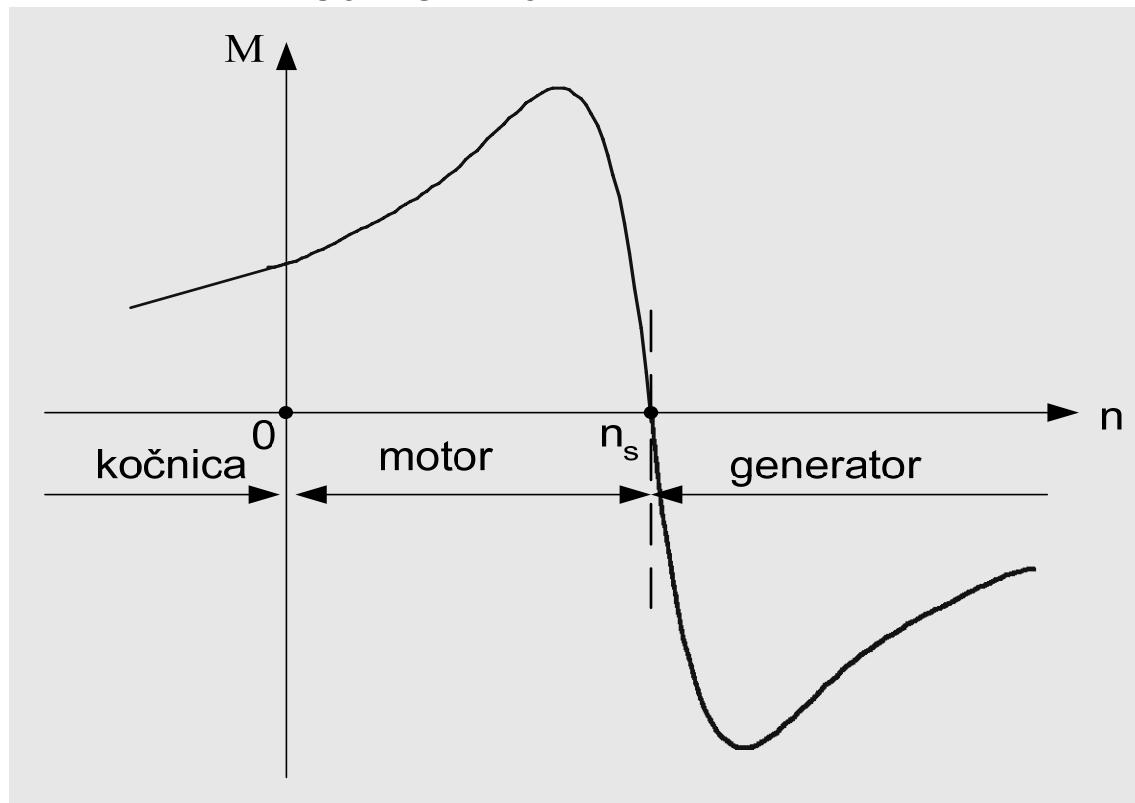
$$= \frac{p m_r}{\omega_s} \frac{U_s^2}{\left[\left(R_s + \frac{R_r'}{s} \right)^2 + (X_{ss} + X_{sr}')^2 \right]} \frac{R_r'}{s}$$

- Bitno je istaknuti da je moment u svakoj točci ovisan o kvadru narinutog napona:

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

- Općenito momentna karakteristika izgleda prema slici. Na noj su karakteristična radna 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 gibanja mehanizama koči rotor



