

# ASINHRONE MAŠINE

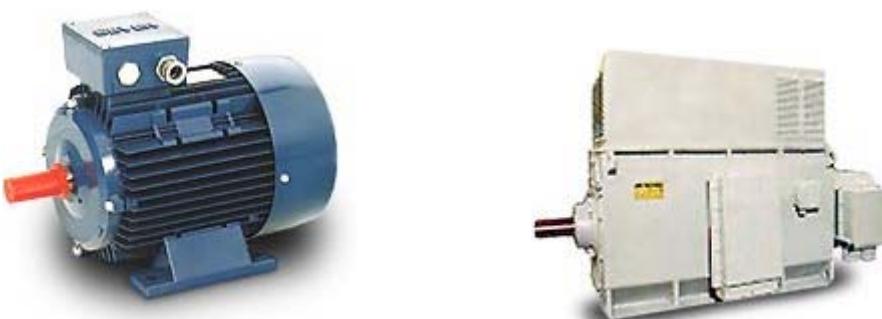
# SADRŽAJ

1 ASINHRONE MAŠINE .....	4
1.1 Namotaji mašina za naizmeničnu struju.....	4
1.2 Elektromotorna sila .....	5
1.2.1 Elektromotorna sila jednog provodnika .....	6
1.2.2 Elektromotorna sila jednog navojka i jednog navojnog dela .....	8
1.2.3 Pojasni navojni sačinilac .....	8
1.2.4 Tetivni navojni sačinilac .....	10
1.2.5 Izraz elektromotorne sile namotaja jedne faze .....	11
1.2.6 Trofazni namotaj .....	11
1.3 Magnetopobudna sila.....	12
1.3.1 Naizmenično polje .....	13
1.3.2 Obrtno polje .....	13
1.3.3 Jednofazno polje.....	15
1.3.4 Izraz magnetopobudne sile.....	16
1.4 Osnovni tipovi i karakteristike .....	16
1.4.1 Trofazni motor sa namotanim rotorom .....	17
1.4.2 Trofazni motor sa kratkospojenim rotorom .....	17
1.5 Osnovni princip rada .....	17
1.6 Ekvivalentna šema asinhronne mašine .....	19
1.7 Bilans aktivne snage .....	20
1.8 Karakteristika momenta asinhronog motora .....	21
1.9 Karakteristika struje rotora .....	24
1.10 Stabilnost pogona.....	25
1.11 Pokretanje asinhronih motora .....	26
1.11.1 Pokretanje asinhronih mašina sa namotanim rotorom.....	27
1.11.2 Pokretanje asinhronih mašina sa kratkospojenim rotorom.....	29
1.11.3 Simulacija pokretanja asinhronih mašina.....	32
1.12 Regulisanje brzine obrtanja asinhronih motora .....	34
1.12.1 Regulisanje brzine asinhronih mašina sa namotanim rotorom.....	35

1.12.2	Regulisanje brzine asinhronih mašina sa kratkospojenim rotorom .....	35
1.13	Viši harmonici.....	39
1.13.1	Viši prostorni harmonici (za osnovni vremenski) .....	39
1.13.2	Viši vremenski harmonici (za osnovni prostorni) .....	41
1.13.3	Asinhroni momenti.....	42
1.13.4	Sinhroni momenti .....	43
1.13.5	Sile vibracija.....	43
1.13.6	Mere za smanjenje uticaja viših harmonika .....	43
1.14	Obrtni transformator .....	44
1.15	Jednofazni asinhroni motori.....	46
1.16	Asinhroni generator .....	48
1.17	Literatura.....	51

# 1 ASINHRONE MAŠINE

Asinhrona mašina se u primeni najčešće susreće kao motor, i to trofazni. Tipični je predstavnik električne mašine male snage koja se obično pravi u velikim serijama. Prednosti asinhronih mašina, u odnosu na ostale vrste električnih mašina, su prvenstveno manja cena, jednostavnost konstrukcije, manji momenat inercije, robusnost, pouzdanost i sigurnost u radu, lako održavanje, dok su nedostaci vezani uglavnom za uslove pokretanja i mogućnost regulisanja brzine obrtanja u širokim granicama. Primena mikroprocesora i energetske elektronike omogućila je ekonomično upravljanje motorima za naizmeničnu struju i time konkurentnost i u području pogona sa promenljivom brzinom.



Slika 1-1 a) niskonaponski motor b) visokonaponski motor

Pre nego što se detaljnije upoznamo sa radom asinhrone mašine, biće dat osnovni opis namotaja mašina za naizmeničnu struju.

## 1.1 Namotaji mašina za naizmeničnu struju

Električne mašine za naizmeničnu struju obično imaju dva namotaja, induktor i indukt (Tabela 1-1).

*Induktor* (pobuda, primar u analogiji sa transformatorom) – namotaj kroz koji prolazi električna struja i stvara magnetsko polje koje magneti čitavo magnetsko kolo mašine.

*Indukt* (sekundar u analogiji sa transformatorom) – namotaj u kome se pod uticajem promena magnetskog fluksa induktora indukuju elektromotorne sile (*ems*), a ako je električno kolo namotaja zatvoreno, i struje.

Namotaji mogu biti namotani na istaknute polove ili smešteni u žlebove koji su aksijalno postavljeni po obimu induktora ili indukta. Namotaji za naizmeničnu struju su uvek raspoređeni u žlebove.

**Tabela 1-1 Namotaji mašina za naizmeničnu struju**

Mašina / namotaj	<i>Induktor</i> (smeštaj, oblik struje)	<i>Indukt</i> (smeštaj, oblik struje)
<i>asinhrona</i>	stator, naizmenični	rotor, naizmenični
<i>sinhrona</i>	rotor, jednosmerni	stator, naizmenični

Za predstavljanje namotaja upotrebljavaju se razvijene i kružne šeme. Razvijena šema se dobija kada se cilindrična površina statora i rotora, gledano sa strane žlebova, preseče po jednoj izvodnici i razvije u jednu ravan. Kružne šeme prikazuju ili izgled namotaja statora ili rotora sa bočne strane, ili njihov radijalni presek.

Standardne oznake krajeva namotaja trofaznih naizmeničnih mašina su:

**Tabela 1-2 Oznake krajeva namotaja trofaznih naizmeničnih mašina**

namotaj	nova oznaka	stara oznaka
statora	U1, U2 V1, V2 W1, W2	U, X V, Y W, Z
rotora asinhrona mašina	K1, K2 L1, L2 M1, M2	u, x v, y w, z
rotora (pobudni) sinhrona mašina	P1, P2	I, K

Namotaj pobude (induktora) asinhronke mašine smešten je u otvorene ili poluzatvorene žlebove statora. Namotaj indukta je smešten na rotoru. S obzirom na način izvođenja namotaja rotora (indukta), razlikujemo dva osnovna tipa asinhronih mašina:

- sa namotanim rotorom (klizno-kolutne) i
- kratkospojenim rotorom (kavezne).

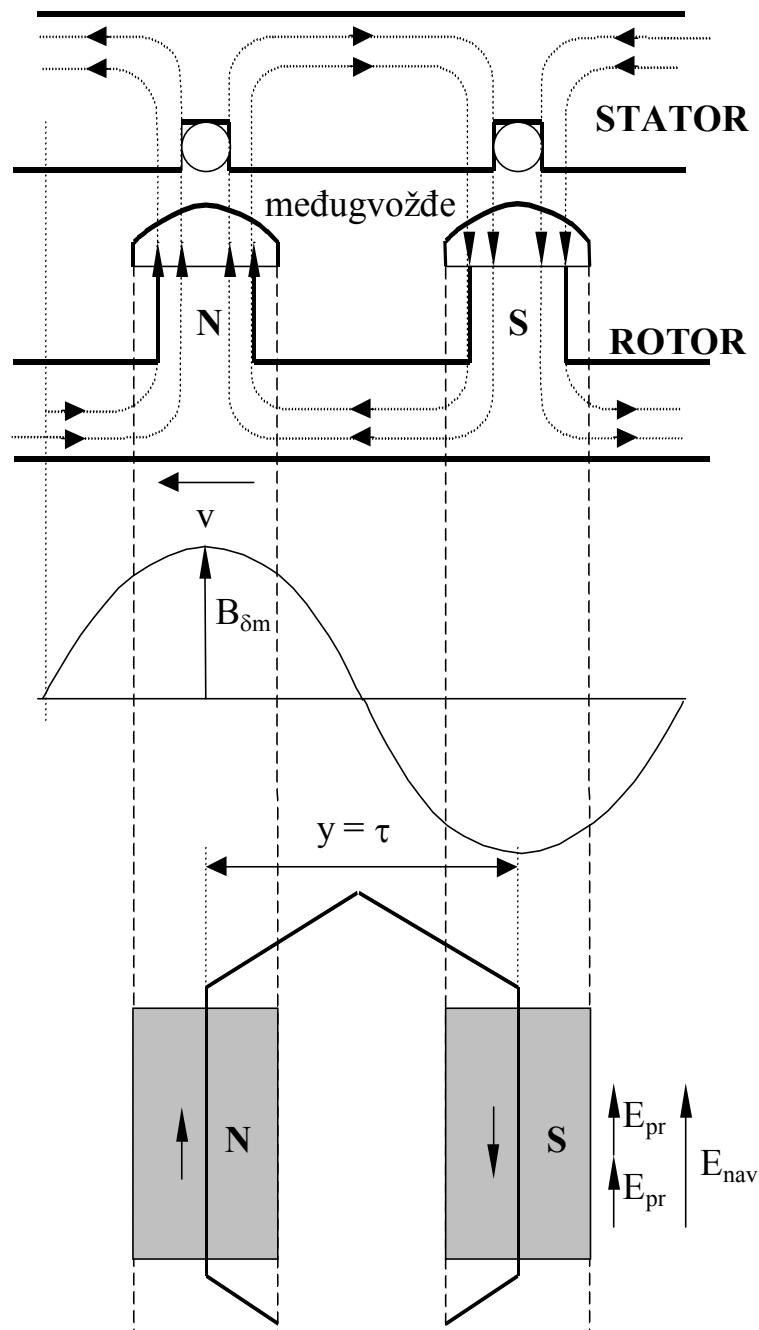
## 1.2 Elektromotorna sila

*Naizmeničnu elektromotornu silu (ems)* karakterišu veličina, učestanost (frekvencija) i oblik. Veličinu i učestanost nije teško postići, dok je znatno teže postići željeni oblik. Obično se želi postići harmoničan oblik, što vodi na potiskivanje (suzbijanje) harmonika višeg reda.

U daljem izlaganju uglavnom ćemo se ograničiti na osnovni harmonik.

### 1.2.1 Elektromotorna sila jednog provodnika

Na slici 1-2 prikazan je stator sa dva žleba sa po jednim provodnikom po žlebu i rotor koji ima dva istaknuta magnetska pola (N i S) od permanentnih magneta.