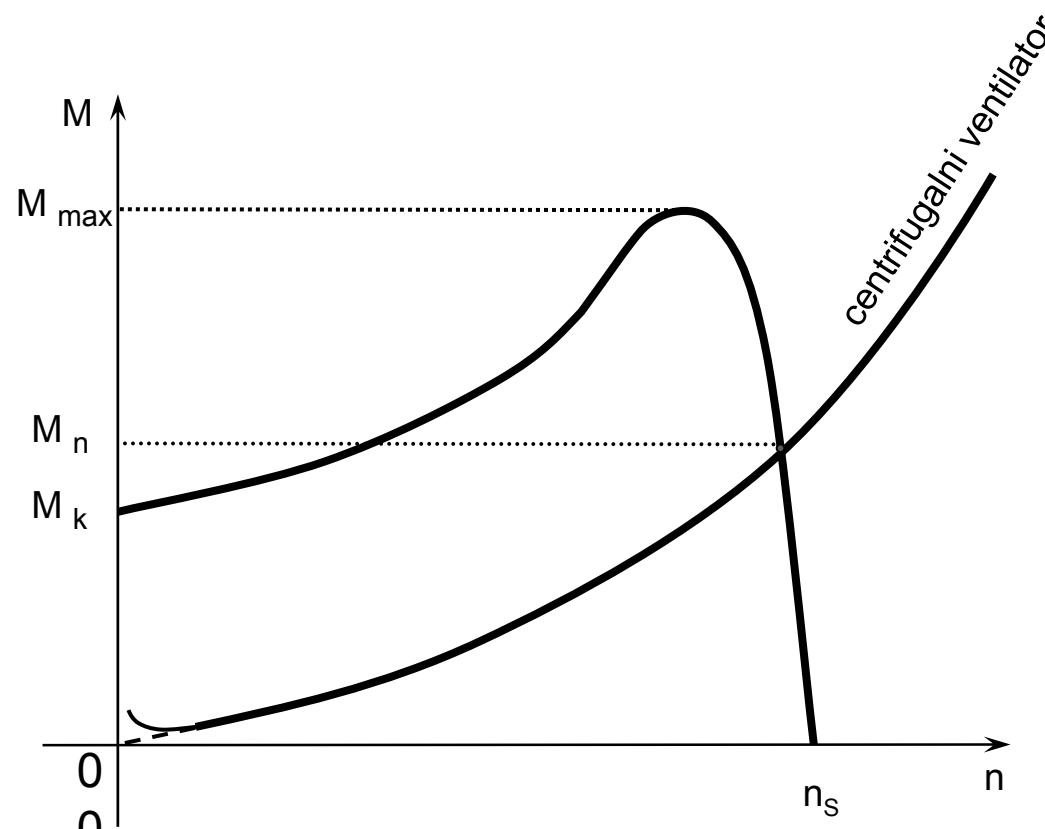
Maksimalni ili prekretni moment

- Za primjene je važan maksimalni ili prekretni moment motora
- Derivacijom izraza za moment i izjednačavanjem s nulom dobijemo
- Dobije se klizanje (brzina) kod kojeg motor razvija najveći moment vrtnje

$$s_{\max} = \pm \frac{R'_2}{\sqrt{R^2_1 + (X'_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2}} \quad i \text{ maksimalni moment}$$

$$M_{\max} = \frac{m_1 U^2}{2 \omega_{smeh} \left[\pm R_1 + \sqrt{R^2_1 + (X_{\sigma 1} + X'_{\sigma 2})^2} \right]}$$

Mehanička karakteristika asinkronog motora i centrifugalnog ventilatora



M_n nazivni moment

M_k moment kratkog spoja

M_{max} maksimalni moment

Klosove formule

Klosova formula

U praksi koristimo analitički izraz za momemtnu karakteristiku poznat kao Klossova formula. Dobije se ako se podijeli izraz za moment s izrazom za maks. moment

$$\frac{M}{M_{\max}} = \frac{\frac{2+\beta}{S} + \frac{S_{\max}}{S}}{1 + \frac{S_{\max}}{S}}$$
$$\beta = \frac{2R_1}{\sqrt{R_1 + (X_{\sigma^1} + X'_{\sigma^2})}}$$

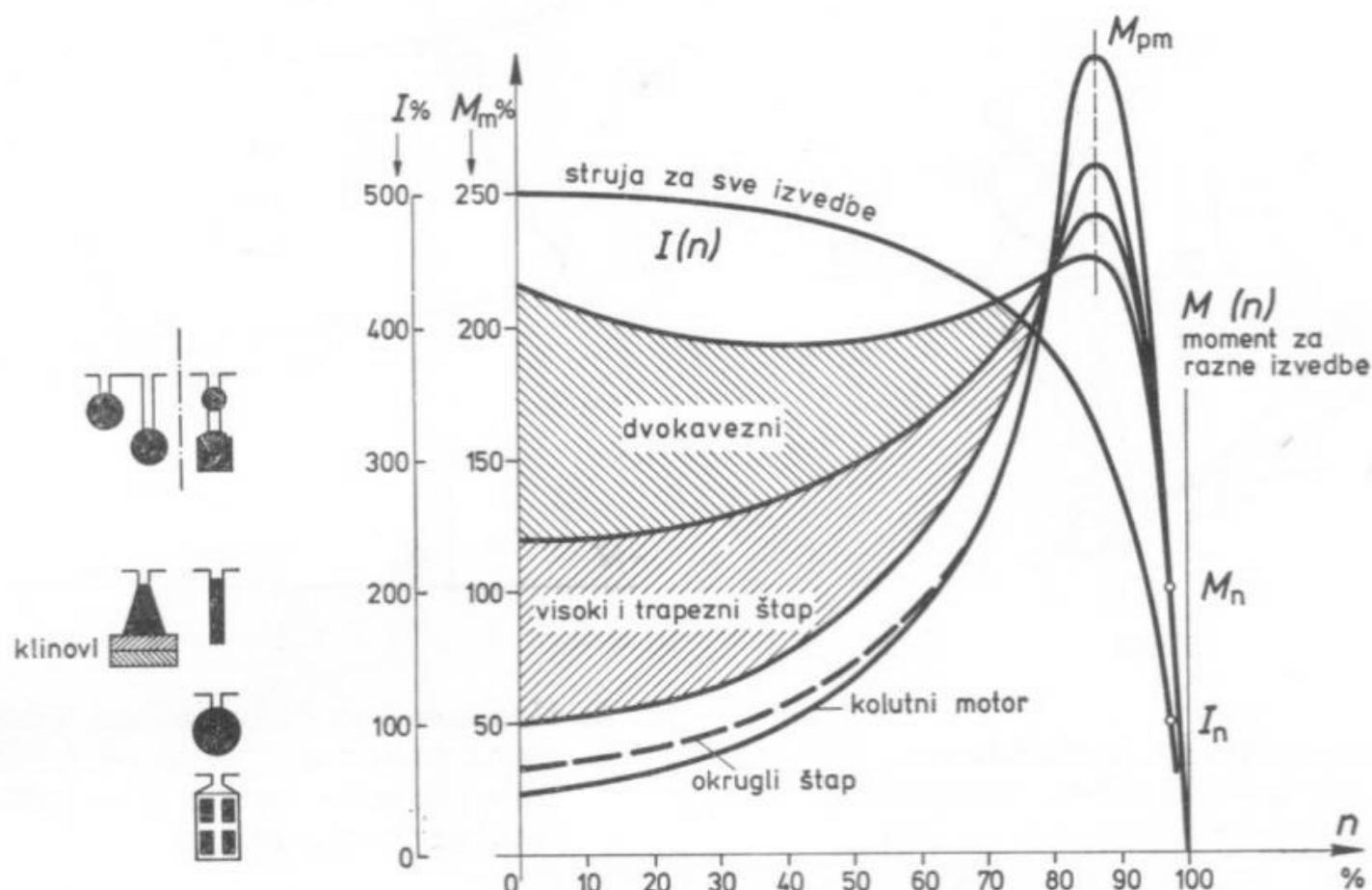
Za manje točna računanja može se primjeniti pojednostavljena KF u obliku