Slika 1-2 Stator sa dva žleba

Uzmimo da se magnetsko polje u međugvožđu (zazoru) menja po harmoničnom zakonu. Harmonična raspodela magnetskog polja postiže se podesnim oblikom polnih nastavaka. Fluks u osi pola, gde je međugvožđe najmanje, je maksimalan. Trenutna vrednost indukcije biće:  $b(t)=B_{\delta m} \sin \theta$ , gde je  $\theta$  ugao računat od ose koja deli dva pola. Ovde treba obratiti pažnju na činjenicu da je  $\theta$  tzv. električni ugao, jer se električna slika

ponavlja za svaki par polova. Ako sa  $p$  označimo *broj pari polova*, odnos između električnog ugla  $\theta$  i mehaničkog ugla  $\alpha$  je sledeći:  $\theta = p\alpha$ .

Odnos između maksimalne  $B_{\delta m}$ , efektivne  $B_\delta$  i srednje vrednosti indukcije  $B_{\delta sr}$  za sinusni oblik je sledeći:

$$B_\delta = \frac{B_{\delta m}}{\sqrt{2}}, \quad B_{\delta sr} = \frac{2}{\pi} B_{\delta m} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} B_\delta > \frac{B_\delta}{B_{\delta sr}} = k_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,11$$

gde je  $k_f$  sačinilac oblika (odnos između efektivne i srednje vrednosti).

Na prethodnoj slici sa  $y$  je označen *navojni korak*, tj. rastojanje između dva provodnika koji se povezuju u jedan navojak, dok je sa  $\tau$  označen *polni korak*, tj. rastojanje između osa susednih polova.

Kada se rotor obrće on nosi sa sobom magnetsko polje, koje seče provodnike nepokretnog statora i u njima indukuje *ems*.

Trenutna vrednost *ems* jednog provodnika je:

$$e_{pr}(t) = l_s v b(t)$$

gde je  $l_s$  svedena dužina provodnika (onaj deo dužine provodnika koji preseca magnetsko polje).

Efektivna vrednost *ems* se obično izražava preko srednje vrednosti fluksa po polu  $\Phi$ :

$$\Phi = S_p B_{\delta sr} = l_s \tau \frac{B_\delta}{k_f}.$$

Izrazimo sada iz prethodnog izraza efektivnu vrednost indukcije:

$$B_\delta = k_f \frac{\Phi}{l_s \tau}$$

Za polni korak imamo:

$$\tau = \frac{d\pi}{2p}$$

Za brzinu imamo:

$$v = \frac{d}{2} \omega_m = \frac{d}{2} \frac{\omega_e}{p} = \frac{d}{2} \frac{2\pi f}{p} = \frac{d\pi f}{p} = 2\tau f$$

gde se indeks  $m$  odnosi na mehaničke, a indeks  $e$  na električne veličine.

Kada je raspodela fluksa harmonična efektivna vrednost elektromotorne sile po provodniku je:

$$E_{pr} = l_s v B_\delta = l_s 2\tau f k_f \frac{\Phi}{l_s \tau} = 2 k_f f \Phi \approx 2,22 f \Phi$$

### 1.2.2 Elektromotorna sila jednog navojka i jednog navojnog dela

Navojak obrazuju dva redno vezana provodnika, koji se nalaze u istim položajima pod dva susedna (različita) pola. Ako je navojni korak jednak polnom koraku, tj.  $y = \tau$ , navojak nazivamo *dijametralnim* (prečničkim), zato što kod dvopolne mašine ( $p=1$ ) navojak leži na prečniku statora.

Pošto su dva provodnika redno vezana u navojak njihove *ems* se sabiraju, pa je *ems* po navojku jednaka:

$$E_{\text{nav}} = 2 E_{\text{pr}}$$

Obično se u žleb stavlja više provodnika.

*Navojni deo* obrazuje više redno povezanih navojaka čiji se provodnici nalaze u dva žleba pod suprotnim polovima. *Ems* po navojnom delu  $E_1$ , iznosi:

$$E_1 = 2 N_z E_{\text{pr}}$$

gde je sa  $N_z$  označen broj provodnika u žlebu

### 1.2.3 Pojasni navojni sačinilac

Ako mašina ima  $p$  pari polova, onda možemo u žlebove pod svaki par polova postaviti po jedan ili više navojnih delova, koji se vežu na red.

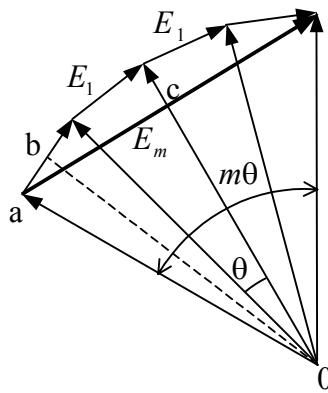
Uvedimo sada sledeće oznake:  $Z$  za ukupni broj žlebova,  $z$  za broj žlebova po polu ( $z=Z/2p$ ),  $q$  za broj faza, a  $m$  za broj žlebova po polu i fazi ( $m=Z/2pq$ ). Ako je  $m=1$  onda se radi o koncentrisanom namotaju, dok ako je  $m > 1$  ima se raspodeljen namotaj. U slučaju koncentrisanog namotaja, svi navojni delovi nalaze se u relativno istom položaju u odnosu na polove, pa će *ems* takvog namotaja sa  $p$  navojnih delova biti:

$$E = p E_1 = 2 p N_z E_{\text{pr}}$$

Obično se namotaj pravi kao raspodeljen ( $m>1$ ), kako bi se površina statora ili rotora što bolje iskoristila i da bi se dobila što veća *ems*. U ovom slučaju se uzima više navojnih delova pod jednim parom polova, tako da taj deo namotaja zauzima čitav pojas po obimu statora. U daljnjoj analizi pretpostavićemo da je navojni korak jednak polnom koraku. Kada se  $m$  navojnih delova veže na red, možemo efektivnu vrednost *ems* svakog navojnog dela predstaviti vektorima  $E_1$ , koji su međusobno pomereni za ugao između dva žleba,

$$\theta = p\alpha = \frac{p 360^\circ}{Z}.$$

Ukupna *ems* svih  $m$  navojnih delova neće biti jednaka aritmetičkom zbiru *ems* pojedinih navojnih delova, već njihovom vektorskom zbiru. Dakle, pojaviće se izvesni gubitak u *ems* usled različitog položaja pojedinih navojnih delova (žlebova) u odnosu na pol.



**Slika 1-3** *Ems pojedinih navojnih delova i njihov vektorski zbir za  
 $Z = 24, 2p = 2, q = 3 > \theta = 1 \cdot 360^\circ / 24 = 15^\circ, z = 12, m = 4$*

Centralni ugao između prečnika je  $\theta$ , a ukupni centralni ugao je  $m\theta$ .

Odnos između vektorskog,  $E_m$  i aritmetičkog zbira *ems* navojnih delova naziva se pojasni navojni sačinilac,  $k_p$ :

$$k_p = \frac{E_m}{m E_1} = \frac{\frac{E_m}{2}}{m \frac{E_1}{2}} = \frac{\overline{ac}}{m \overline{ab}} = \frac{\overline{0a} \sin \frac{m\theta}{2}}{m \overline{0a} \sin \frac{\theta}{2}} = \frac{\sin \frac{m\theta}{2}}{m \sin \frac{\theta}{2}}$$

Da bi ovaj obrazac bio podesniji za praktičnu primenu, izrazićemo ugao  $\theta$  pomoću broja žlebova po polu,  $z$ .

$$\theta = p\alpha = p \frac{2\pi}{Z} = p \frac{2\pi}{2pz} = \frac{\pi}{z}$$

Unoseći ovu vrednost u izraz za  $k_p$  dobijamo:

$$k_p = \frac{\sin \frac{m}{z} \cdot \frac{\pi}{2}}{m \sin \frac{1}{z} \cdot \frac{\pi}{2}}$$

Za trofazni namotaj imamo da je  $m/z = 1/3$ , pa u tom slučaju vredi:

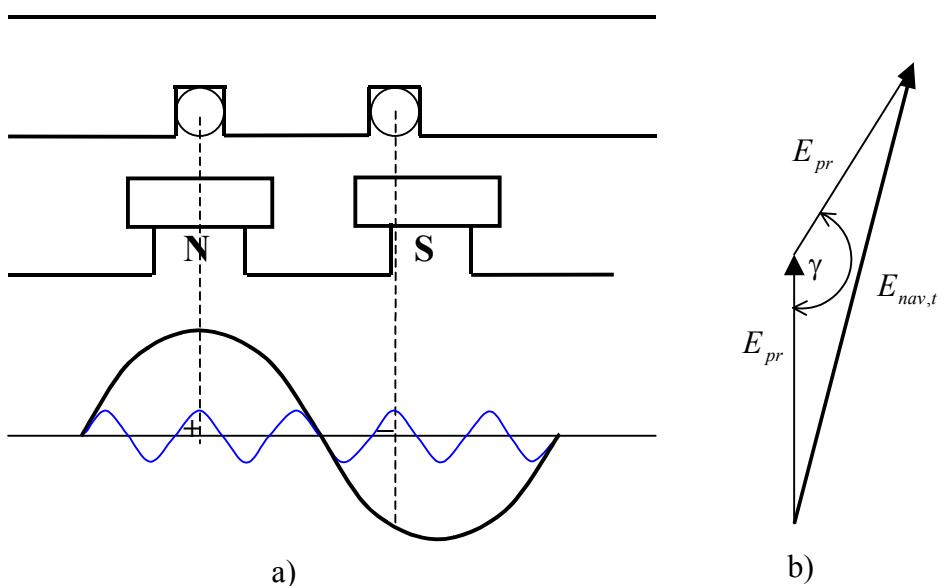
$$k_p = \frac{0,5}{m \sin \frac{1}{m} \frac{\pi}{6}}.$$

#### 1.2.4 Tetivni navojni sačinilac

Pri stvaranju magnetskog polja uvek težimo da ono bude harmonično, međutim ono praktično uvek manje ili više odstupa od harmoničnog oblika. Npr. ako površina polnih nastavaka leži na krugu koncentričnom sa unutarnjim krugom statora, onda se oni u delu kružne šeme mogu predstaviti ravni (slika 1-4). U ovom slučaju, međugvožde je stalne dužine, pa je isti magnetski otpor pod čitavim polnim nastavkom, pa se fluks pod polovima može predstaviti pravougaonim funkcijom.

Pošto je periodična funkcija simetrična u odnosu na koordinatni početak i u odnosu na apsisnu osu, harmonički red će sadržavati samo sinusne neparne članove.

Ako želimo da se oslobođimo nekog harmonika, na primer petog, onda navojni korak treba da bude manji od polnog, tj. provodnik koji se nalazi pod južnim polom treba da dođe na ono mesto gde peti harmonik ima isti smer kao pod severnim. Kada postavimo navojak na to mesto, tako da je navojni korak manji od polnog, onda su *ems* usled petog harmonika ( $E_{pr5}$ ) u provodnicima pod raznim polovima istog smera, pa se u zajedničkom kolu navojka poništavaju. Pošto kod dvopolne mašine ( $p=1$ ) navojak sa skraćenim korakom leži na tetivi kruga, onda se ova vrsta namotaja naziva *tetivni namotaj* ili *namotaj sa skraćenim navojnim korakom*. Dobitak na smanjenju sadržaja viših harmoničkih članova i kraćim bočnim vezama se plaća izvesnim gubitkom na veličini *ems*, jer je u levom provodniku *ems* usled osnovnog harmonika maksimalna, dok je u desnom je manja.



Slika 1-4 *Emis* navojka tetivnog namotaja

Prema slici 1-4 b) za *ems* navojka tetivnog namotaja imamo:

$$E_{nav,t} = 2 E_{pr} \sin \frac{\gamma}{2} = 2 E_{pr} \sin \frac{\gamma}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}$$

Odnos između vektorskog i algebarskog zbiru  $ems$  po provodniku predstavlja tetivni navojni sačinilac:

$$k_t = \frac{E_{nav,t}}{2E_{pr}} = \sin \frac{\gamma}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}.$$

To znači da se  $ems$  tetivnog navojka dobije kada se  $ems$  prečničkog navojka ( $E_{nav} = 2 E_{pr}$ ) pomnoži sa tetivnim navojnim sačiniocem:

$$E_{nav,t} = k_t 2 E_{pr} .$$

### 1.2.5 Izraz elektromotorne sile namotaja jedne faze

U opštem slučaju  $ems$  namotaja jedne faze je

$$E = 2,22 k f N \Phi$$

gde je  $k$  rezultantni navojni sačinilac, koji je jednak proizvodu pojasnog i tetivnog navojnog sačinjaca:

$$k = k_p k_t$$

(za koncentrisani namotaj  $k_p = 1$ , a za prečnički namotaj  $k_t = 1$ ),

a  $N$  predstavlja ukupan broj provodnika namotaja, tj. proizvod broja polova,  $2p$ , broja žlebova po polu i fazi,  $m$ , i broja provodnika po žlebu,  $N_z$ :

$$N = 2p m N_z .$$

Ako hoćemo da dobijemo što veću  $ems$  prelazimo sa koncentrisanog na raspodeljeni namotaj, ali ipak  $ems$  ne može biti  $m$  puta veća. Pojasni navojni sačinilac srazmeran je na neki način vremenu koje je potrebno da maksimum polja dođe iz ose jednog u osu sledećeg žleba. Tetivni navojni sačinilac utiče tako da je  $ems$  još nešto manja.

Dakle, ako se umesto koncentrisanih dijametralnih namotaja upotrebljavaju raspodeljeni tetivni namotaji, za isti broj navojaka (provodnika) po fazi  $ems$  je manja, harmonici se smanjuju, a ukupan broj žlebova koji se može smestiti na induktu datih dimenzija je veći (s obzirom na korišćenje cele površine indukta).

### 1.2.6 Trofazni namotaj

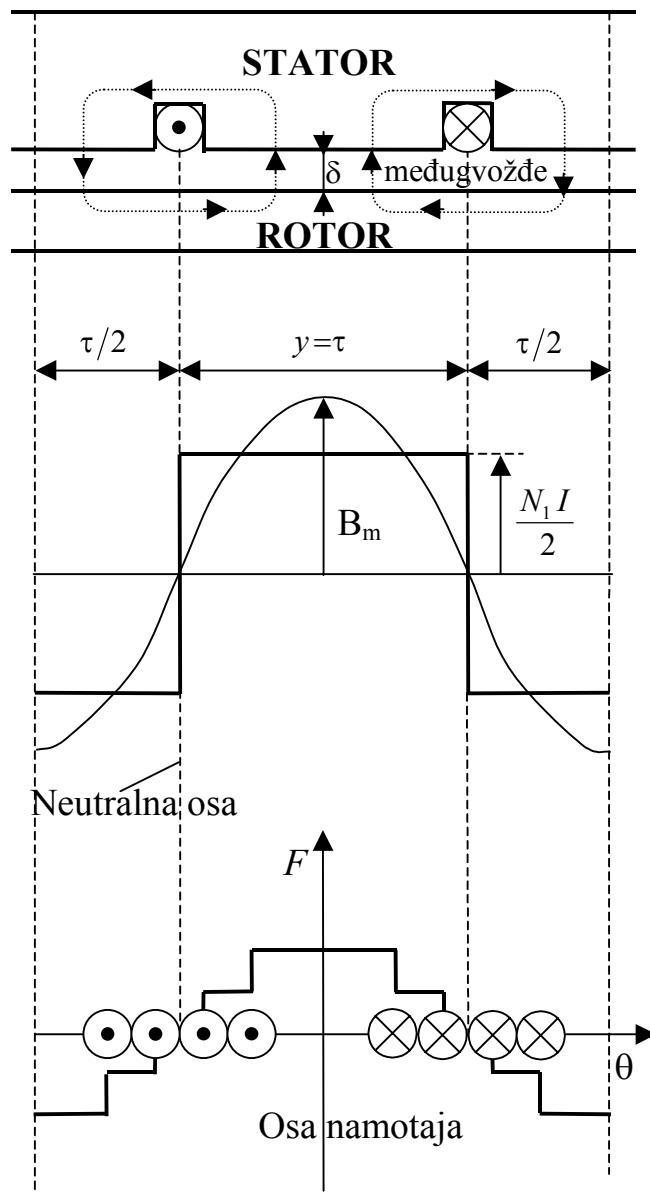
Pri gradnji trofaznih namotaja mora se paziti da  $ems$  svih faza budu jednake po vrednosti i da jedna prema drugoj kasne za jednu trećinu periode. To se postiže simetrijom namotaja, tj. da namotaji svih faza budu istog sastava i da jedan prema drugom budu prostorno pomereni za  $q$ -ti deo dvostrukog polnog koraka ( $2\tau/q$ ), gde je  $q$  broj faza (za trofazni namotaj  $q=3$ ).

Pri gradnji  $q$ -faznog namotaja, najpre se obim indukta podeli na željeni broj polova ( $2p$ ). Svakom polu pripada polni korak,  $\tau$ . Da bi pod svakim polom imali delove namotaja svake faze, svaki polni korak podeli se na  $q$  delova,  $s = \tau/q$ . Takav jedan deo,  $s$ , naziva se pojas. Prema tome pod svakim polom jedan pojas zauzimaju žlebovi (i provodnici) jedne faze.

Pored jednoslojnih imamo i dvoslojne namotaje, koji se obično izrađuju sa skraćenim navojnim korakom. Dvoslojni namotaji dozvoljavaju da bočne veze budu jednostavije i troškovi izrade manji.

### 1.3 Magnetopobudna sila

Na slici 1-5 prikazana je električna mašina sa cilindričnim oblikom statora i rotora, tj. mašina sa konstantnim vazdušnim zazorom (međugvožđem). Prepostavimo je radikalna širina zazora  $\delta$  mala u poređenju sa prečnikom međugvožđa. Neka se u žlebovima statora nalazi dvopolni prečnički (dijametralni) namotaj prvo koncentrisani, pa zatim raspodeljen, sa  $N_1$  navojaka u navojnom delu.



Slika 1-5 Mps koncentričnog i raspodeljenog prečničkog dvopolnog namotaja

Magnetski otpor magnetskog kola je neznatan. Struja u navojnom delu prouzrokovana je u zazoru ravnomerno radijalno magnetsko polje, čija je prostorna raspodela naznačena na razvijenoj šemi. Magnetopobudna sila (*mps*) u zazoru je najveća u prostoru između žlebova, jer se magnetne linije koje prolaze kroz taj prostor obuhvataju sa svim provodnicima namotaja. Raspodela *mps* je pravougaonog oblika za koncentrisani namotaj, stepenasta za raspodeljeni. Za veći broj žlebova po fazi približava se trapeznom obliku, a ako bi namotaj bio raspoređen po čitavom obimu, *mps* bi imala oblik trougla. Ako je magnetsko kolo nezasićeno a pošto je zazor ravnomerni, istog oblika će biti magnetna indukcija. U analizi mašina stepenasti ili trapezni oblik krive se razlaže na osnovni i niz viših harmonika i uglavnom se posmatra samo osnovni harmonik. Kad je u navojnom delu konstantna jednosmerna struja talasi su nepokretni u odnosu na navojni deo. *Mps* ima najveću vrednost u tzv. *osi namotaja*, a jednaka je nuli u *neutralnoj osi*, upravnoj na osu namotaja. Obeležimo maskimalnu vrednost osnovnog harmonika sa  $F_v$ . *Mps*  $F$  u tački koja je od ose namotaja pomerena za ugao  $\theta$  je:

$$F = F_v \cos \theta .$$

Takvo prostorno nepomično i konstantno polje u vremenu nazivamo *jednosmernim*.

### 1.3.1 Naizmenično polje

Kad se pobuđivanje vrši naizmeničnom strujom, talasi su pulsacioni. Sa pobudom naizmenične struje sinusnog oblika, visina krivih iznad nulte linije menja se sinusoidno sa vremenom. Ako sa  $F_m$  označimo maksimalnu vrednost *mps* u osi namotaja, za osnovni harmonik *mps* imaćemo:

$$F_v = F_m \cos \omega t ,$$

odnosno

$$F = F_m \cos \theta \cos \omega t$$

ako se vreme računa od trenutka (*t*) kada je *mps* maksimalna. U daljem tekstu ćemo pravac u kojem osnovni talas ima maksimalnu vrednost polja nazivati *osa polja*. U posmatranom slučaju jedne faze osa magnetskog polja koja se menja u vremenu ima stalni pravac koji se u prostoru poklapa sa osom namotaja. Ovakvo magnetsko polje naziva se naizmenično ili *pulsaciono polje*.

### 1.3.2 Obrtno polje

Obrtno magnetsko polje može se dobiti pomoću trofaznog sistema kada se na stator postave tri namotaja čije se ose jedna u odnosu na drugu pomerene za električni ugao od  $120^\circ$  i kada se oni priključe na sinusoidne napone koji obrazuju trofazni naizmenični sistem.

Neka su namotaji *a*, *b* i *c* priključeni na faze trofaznog izvora čiji je redosled L1, L2 i L3:

$$\begin{aligned} & a(L1) \\ & c(L3) \quad b(L2) \end{aligned}$$

Svaki od ova tri namotaja ima svoje naizmenično polje:

$$F_a = F_m \cos\theta \cos\omega t,$$

$$F_b = F_m \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ),$$

$$F_c = F_m \cos(\theta - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ).$$

Ugao po obimu računa se od ose namotaja faze  $a$  a vreme od trenutka kada je mps (struja) u fazi  $a$  maksimalna.