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

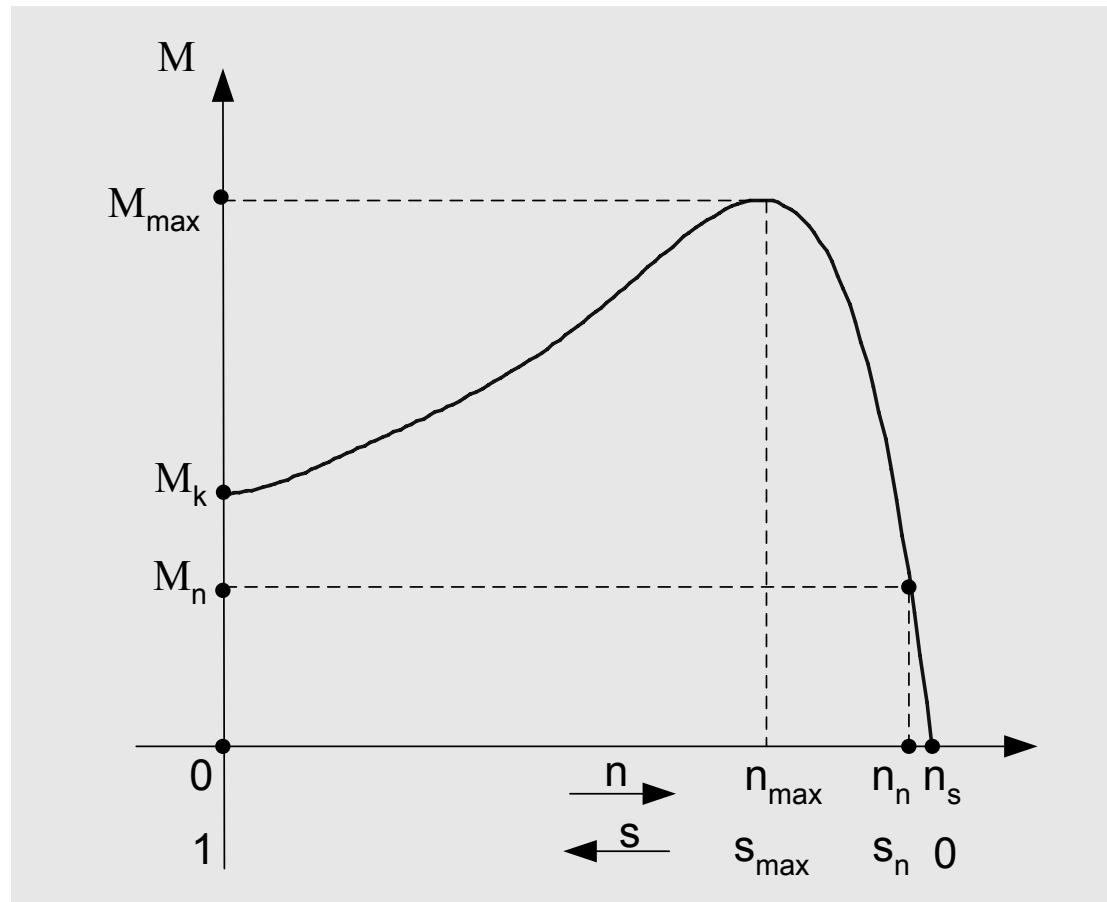
Različiti oblici momentne karakteristike asinkronih trofaznih motora

Oblik momentne karakteristike ovisi o odnosima induktivnih i omskih otpora

Oblikom rotorskog utora utječe se na oblik momentne karakteristike

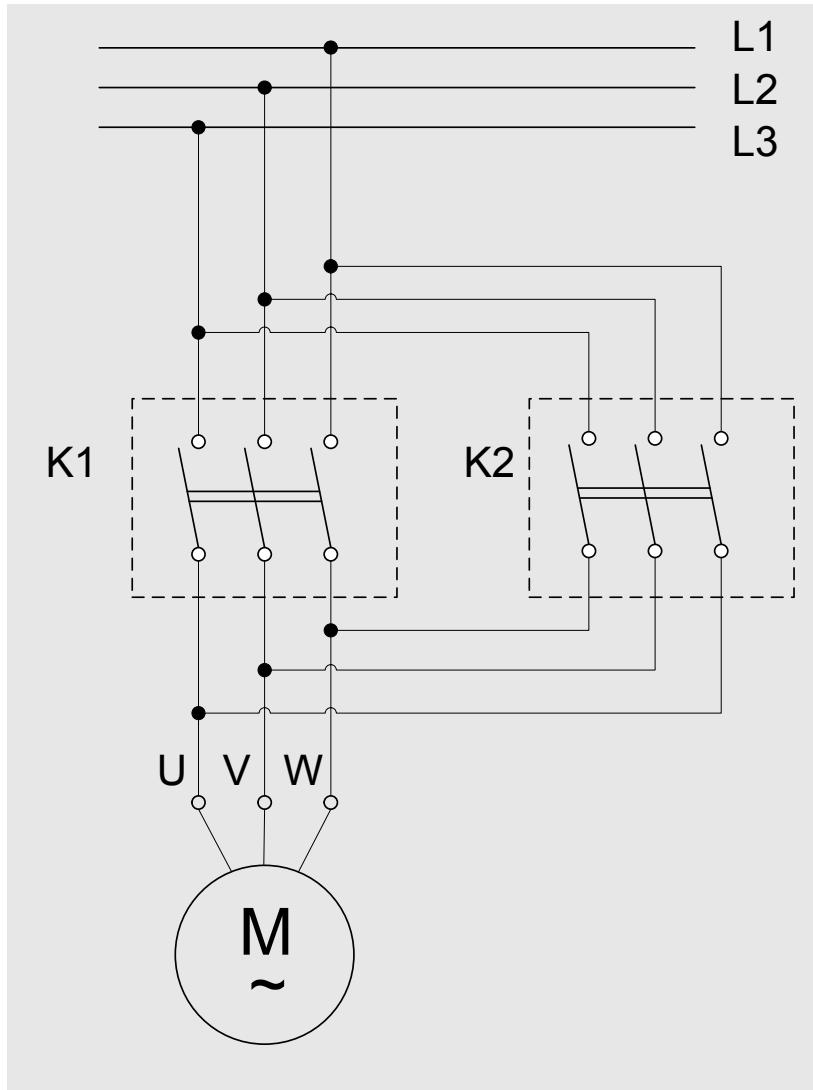


- grafički, momentna karakteristika najčešće izgleda kao na slici:



- na momentnoj karakteristici ključne su 3 točke:
 - $s=1$, $n=0$ - potezni moment ili moment kratkog spoja
 - $s=s_n$, $n=n_n$ - nazivni moment
 - $s=s_{\max}$, $n=n_{\max}$ - maksimalni moment

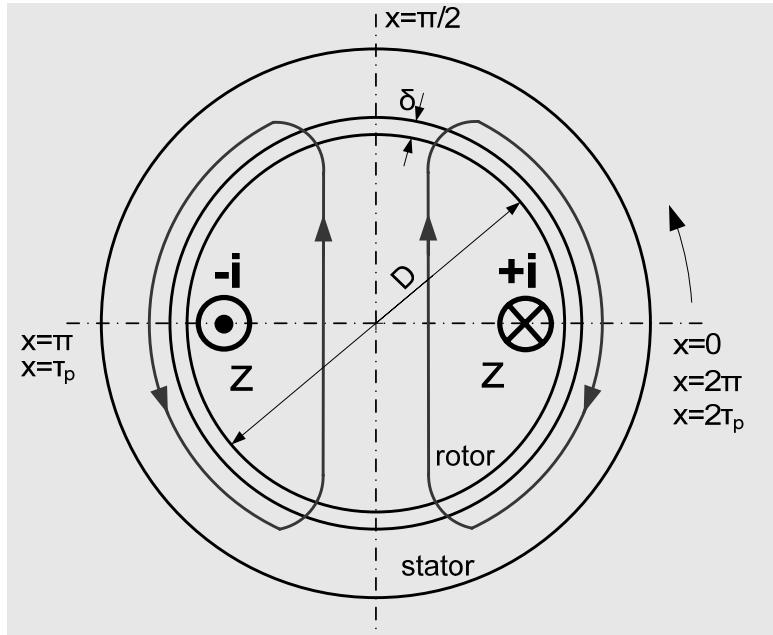
Promjena smjera vrtnje (reverziranje) asinkronog motora