Rezultantna mps  $F_\theta$  u tački  $\theta$  i trenutku  $t$  biće:

$$\begin{aligned} F_\theta &= F_a + F_b + F_c = \\ &= F_m \cos\theta \cos\omega t + F_m \cos(\theta - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) + F_m \cos(\theta - 240^\circ) \cos(\omega t - 240^\circ). \end{aligned}$$

Na osnovu relacije:

$$\cos\alpha \cos\beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta)$$

dobija se:

$$\begin{aligned} F_\theta &= \frac{F_m}{2} \cos(\theta + \omega t) + \frac{F_m}{2} \cos(\theta - \omega t) + \frac{F_m}{2} \cos(\theta + \omega t - 240^\circ) + \frac{F_m}{2} \cos(\theta - \omega t) + \\ &+ \frac{F_m}{2} \cos(\theta + \omega t - 480^\circ) + \frac{F_m}{2} \cos(\theta - \omega t). \end{aligned}$$

Pošto je zbir prvog, trećeg i petog člana jednak nuli, za trofazni sistem imamo:

$$F_\theta = \frac{3}{2} F_m \cos(\theta - \omega t).$$

Analogno trofaznom sistemu, za  $q$  fazni sistem imamo:

$$F_\theta = \frac{q}{2} F_m \cos(\theta - \omega t).$$

$$\text{Amplituda polja je } F_A = \frac{q}{2} F_m$$

Za  $t = 0$  maksimum polja se nalazi u osi faze  $a$ , za  $\omega t = 120^\circ$  maksimum polja će biti u osi faze  $b$  i za  $\omega t = 240^\circ$  maksimum polja će biti u osi faze  $c$ . Ako bi namotaje  $a$ ,  $b$  i  $c$  priključili na faze trofaznog izvora drugim redom, npr. čiji je redosled L1, L3 i L2:

$$\begin{aligned} &a(\text{L1}) \\ &c(\text{L2}) \quad b(\text{L3}) \end{aligned}$$

tada bi se za  $t = 0$  maksimum polja nalazio u osi faze  $a$ , za  $\omega t = 120^\circ$  maksimum polja će biti u osi faze  $c$  i za  $\omega t = 240^\circ$  maksimum polja će biti u osi faze  $b$ . To znači da će smer obrtanja polja biti izmenjen a njegov izraz će tada biti:

$$F_\theta = \frac{3}{2} F_m \cos(\theta + \omega t).$$

Na taj način, prostim prevezivanjem krajeva asinhronog ili sinhronog motora sa mrežom može se promeniti njegov smer obrtnja. Obrtno polje se može dobiti i pomoću dva namotaja prostorno pomerena za električni ugao od  $90^\circ$  kroz koje teku dvofazne struje, ili uopšteno pomoću q namota kroz koje teku q-fazne struje.

Dakle, obrtno polje može da se dobije pomoću višefaznih namotaja raspoređenih po obimu statora sinhronih ili asinhronih mašina kada kroz te namotaje teku višefazne naizmenične struje. Tako dobijeno polje je ekvivalentno polju jednog pobudnog namotaja napajanog jednosmernom strujom, koje se mehanički obrće istom ugaonom brzinom.

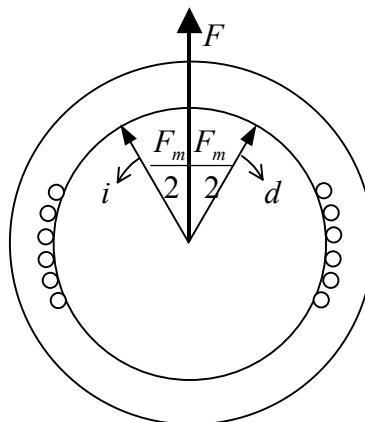
### 1.3.3 Jednofazno polje

Naizmenično polje  $F$ , sa sinusoidnom raspodelom u prostoru i sinusoidnom raspodelom u vremenu, možemo posmatrati kao rezultat superpozicije dva polja (inverznog i direktnog), koja se obrću u suprotnim smerovima ugaonom brzinom jednakom kružnoj učestanosti naizmenične struje a čija je amplituda upola manja od amplitude naizmeničnog polja:

$$F = F_m \cos\theta \cos\omega t = \frac{F_m}{2} \cos(\theta + \omega t) + \frac{F_m}{2} \cos(\theta - \omega t).$$

Direktno obrtno polje je ono koje se obrće u smeru obrtanja rotora, dok je inverzno suprotnog smera. Ovaj zakon poznat je u elektrotehnici kao *Leblanova teorema*.

Jednofazno polje se sreće kod jednofaznih sinhronih i asinhronih mašina koje imaju samo jedan namotaj napajan naizmeničnom strujom. Za razliku od savršenijeg obrtnog polja kod višefaznih mašina, kod jednofaznih mašina pored direktne javlja se i indirektna komponenta polja koja obično pogoršava njihove radne karakteristike.



Slika 1-6 Jednofazno polje

Na slici 1-6 predstavljeno je jednofazno polje; direktna i inverzna komponenta polje prikazana su pomoću dva vektora koji se obrću u suprotnim smerovima, a njihov zbir daje naizmenično polje čija se osa nalazi u osi namotaja.

### 1.3.4 Izraz magnetopobudne sile

Ako je efektivna vrednost struje jednaka  $I$ , vremenski maksimalna vrednost magnetske indukcije koncentričnog namotaja je:

$$B_m = \mu_0 H_m = \mu_0 \frac{N_1 I \sqrt{2}}{2\delta},$$

gde je  $\frac{N_1 I \sqrt{2}}{2}$  vrednost maksimuma *mps* po polu (slika 1-5).

Istovremeno se javlja i izvesna razlika magnetskog potencijala između bilo koje tačke na statoru i radikalno naspramne tačke na rotoru. Talas koji predstavlja razliku magnetskog potencijala duž obima vazdušnog zazora ima potpuno isti oblik kao i talas raspodele fluksa. Vremenski maksimum visine talasa razlike magnetskog potencijala iznosi:

$$F_m = \delta H_m = \frac{N_1 I \sqrt{2}}{2} [A/pol].$$

Za talas pravougaonog oblika vremenski maksimum osnovne harmoničke komponente prostorne raspodele dvoljnog jednofaznog koncentrisanog namotaja je:

$$F_{m1} = \frac{4 N_1 I \sqrt{2}}{\pi 2} [A/pol].$$

Za koncentrisani jednofazni namotaj sa  $N_f$  navojaka jedne faze redno vezanih i sa  $2p$  polova, svakom polu odgovara  $N_f/2p$  polova, pa je vremenski maksimum amplitude prostornog talasa *mps*:

$$F_{m1} = \frac{4 N_f I \sqrt{2}}{\pi 2p} [A/pol].$$

Amplituda rezultantnog talasa obrtne *mps* po polu  $q$ -faznog prečničkog koncentrisanog namotaja je:

$$F_A = \frac{q}{2\pi} \frac{4 N_f I \sqrt{2}}{2p} [A/pol].$$

Konačno, amplituda rezultantnog talasa obrtne *mps* po polu  $q$ -faznog raspodeljenog tetivnog namotaja je:

$$F_A = \frac{q}{2\pi} \frac{4 k N_f I \sqrt{2}}{2p} = \frac{q}{\pi} \frac{k_p k_t N_f I \sqrt{2}}{p} [A/pol],$$

gde je  $k_p$  pojasni, a  $k_t$  tetivni navojni sačinjoc.

## 1.4 Osnovni tipovi i karakteristike

Budući da se u primeni asinhronne mašine najčešće sreću kao trofazni motori, prvo će o njima biti reči.

#### **1.4.1 Trofazni motor sa namotanim rotorom**

Namotaj statora je trofazan, kao kod sinhronih motora. Namotaj rotora je takođe trofazan (motani), kod mašina manjih snaga je spagnut u zvezdu, dok je kod mašina većih snaga, da bi se smanjio napon u stanju mirovanja, spagnut u trougao, a slobodni krajevi su mu spojeni na tri metalna klizna koluta (prstena), izolovana međusobno i od vratila. Po tri klizna koluta (za svaku fazu po jedan) klize dirke (četkice) koje su fiksirane za stator i čiji su priključci izvedeni na stator. Na ovaj način je moguće električni pristup rotorskom namotaju, odnosno dovođenje i odvođenje električne energije. U svrhu boljeg pokretanja ili regulisanja brzine obrtanja, rotorskom kolu se dodaje odgovarajući trofazni rotorski otpornik. Uloga kao i dimenzionisanje rotorskih otpornika može biti dvojaka- oni mogu da služe za pokretanje (startovanje, puštanje u rad), odnosno regulisanje brzine obrtanja. Ako služe samo za pokretanje, da bi se smanjilo habanje dirki kao i gubici usled trenja dirki o klizne prstenove, većina motora je snabdevena naročitim uredajem koji po puštanju motora u rad podiže dirke i klizne prstenove dovodi u kratki spoj. Motor tada radi kao asinhrona mašina sa kratkospojenim rotorom

Asinhronne mašine sa namotanim rotorom, u odnosu na one sa kratkospojenim rotorom, imaju komplikovaniju izvedbu, skuplje su, imaju manju pouzdanost u radu, podložnije su kvarovima a za pokretanje im je ponekad potreban dodatni uređaj u vidu otpornika za puštanje u rad. Osnovna prednost im je vezana za bolje karakteristike pri puštanju u rad, što je naročito važno kod pogona sa teškim uslovima pokretanja kada se zahtevaju veliki polazni momenti.

#### **1.4.2 Trofazni motor sa kratkospojenim rotorom**

Namotaj statora se, u principu, ne razlikuje od namotaja statora trofaznih asinhronih mašina sa namotanim rotorom. Međutim, namotaj rotora je značajno različit – podseća na kavez; kod motora manjih i srednjih snaga izliven je od aluminijuma, a kod motora većih snaga izrađen je od neizolovanih bakrenih štapnih provodnika, koji se na bočnim stranama kratko spajaju sa po jednim prstenom. U oba slučaja kratkospojeni rotor nema mogućnost spoljnog električnog pristupa, vrlo je robustan i može da izdrži visoka mehanička i termička naprezanja. Ovako formiran namotaj u suštini predstavlja  $n$ -fazni namotaj, gde je  $n$  broj štapnih provodnika. U analizama se ovaj namotaj ekvivalentira trofaznim.

Osnovni problem vezan za primenu ove vrste asinhronih mašina su loše polazne karakteristike (karakteristike pri puštanju u rad).

### **1.5 Osnovni princip rada**

Posmatrajmo asinhronu mašinu sa trofaznim namotajem na statoru i ekvivalentnim trofaznim kratkospojenim namotajem na rotoru. Neka je namotaj statora priključen na sistem naizmeničnih trofaznih napona. U namotaju statora javlja se kontra elektromotorna sila  $\underline{E}_1$  koja drži ravnotežu priključenom naponu statora  $\underline{U}_1$  i čiji se modul razlikuje od napona za pad napona na omskoj otpornosti i reaktansi rasipanja (što iznosi nekoliko procenata). Kroz namotaj statora protiče naizmenične trofazne struje koje stvaraju *Teslino obrtno magnetsko polje*. Obrtno polje rotira u zazoru tzv. sinhronom brzinom,  $n_s$ :

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

gde je  $f$  učestanost (frekvencija) mreže, a  $p$  broj pari polova.

Pri tome obrtno polje preseca provodnike statora i rotora i u njima indukuje odgovarajuće *elektromotorne sile (ems)*. Pošto je električno kolo rotora zatvoreno, usled ove *ems* se u provodnicima namotaja rotora stvara struja,  $I_2$ , čija je aktivna komponenta istog smera kao i *ems*. Pošto se provodnik sa strujom nalazi u magnetskom polju indukcije  $\vec{B}$  na njega će delovati elektromagnetska sila:

$$\vec{F} = I_2 (\vec{l} \times \vec{B}),$$

Ova sila obrće rotor u smeru obrtnog magnetskog polja. To se dešava sa svim provodnicima po obimu rotora, a zbir svih proizvoda sile i poluprečnika predstavlja obrtni momenat elektromagnetskih sila motora. Obrtni momenat motora je prorsionalan proizvodu struje rotora, fluksa i ugla između njih,  $\varphi_2$ :

$$M = k I_2 \Phi \cos \varphi_2$$

Prema tome, kada se stator asinhrone mašine priključi na mrežu, obrtni momenat motora obrće rotor u smeru obrtanja obrtnog polja. Pri tome su struje u rotoru izazvane elektromagnetskom indukcijom. Prenos energije sa statora na rotor vrši se isključivo elektromagnetskom indukcijom, pa ove mašine često nazivamo *indukcionim mašinama*.

Uslov za obrtanje rotora je različita brzina obrtnog magnetskog polja,  $n_s$ , i brzine obrtanja rotora,  $n$ , odnosno postojanje relativnog kretanja između obrtnog magnetskog polja i rotora, jer jedino tada se pri presecanju provodnika rotora od strane obrtnog magnetskog polja može indukovati *ems* u rotoru, odnosno stvoriti struju u namotaju rotora.

Relativnim klizanjem  $s$ , nazivamo veličinu koja je određena sledećim izrazom:

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

čija se vrednost pri naznačenom opterećenju kreće kod motora manjih snaga od 3 do 8%, a kod motora većih snaga od 1 do 3%. Učestanost električnih i magnetskih veličina rotora,  $f_2$ , dobija se kada se primarna učestanost (učestanost mreže) pomnoži sa klizanjem  $s$  ( $f_2 = s f_1$ ).

Samo u trenutku puštanja u rad ili kad rotor usled preopterećenja stane (kratki spoj), učestanost u rotoru je jednaka statorskog učestanosti, odnosno klizanje je jednako jedinici. Označimo indukovani elektromotornu silu rotora u mirovanju sa  $E_{20}$ . Induktivni otpor rotora se menja sa učestanošću:

$$X_{2\sigma,s} = 2\pi f_2 L_{2\sigma} = 2\pi s f_1 L_{2\sigma} = s X_{2\sigma},$$

gde je  $X_{2\sigma}$  induktivni otpor rotora u mirovanju.

Za struju u rotoru imamo:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{2\sigma,s}^2}} = \frac{s E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + (s X_{2\sigma})^2}}.$$

Ako brojilac i imenilac podelimo sa klizanjem  $s$  dobijamo sledeći izraz za struju rotora:

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

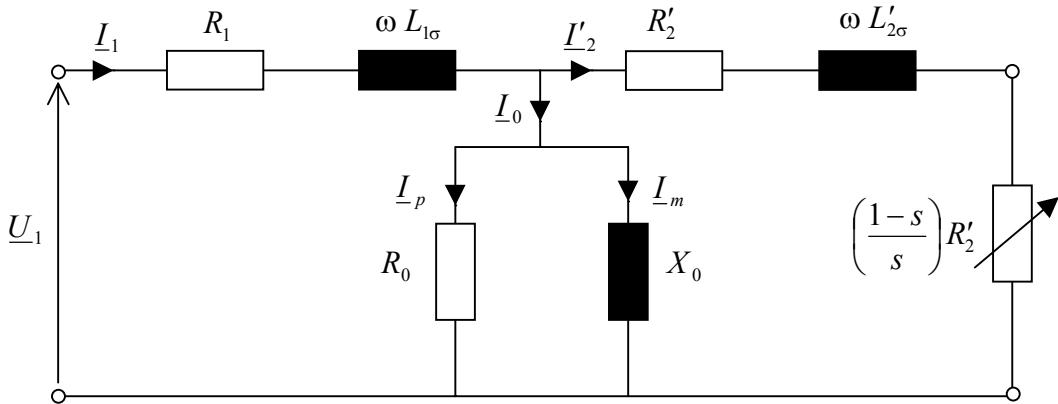
Prikažimo sada ekvivalentnu promeljivu otpornost rotora  $R_2/s$  u obliku zbiru stvarnog otpora rotorskog namotaja  $R_2$  i fiktivnog otpora  $R_{2d}$ :

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_{2d} = R_2 + R_2 \left( \frac{1-s}{s} \right).$$

### 1.6 Ekvivalentna šema asinhrone mašine

Pošto je zakočena asinhrona mašina u biti transformator, analogno transformatoru i koristeći prethodne izraze za ekvivalentnu struju i ekvivalentni promenljivi rotorski otpor, imamo sledeću ekvivalentnu šemu (Slika 1-7). Fiktivni otpor  $R_{2d}$  je analogan prijemniku impedanse  $Z_2$  koji je priključen na sekundar transformatora.

Analogno transformatoru, sve veličine rotora svedene su na statorskiju stranu, što je označeno indeksom crtica.



Slika 1-7 Ekvivalentna šema asinhrone mašine

Pri svođenju se mora voditi računa i o ukupnom navojnom sačiniocu,  $k = k_p k_t$ , na primer:

$$R'_2 = R_2 \left( \frac{k_1 N_1}{k_2 N_2} \right)^2,$$

gdje su  $N_1$  i  $N_2$  brojevi navojaka statora i rotora, respektivno.

## 1.7 Bilans aktivne snage

Motor uzima iz mreže aktivnu snagu:  $P_1 = q_1 U_{1f} I_{1f} \cos\varphi_1$ .

Rad asinhronog mašine je praćen sledećim gubicima (izraženim preko snage gubitaka):

- gubicima u namotajima statora (gubici u bakru statora),  $P_{cu1} = q_1 R_{1f} I_{1f}^2$ ,
- gubicima zbog magnećenja magnetskog kola statora (gubici u gvožđu statora),  $P_{Fe} = q_1 R_0 I_p^2$ ,
- električnim gubicima u rotoru,  $P_{el2}$ , koji sadrže gubitke u bakru namotaja rotora,  $P_{Cu2}$ , i eventualno, kod mašina sa namotanim rotorom, gubitke u dodatnim električnim kolima, spojenim na kolo rotora, i
- mehaničkim gubicima usled trenja (frikcije) i ventilacije,  $P_f$ .

Snaga obrtnog elektromagnetskog polja,  $P_{em}$ , koja se kroz međugvožde prenosi sa statora na rotor, jednaka je razlici dovedene (utrošene) snage  $P_1$ , koju motor uzima iz mreže i ukupnih gubitaka u statoru, odnosno zbiru ukupne mehaničke snage rotora i električnih gubitaka u rotoru:

$$P_{em} = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} = P_{meh} + P_{el2},$$

gde je  $P_{meh}$  ukupna mehanička snaga rotora.

Ukupna mehanička snaga jednaka je razlici dovedene snage  $P_1$  i snage ukupnih gubitaka u gvožđu statora i namotajima statora i rotora, koji su u ekvivalentnoj šemi predstavljeni toplotom koja se razvija na otporima  $R_0$ ,  $R_1$  i  $R_2$ . Preostali, fiktivni otpor u ekvivalentnoj šemi  $R_{2d} = R_2(1-s)/s$  upravo odgovara ukupnoj mehaničkoj snazi, iz čega sledi da je odnos ukupne mehaničke snage i električnih gubitaka u rotoru:

$$\frac{P_{meh}}{P_{el2}} = \frac{1-s}{s}.$$

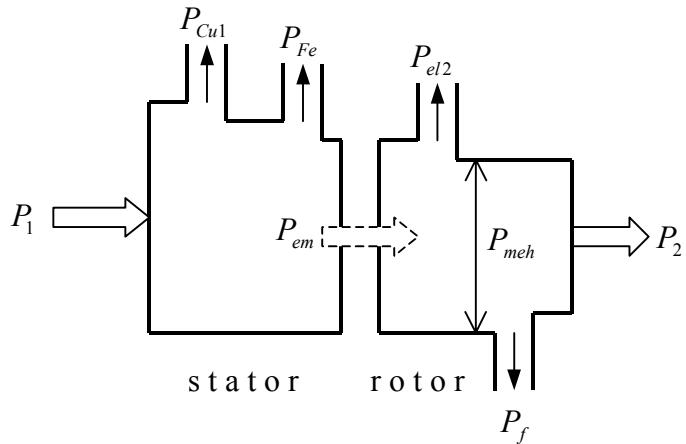
Korisna (mehanička) snaga na vratilu mašine jednaka je razlici ukupne mehaničke snage i mehaničkih gubitaka usled trenja i ventilacije:

$$P_2 = P_{meh} - P_f.$$

Važno je uočiti da, kada se govori o *snazi motora*, podrazumeva se *korisna mehanička snaga na vratilu motora*.

Korisni mehanički momenat se dobija iz jednačine:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega} = \frac{60}{2\pi} \frac{P_2}{n} = 9,55 \frac{P_2}{n}.$$



Slika 1-8 Bilans aktivne snage asinhronog motora

### 1.8 Karakteristika momenta asinhronog motora

Kod motornih pogona karakteristika opterećenja je gotovo uvek data karakteristikom momenta opterećenja (kočnog momenta) u zavisnosti od brzine obrtanja:

$$M_K = f(n).$$

Za određivanje stacionarne radne je vrlo važno da se i razvijeni momenat motora takođe prikaže u zavisnosti od brzine obrtanja, odnosno klizanja:

$$M = f(n) = g(s).$$

Iz mehanike je poznato:

$$M = \frac{P_{meh}}{\omega}$$

Pošto je  $\omega = (1-s)\omega_s$  i  $P_{meh} = (1-s)P_{em}$ , dobijamo sledeći izraz za momenat asinhronne mašine u zavisnosti od obrtnе snage i sinhronе brzine obrtanja magnetskog polja:

$$M = \frac{(1-s)}{(1-s)} \frac{P_{em}}{\omega_s} = \frac{P_{em}}{\omega_s}.$$

Kako je  $P_{em} = \frac{P_{Cu2}}{s}$  i  $P_{Cu2} = q R_2 I_2^2$  dobijamo za momenat trofazne mašine ( $q = 3$ ):

$$M = \frac{3 R_2 I_2^2}{s \omega_s}.$$

U prethodni izraz uvrstimo ranije izvedeni izraz za struju rotora:

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

sada dobijamo:

$$M = \frac{3R_2}{s\omega_s} \frac{E_{20}^2}{\frac{R_2^2}{s^2} + X_{2\sigma}^2} = \frac{3R_2 E_{20}^2}{\omega_s \left( \frac{R_2^2}{s} + s X_{2\sigma}^2 \right)} = 9,55 \frac{3R_2 E_{20}^2}{n_s \left( \frac{R_2^2}{s} + s X_{2\sigma}^2 \right)}.$$

U prethodnim razmatranjima zanemarili smo pad napona u statoru i prepostavili da je indukovani napon u rotoru  $E_{20}$  konstantna veličina. Kod normalnih motora pogreška koju tako činimo je zanemariva, a prednosti zbog jednostavnosti su toliko velike da ćemo i u dalnjim razmatranjima zadržati ovo pojednostavljenje.