- 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, i W – oznake stezaljki motora
- L1, L2 i L3 – oznake faza mreže
- K1 i K2 – kontaktori (sklopnici)

- 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 je z
- formiraju se 2 magnetska pola, $2p=2$
- polni korak je $\tau_p = D\pi/2p$

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

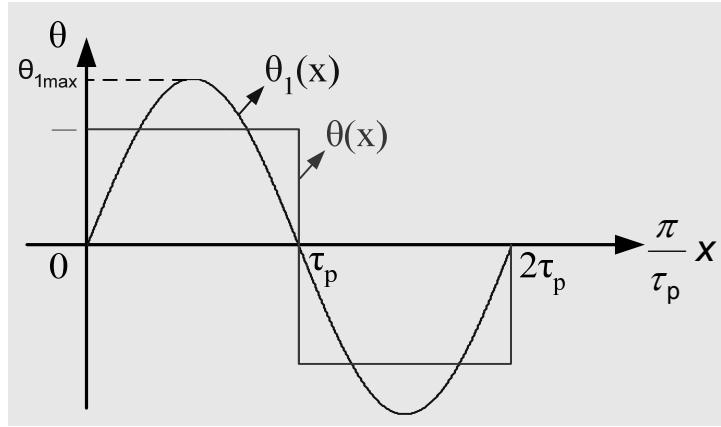
- broj pari polova obično označavamo s p , a ukupni broj polova je onda $2p$. Za jednu silnicu se primjenom zakona protjecanja može pisati:

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

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

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

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



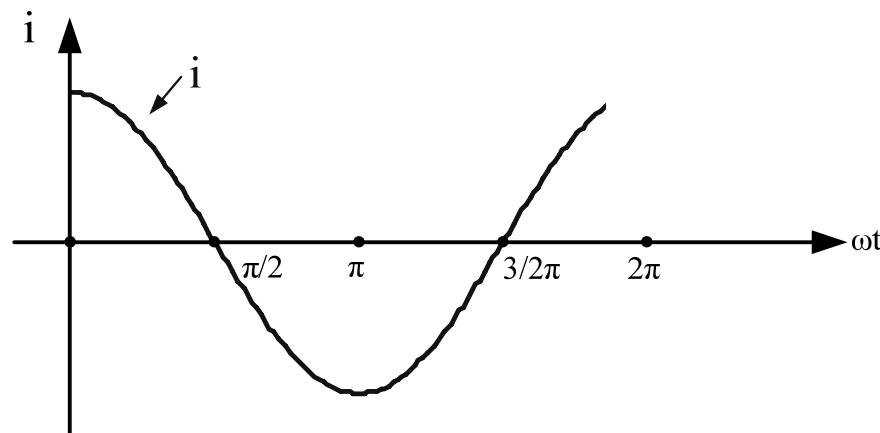
- dobili smo protjecanje θ raspodijeljeno uzduž oboda stroja prema slici (crveno). Ono je konst. jer je zračni raspor δ konstantan i struja vremenski nepromjenjiva.

b) raspodjela protjecanja uzduž zračnog raspora δ ,

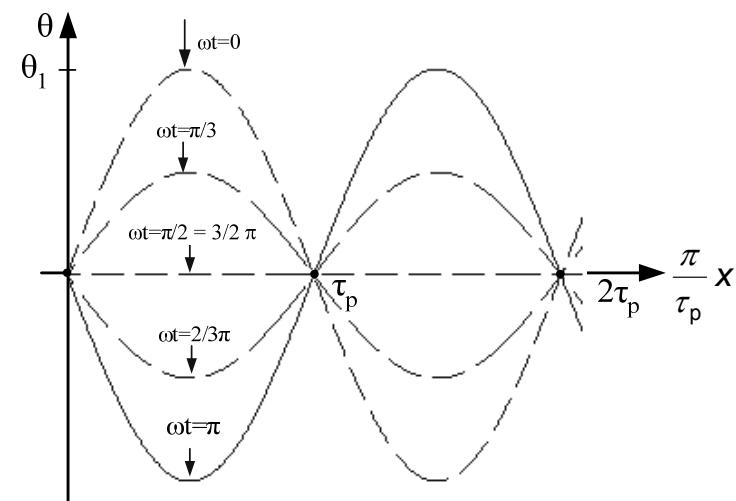
$$\text{i osnovni harmonik } \theta_1(x) = \theta_{1\max} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right)$$

- osnovni harmonik protjecanja je: $\theta_1(x) = \theta_{1\max} \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right)$
- indukcija magnetskog polja uzduž raspora je : $B_\delta = \mu_0 H_\delta = \mu_0 \frac{i \cdot z}{2\delta}$
 - H_δ 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

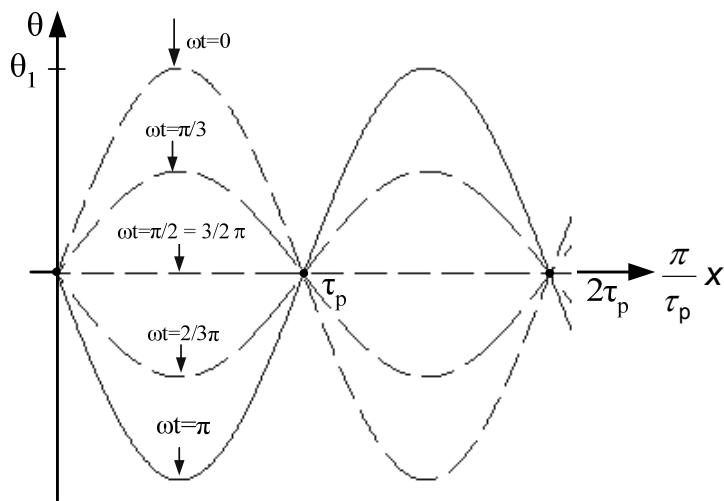


Promjena struje svitka $i=I\sqrt{2} \cos\omega t$



Pulsirajuće protjecanje jednog svitka,
osnovni harmonik

- Stvoreno pulsirajuće magnetsko polje se može prikazati izrazom:



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

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

θ_1 – amplituda protjecanja u trenutku $\omega t=0$
(kada je struja maksimalna)

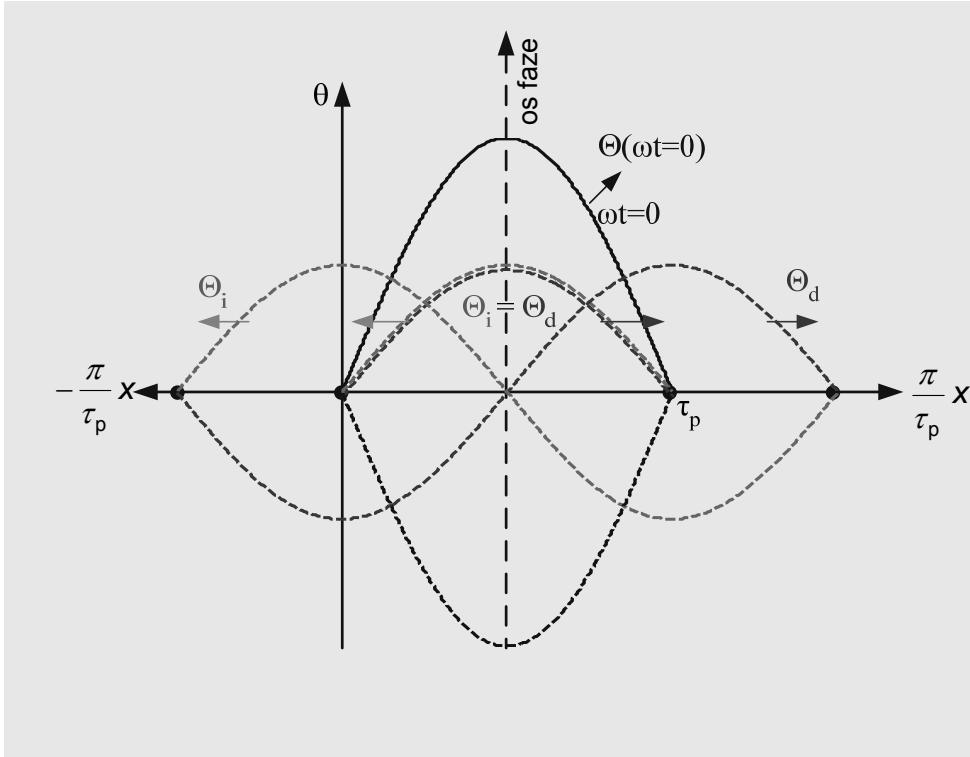
$$\Theta_{1t} = \Theta_1 \cos(\omega t)$$