U osnovi, momenat je srazmeran sa kvadratom razlike napona koji je priključen na stator i aktivnih i reaktivnih padova napona u statorskem namotaju, što je zbog malih padova napona približno srazmerno kvadratu napona koji je priključen na stator.

Pogledajmo prvo koliki je momenat u pojedinim karakterističnim radnim stanjima.

Za *polazni* (potezni, startni) *momenat*, kada je  $n=0 \Rightarrow s=1$ , imamo sledeći izraz:

$$M_{pol} = 9,55 \frac{3R_2 E_{20}^2}{n_s (R_2^2 + X_{2\sigma}^2)}.$$

Za momenat u *sinhronizmu*, kada je  $n=n_s \Rightarrow s=0$ , vredi  $M_s=0$ , što nam potvrđuje fizičku predstavu funkcionisanja asinhronog motora.

*Prevalni* (prekretni, kritični, maksimalni) *momenat* je maksimalna vrednost momenta koju motor razvija. Maksimalni momenat ćemo imati kada je imenoc u izrazu za momenat minimalan, tj. kada je sledeći izraz minimalan:

$$N(s) = \frac{R_2^2}{s} + s X_{2\sigma}^2.$$

Prevalno klizanje  $s_{pr}$  dobijamo kada prvi izvod funkcije  $N(s)$  izjednačimo sa nulom:

$$\frac{dN(s)}{ds} = -R_2^2 s^{-2} + X_{2\sigma}^2 = 0$$

$$s_{pr} = \pm \frac{R_2}{X_{2\sigma}}.$$

gde se pozitivan predznak odnosi na motorski, a negativan na generatorski režim rada.

Ako ovako dobijeni izraz za prevalno klizanje uvrstimo u jednačinu momenta, dobijamo sledeći izraz za prevalni momenat:

$$M_{pr} \cong 9,55 \frac{3E_{20}^2}{n_s 2 X_{2\sigma}}.$$

Važno je uočiti da vrednost prevalnog momenta ne zavisi od radnog otpora rotorskog namotaja  $R_2$ , ali da zato prevalno klizanje, to jest položaj na prevalnog momenta na krivi  $M = f(s)$  zavisi od  $R_2$ .

Ako želimo da postignemo veliki prevalni momenat i time veliku preopteretivost motora, moramo da napravimo motor tako, da ima što manje rasipanje, odnosno da ima otvorene žlebove.

Ako podelimo jednačinu za momenat jednačinom za prevalni momenat, dobijamo:

$$\frac{M}{M_{pr}} = \frac{2 X_{2\sigma}}{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2\sigma}^2} \frac{R_2}{s}.$$

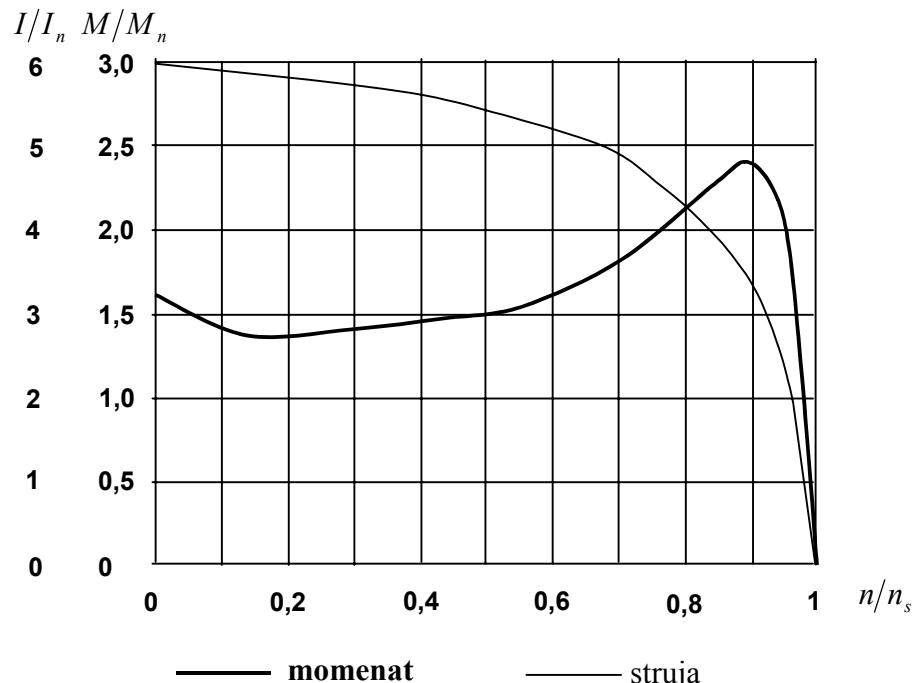
Pomoću jednačine za prevalno klizanje dolazimo do sledećeg oblika ove jednačine:

$$\frac{M}{M_{pr}} \approx \frac{2}{\frac{s}{S_{pr}} + \frac{S_{pr}}{s}},$$

što predstavlja pojednostavljeni oblik poznate *Klosove jednačine*.

Pomoću Klosove jednačine možemo da nacrtamo karakteristiku (graf) asinhrone maštine (spoljnju karakteristiku asinhronog motora).

Za naznačeno klizanje, radi ilustracije, uzećemo 2%, dok ćemo za prevalno klizanje uzeti 10%.



**Slika 1-9 Statičke karakteristike momenta i struje statora motora sa kratkospojenim rotorom**

Karakteristične tačke, gledano preko momenata, su:

- *polazni momenat*,  $M_{pol}$ , koji motor razvija pri pokretanju ( $n=0$ , odnosno  $s=1$ ), i koji, da bi se mašina mogla pokrenuti, mora biti veći od otpornog momenta radne mašine,
- *prevalni (maksimalni) momenat*,  $M_{pr}$ , je najveća vrednost momenta,
- *naznačeni (nominalni) momenat*,  $M_n$ , odgovara naznačenom režimu rada,
- *momenat praznog hoda*,  $M_{ph}$ , koji pokriva mehaničke gubitke u praznom hodu,
- *prazni hod (idealni)*  $M=0$  ( $n=n_s$ , odnosno  $s=0$ ).

Tačniji izrazi za momenat i prevalno klizanje asinhronne mašine su:

$$M = \frac{q_1 U_{1f}^2 R'_2}{s\omega_s \left[ \left( R_1 + \sigma_1 \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_{1\sigma} + \sigma_1 X'_{2\sigma})^2 \right]}, \quad s_{pr} = \pm \frac{\sigma_1 R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + \sigma_1 X'_{2\sigma})^2}},$$

$$\text{gde je } \sigma_1 = \frac{X_{1\sigma} + X_0}{X_0}.$$

### 1.9 Karakteristika struje rotora

Pogledajmo prvo kolika je *struja rotora* u pojedinim karakterističnim radnim stanjima.

Za *polaznu* (poteznu, startnu) *struju* rotora, kada je  $n=0 \Rightarrow s=1$ , imamo sledeći izraz:

$$I_{2,pol} = \frac{E_{20}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2\sigma}^2}}.$$

Pošto je imenoc mnogo manji nego kod naznačene struje, polazna struja rotora je nekoliko puta veća od naznačene struje, kod kaveznih i do šest puta veća.

Za struju rotora *u sinhronizmu*, kada je  $n=n_s \Rightarrow s=0$ , vredi  $I_{2,s}=0$ .

U režimu kočnice imamo  $I_{2,k} > I_{2,pol}$ .

Na slici 1-9 je za trofazni kavezni motor prikazana karakteristike struje statora, koja po obliku odgovara struji rotora.

Ne smemo zaboraviti da upravo prikazane karakteristike momenta i struje rotora slede iz bilansa aktivne snage, tj. iz Džulovog zakona u kojem figurišu prosečne (srednje) vrednosti. U stvarnosti prilikom startovanja motora nastaje prelazni oscilatori proces, tako da su stvarni vrhovi struje i momenta daleko veći od vrednosti naznačenih na ovim karakteristikama.

Jednačine momenta i rotorske struje, te navedena Klosova jednačina, su pojednostavljeni izrazi i služe samo za grubu procenu. Danas se dinamičko ponašanje električnih motora analizira pomoću računara, primenom odgovarajućih matematičkih modela i specijalizovanog softvera (npr. MATLAB), o čemu će naknadno biti više reči.

### 1.10 Stabilnost pogona

Ako se trenutna vrednost momenta električnog motora obeleži sa  $m$ , a trenutna vrednost otpornog momenta radne mašine (teret), sa kojom ona deluje na vratilo motora, sa  $m_k$ , dinamička jednačina kretanja ima oblik:

$$m - m_k = \frac{d}{dt}(J\omega) = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{dJ}{dt}\omega ,$$

gde je  $J$  ukupni *momenat* inercije, a  $\omega$  ugaona brzina obrtanja motora. Član sa izvodom momenta inercije se javlja retko (kod centrifuga, namotavača, robota).

U zavisnosti od odnosa momenata  $m$  i  $m_k$ , moguća su tri osnovna stanja:

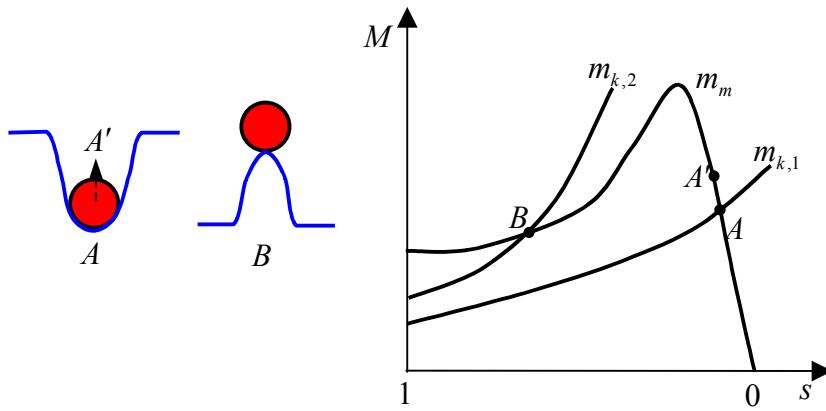
1.  $m = m_k$  ;  $\frac{d\omega}{dt} = 0 \Rightarrow n = \text{const.}$ , stacionarno stanje,
2.  $m > m_k$  ;  $\frac{d\omega}{dt} > 0$  , elektromotorni pogon ubrzava,
3.  $m < m_k$  ;  $\frac{d\omega}{dt} < 0$  , elektromotorni pogon usporava (koči).

O ovome će mnogo opširnije biti reči u disciplini *Elektromotorni pogoni*.

U nekoj tački karakteristike momenta motora imamo stabilan rad ako se nakon nekog (malog) poremećaja motor vrati u polaznu tačku. Uslov za stabilan rad u nekoj tački karakteristike motora je:

$$\frac{dm}{ds} > \frac{dm_k}{ds} .$$

Kao primer stabilnog rada uzmimo prelazak iz radne tačke  $A$  u radnu tačku  $A'$ . U ovom slučaju, razvijeni momenat mašine  $m'$ , će biti veći od kočnog momenta  $m_{k1}$ , pri čemu će mašina ubrzavati i vratiti se u polaznu radnu tačku  $A$ .