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

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

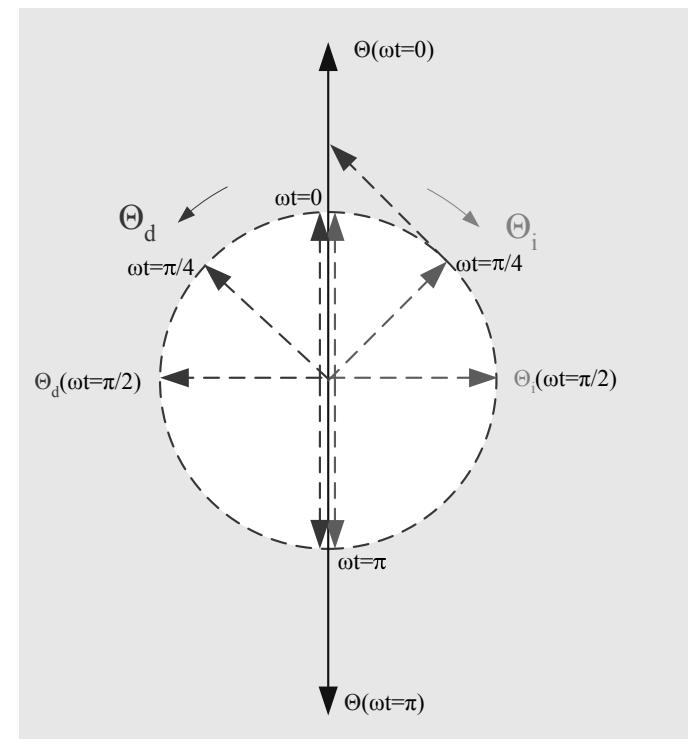
- Uobičajeni je naziv **direktno protjecanje i inverzno protjecanje** (engleski CW i CCW):

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



- 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, ω kružna frekvencija

$$x = vt + x_0$$

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 ω_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:

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

- ω_m je stvarna kutna brzina kojom se prostorno kreće val za razliku od električne kutne brzine ω 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 ω_m i kružna frekvencija ω 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 ω_m . Brzina vrtnje n pokazuje koliko ima punih okretaja u 1 minuti ili 1 sekundi:

$$\begin{aligned}1 \text{ puni okretaj} &= 2\pi \text{ radijana} \\n \text{ okretaja u minuti} &= n/60 \text{ okretaja u sekundi}\end{aligned}$$

pa brzini vrtnje n odgovara kutna brzina:

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

Brzina vrtnje okretnog polja biti će:

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

a veza frekvencije induciranih napona i brzine vrtnje polja:

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

Trofazna okretna polja

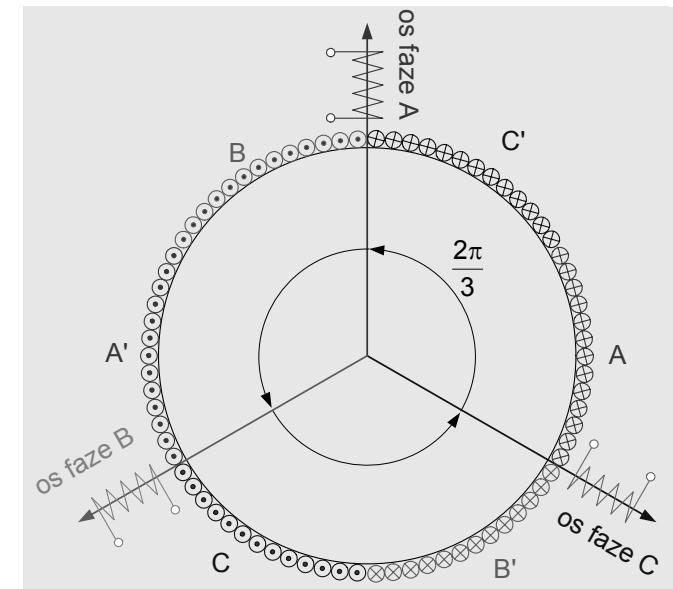
- Osnovni prostorni harmonički članovi protjecanja triju prostorno za $2\pi/3$ pomaknutih namota (faza) A, B i C su:

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

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

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

Sljedeća faza

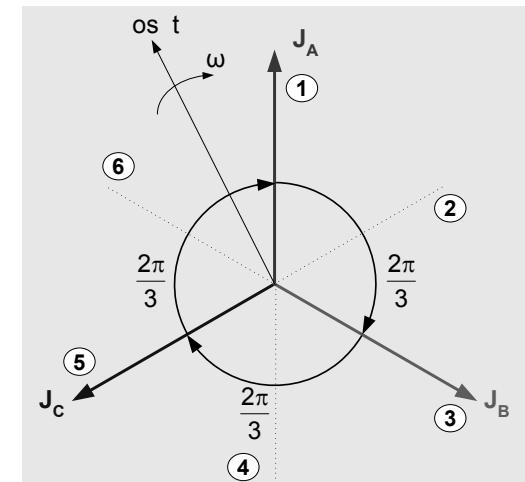


- Ako namotima A, B i C teku izmjenične struje vremenski (fazno) međusobno pomaknute za $2\pi/3$, u svakom namotu se stvaraju pulsirajuća protjecanja:

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

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

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



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

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

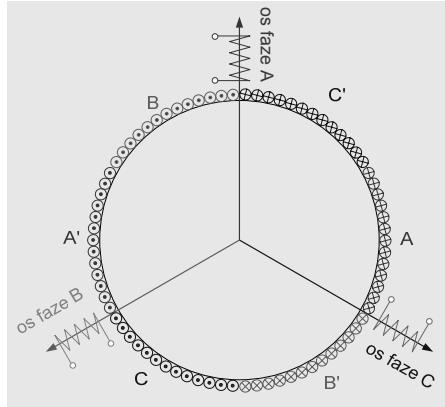
$$\sum \Theta_{x,tABC} = \frac{3}{2}\Theta_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p}x - \omega t\right) + 0$$

- 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:

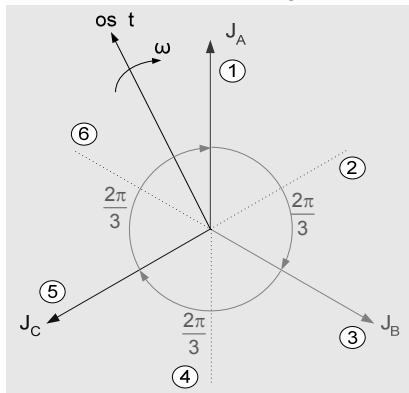
$$n_s = \frac{60f}{p} \text{ (r/min)}$$

Trofazna okretna protjecanja (polja), prikaz rotirajućim vektorima

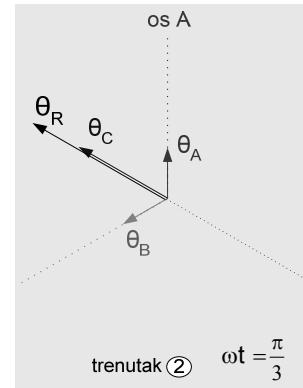
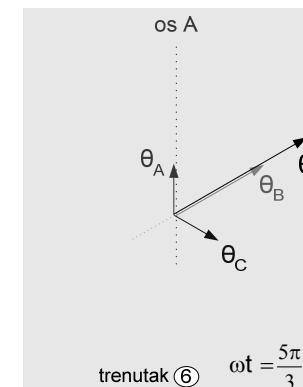
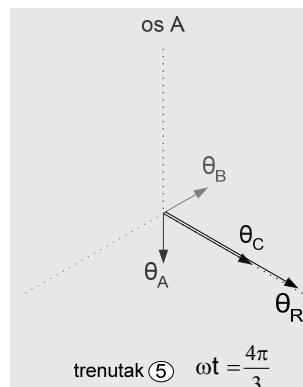
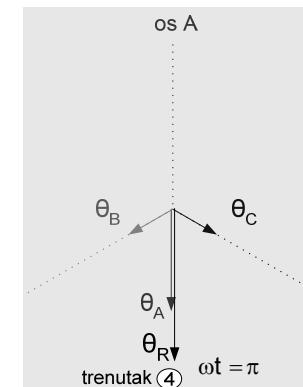
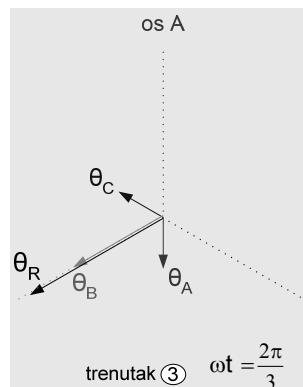
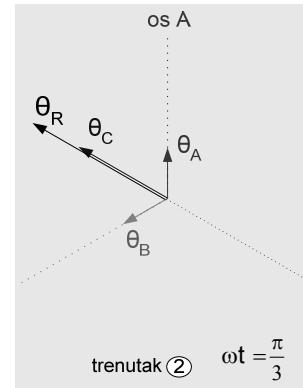
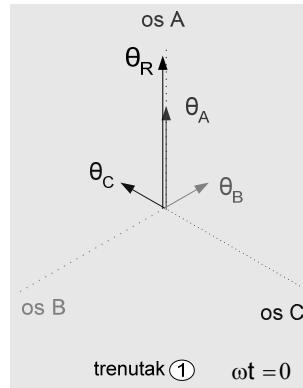
Prostorna raspodjela 3-faznih namota:



Fazorska slika struja kroz namote:



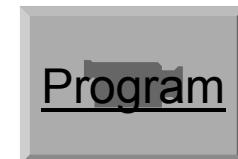
- Promotrimo položaje i iznose rezultirajućeg protjecanja R u prostoru za trenutke kada je vremenska os t u položajima 1 do 7:



- θ_A – protjecanje faze A
- θ_B – protjecanje faze B
- θ_C – protjecanje faze C
- θ_R – rezultantno protjecanje

Sljedeći
trenutak

Programski prikaz okretnog magnetskog polja



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 Θ_d :

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

i brzine vrtnje:

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

- 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.