**Slika 1-10 Primer stabilnosti rada asinhronne mašine**

**tačka A- stabilan rad , tačka B – nestabilan rad**

Stabilno područje rada asinhronne mašine se nalazi između prevalnog klizanja i klizanja jednakog nuli. Nestabilno područje rada se, izuzetno, može koristiti kod motora jako malih snaga sa odgovarajućom automatskom regulacijom. U ovom slučaju korisnost je loša, ali zbog male snage motora nije bitna.

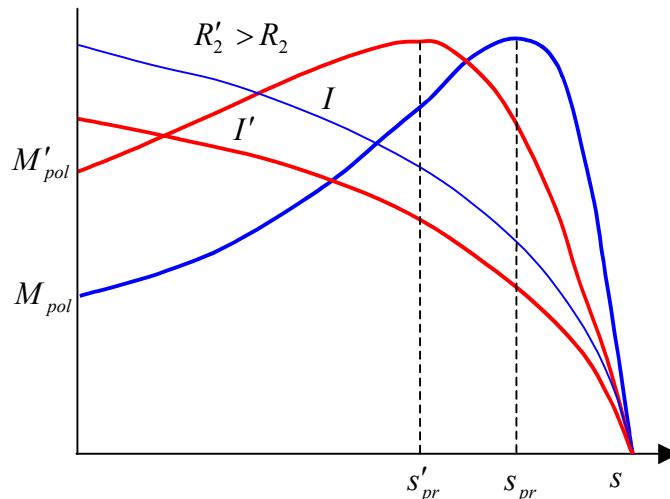
### 1.11 Pokretanje asinhronih motora

Puštanje u rad motora je proces koji započinje u trenutku u kojem je rotor u stanju mirovanja, a završava se onda kada se, pri odgovarajućoj brzini obrtanja, izjednače razvijeni momenat motora i otporni momenat radnog mehanizma. Polazne karakteristike određuju vrednosti polazne struje i momenta, sigurnost puštanja u rad, brzina i postepeno prelaska iz stanja mirovanja u stanje jednolikog obrtanja sa naznačenom brzinom kao i ekonomičnost, koja zavisi od cene potrebne opreme i gubitaka za vreme puštanja. Brzina i postepeni prelazak su posebno bitni kod elektromotornih pogona koji moraju da se periodički često pokreću.

Vrednost polaznog momenta i struje su osnovna pitanja pri pokretanju (startovanju) asinhronne mašine. U trenutku kada se motor priključuje na mrežu, njegov rotor je mehanički nepokretan, a električki je u kratkom spoju (bez obzira na tip asinhronne mašine), a uz maksimalnu indukovani elektromotornu silu u namotaju rotora (obrtno polje preseca provodnike sinhronom brzinom), to stanje je praćeno pojavom velikih struja. Ove struje mogu izazvati visoka zagrevanja namotaja samog motora kao i velike padove napona i što može negativno da utiče na druge prijemnike u mreži.

Da bi rotor motora pri puštanju u rad mogao preći u obrtno kretanje, polazni momenat kojeg razvija motor mora biti veći od otpornog momenta koji na vratilu proizvodi radna mašina koju treba pokrenuti.

Asinhronne mašine sa *namotanim rotorom* imaju dobre karakteristike s obzirom na pokretanje. Pomoću dodatnog otpora (*otpornik za puštanje u rad*) priključenog u rotorsko kolo omogućeno je razvijanje velikih polaznih momenata pri maloj polaznoj struji (slika 1-11). Sa povećanjem brzine otpornici se postepeno isključuju, da bi se nakon zaletanja potpuno isključili, a prstenovi kratko spojili.



**Slika 1-11 Karakteristike momenta i struje za dve vrednosti otpora rotora**

Kod asinhronih mašina sa *kratkospojenim rotorom* nemamo neposrednu mogućnost uticaja na rotorsko strujno kolo, pa se kod pokretanja koriste sledeće metode:

- *direktno uključivanje u mrežu*, koje je povezano sa manjim ili većim stujnim udarima. U zavisnosti od kvaliteta i snage svoje mreže, elektrodistribucije propisuju najveće snage asinhronih mašina sa kratkospojenim rotorom koje se mogu na ovaj način puštati u rad.
- *primena dodatnih uređaja koji se priključuju u strujno kolo statora (na red između mreže i priključaka namotaja statora)*. Osnovna ideja ovde je ograničenje struje pokretanja putem sniženja primarnog napona. Međutim, mora se voditi računa o tome da je polazni momenat srazmeran sa kvadratom priključenog primarnog napona, tako da ovaj način pokretanja dolazi u obzir kada se ne zahteva veliki polazni momenat u samom početku radnog ciklusa. Uredaji koji se koriste su prigušnice, autotransformatori i prebacač zvezda-trouga (za motore čiji je stator spregnut u trouga - polazna struja je pri sprezi zvezda tri puta manja nego pri sprezi trouga, međutim i polazni momenat je tri puta manji) ili se, pak, napajanje vrši preko blok transformatora ili regulisanjem napona primenom uređaja energetske elektronike.
- *primena specijalne izvedbe rotora i njegovih namotaja*, koja se sastoji u konstrukciji rotora sa dubokim i dvostrukim žlebovima. Ovakvom konstrukcijom se poboljšavaju polazne karakteristike, jer se postiže povećanje omskog otpora i smanjenje faznog pomeraja između *ems* i struje prilikom pokretanja. Međutim, ovakva konstrukcija ima za posledicu izvesno pogoršanje radnih karakteristika u odnosu na standardne motore sa kratkospojenim rotorom.

Pri težim uslovima pokretanja normalni kratkospojeni AM može da ne razvije dovoljan polazni momenat čak i pri direktnom puštanju sa naznačenim naponom. U takvim slučajevima je potrebno primeniti asinhronne mašine sa namotanim rotorom ili kratkospojeni rotor u specijalnom izvođenju kao dvokavezni ili sa dubokim žlebovima.

### 1.11.1 Pokretanje asinhronih mašina sa namotanim rotorom

Asinhronne mašine sa *namotanim rotorom* imaju dobre karakteristike s obzirom na pokretanje, jer je pomoću dodatnog otpora (*otpornik za puštanje u rad*) priključenog u rotorsko kolo omogućeno razvijanje velikih polaznih momenata pri maloj polaznoj struci. Naime, pri povećanju ukupnog otpora rotorskog kola se, uz nepromenjeni prevalni momenat, povećava prevalno klizanje i polazni *momenat*, a smanjuje polazna struja.

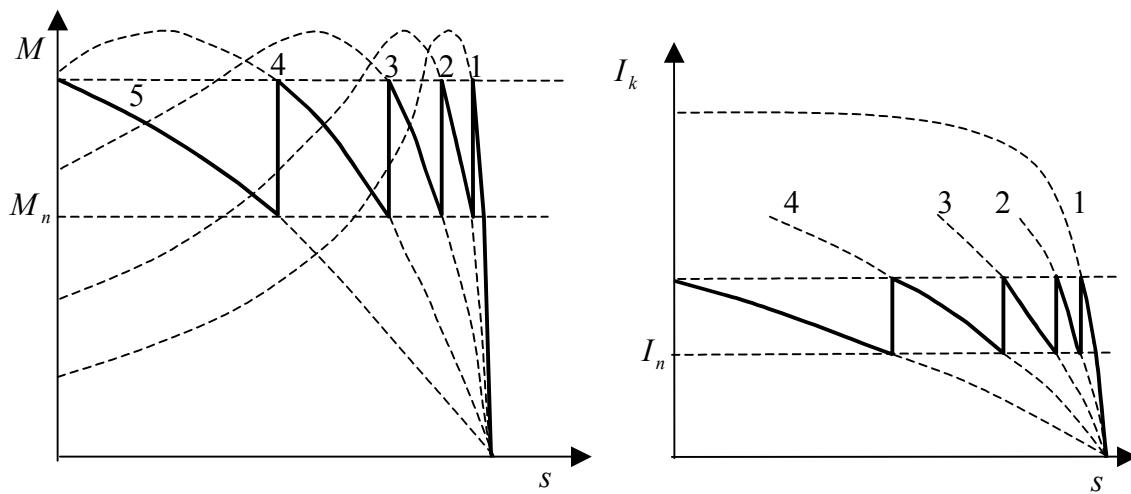
Nedostaci ovog rešenja proizlaze iz opštih nedostataka AM sa namotanim rotorom u odnosu na AM sa kratkospojenim rotorom (vezano za cenu, jednostavnost konstrukcije, sigurnost i pouzdanost), zatim postoji potreba za dodatnim uređajem (rotorskim pokretačem), koji sa jedne strane povećava ukupnu cenu pogona, a ujedno i uređaj čini složenijim, a zbog velikog broja kontakata i nepouzdanim. Povoljno je što se gubici u rotoru raspodeljuju između samog namotaja rotora i dodatnog otpora.

Sa povećanjem brzine otpornici se postepeno isključuju, da bi se nakon zaletanja potpuno isključili, a prstenovi kratko spojili. Otpornici za pokretanje se termički dimenzionisu za kratkotrajni rad pri povećanim strujama pokretanja.

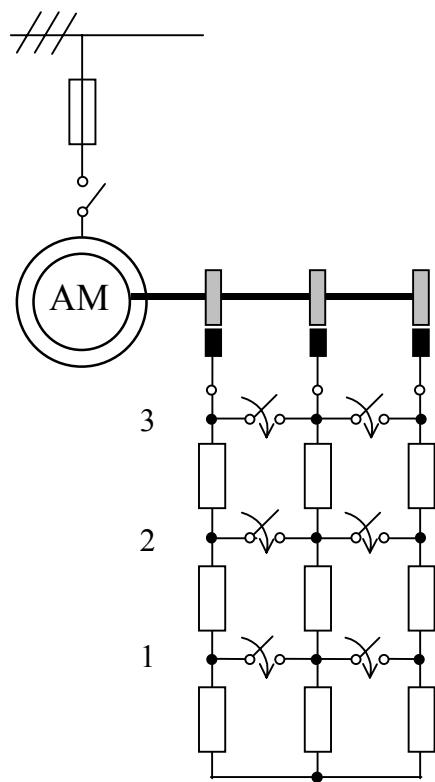
Postoje dva osnovna načina sistema uključenja (i dimenzionisanja otpora) – evropski i američki. Kod evropskog načina je veza parcijalnih otpora redna, tako da se najveći otpor postiže kada su svi parcijalni otpori uključeni, a vrednost otpora se smanjuje isključivanjem pojedinih parcijalnih otpora. Kod američkog načina veza parcijalnih otpora otočna (paralelna), najveći otpor imamo kada je samo prvi otpor uključen, a smanjenje otpora se postiže uključivanjem ostalih otpora.

Pokretanje se sprovodi u nekoliko stepeni, a parcijalni otpori se izračunavaju da zadovolje uslove prespajanja definisane maksimalnom i minimalnom strujom, odnosno momentom prespajanja.

Dakle, odabiranjem mašina sa namotanim rotorom, koje pokrećemo pomoću rotorskog pokretača, postižemo gotovo idealne polazne karakteristike, ali je to, ukupno gledano nepovoljno rešenje kojem se pribegava jedino u slučaju pogona sa izuzetno teškim uslovima pokretanja.



**Slika 1-12 Karakteristika momenta i struje kod pokretanja AM sa namotanim rotorom**

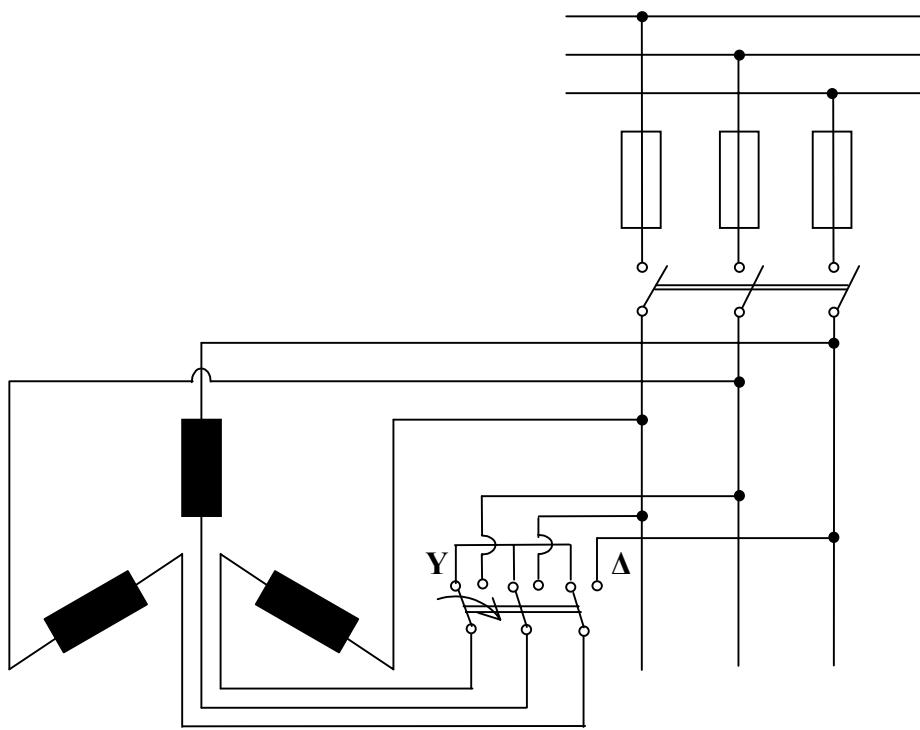


**Slika 1-13 Evropski spoj otpora za pokretanje**

### 1.11.2 Pokretanje asinhronih mašina sa kratkospojenim rotorom

Kod asinhronih mašina sa *kratkospojenim rotorom* nemamo mogućnost uticaja na rotorsko strujno kolo, pa se kod pokretanja moguće sledeće opcije:

- *direktno uključivanje u mrežu*, kod motora manjih snaga (do približno 3 kW). Motor je trofazni, namotaji spregnuti u zvezdu, a fazni napon  $U_f = 220\text{ V}$ . Zbog relativno većeg radnog otpora polazni momenat mu je relativno dosta velik, a struja pokretanja je u podnošljivim granicama za današnje niskonaponske mreže. Potsetimo se da sa porastom snaga mašine relativna vrednost otpora opada, dok relativna vrednost reaktansi rasipanja raste, što, u osnovi, pogoršava polazne karakteristike.
- *uključivanje pomoću preklopke zvezda-trougao*, kod motora iznad približno 3 kW. Motor je građen za viši napon, jer je u trajnom radu spregnut u trougao ( $U_f = 380\text{ V}$ ), pa je prema tome skuplji. Dodatno je potrebna i preklopka.



**Slika 1-14 Pokretanje kavezognog asinhronog motora pomoću preklopke zvezda- trougao**

Pomoću prebacača namotaj statora se priključi najpre u zvezdu. Polazna linijska struja pri sprezi u zvezdu tri puta je manja od polazne linijske struje pri sprezi u trougao i u tome se sastoji dobra osobina prebacača zvezda- trougao. Međutim, nedostatak ovog načina pokretanja motora u rad je što je momenat u sprezi u zvezdu tri puta manji od momenta koji se ima kada je namotaj spregnut u trougao. Zato se prebacač zvezda- trougao ne može upotrebiti za one uređaje koji pri puštanju u rad zahtevaju veliki polazni momenat kao na primer, dizalice, kranovi, ventilatori.

Kod kaveznih elektromotora *većih snaga* pokretanje može biti problem s obzirom na mrežu. Tako distributeri električne energije postavljaju uslove za tzv. mehanike pokretanje, što znači da se ono mora provoditi uz ograničenu struju pokretanja kako bi se smanjio strujni udar prema mreži iz koje se napaja. Uobičajene distributivne mreže imaju snagu nekoliko desetina kW, dok kod snažnih industrijskih mreža snaga prelazi i 100 kW. Ako se pojavi problem pokretanja kaveznih motora velikih snaga, on se u osnovi rešava *smanjenjem napona napajanja, primenom dodatnih uređaja koji se priključuju u strujno kolo statora (na red između mreže i priključaka namotaja statora)*. Osnovna ideja ovde je ograničenje struje pokretanja putem sniženja veličine napona napajanja. Međutim, mora se voditi računa o tome da je polazni *momenat* srazmeran sa kvadratom veličine priključenog napona, tako da ovaj način pokretanja dolazi u obzir kada se ne zahteva veliki polazni *momenat* u samom početku radnog ciklusa. Uredaji koji se koriste su prigušnice, autotransformator, blok transformatori ili uređaji energetske elektronike.

a) *prigušnice*

Prigušnice se priključuju na red sa namotajem statora i snižavaju primarni napon na vrednost 60 - 70 % naznačenog napona. Snižavanjem primarnog napona postiže se smanjenje polazne struje uz znatno smanjenje kretnog (polaznog) momenta i ovo predstavlja glavni nedostatak ovakvog načina puštanja u rad. Ovakav način je primenljiv u slučajevima gde se ne zahteva veliki polazni momenat u samom početku radnog ciklusa. Obično se induktivni otpor prigušnice bira tako da se odnos polazne struje prema naznačenoj kreće od 2 do 2,5.

b) *autotransformatori*

U odnosu na pokretanje sa prigušnicom, ovde je proces sporiji, jer je tokom zaletanja napon konstantan, dok se kod prigušnice napon povećava, jer se opadanjem struje pokretanja smanjuje pad napona na prigušnici.

Prigušnice i autotransformator se nakon pokretanja kratko spajaju.

c) *blok-transformatora*

Ovaj način pokretanja upotrebljava se samo za pogone vrlo velikih snaga i sastoji se u tome da je svaki elektromotorni pogon napajan preko svog transformatora tako da oni zajednički sačinjavaju blok pogona. Ovaj način pruža nekoliko prednosti:

- motor je izrađen za niži napon, što pojednostavljuje izvedbu s obzirom na izolaciju namotaja,
- energija se dovodi uz viši napon,
- osigurava se "mekanije" zaletanje jer je transformator za struju pokretanja zapravo impedansa pri kojoj nastaje pad napona slično kao kod pokretanja uz pomoć prigušnice. Napon pokretanja pravilnim projektovanjem blok-transformatora podešava se na potrebnu vrednost da se osigura potreban *momenat* i vreme zaletanja što ih zahteva pogon, a mreža dopušta. Nedostatak ovog postrojenja je u tome što svaki pogon mora imati svoj transformator, a to poskupljuje postrojenje u poređenju s napajanjem više pogona preko zajedničke transformacije.

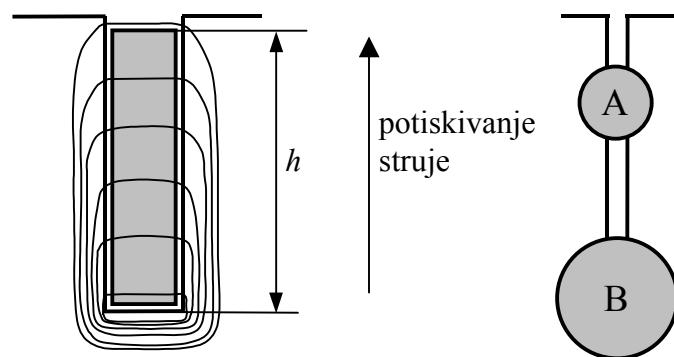
d) *energetska elektronika* – o ovome će biti više reći u predmetu *Elektromotorni pogoni*.

Da bi se poboljšale osobine kaveznih motora pri puštanju u rad, odnosno da bi se smanjile polazne struje i povećao polazni momenat, mnogo je rađeno na konstrukciji rotora i predlagan znatan broj raznih rešenja. Najbolje osobine imaju *motori sa dvostrukim žlebovima (Bušero)* i *motori sa dubokim žlebovima*. Kod njih se primenom posebne konstrukcije postiže povećanje omskog otpora i smanjenje faznog pomeraja između *ems* i struje rotora (povećanje polaznog momenta!) što utiče na poboljšanje karakteristika pri puštanju u rad.

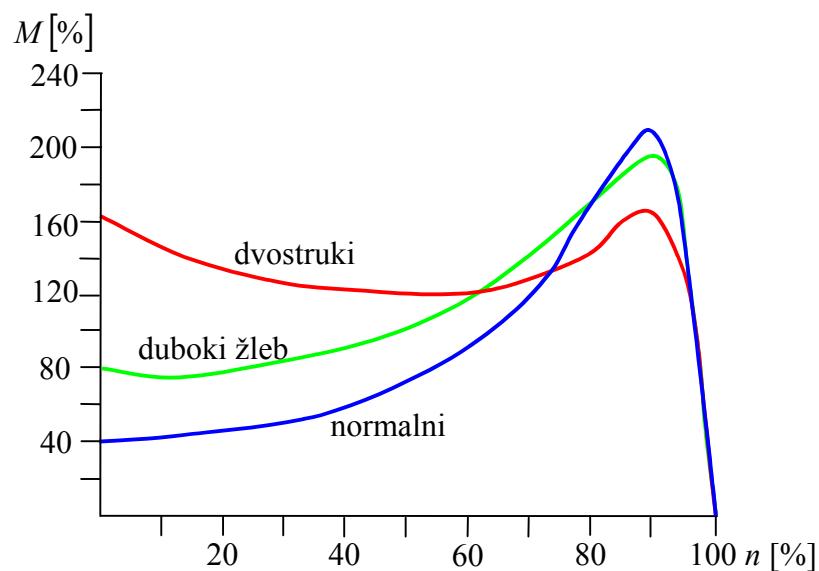
Princip rada: pri puštanju u rad, pod pretpostavkom da je put struje iste dužine u gornjim i donjim provodnicima nastaje rasuti fluks. Rasuti fluks donjeg provodnika (B) zatvaraće se oko njega samog, dok se rasuti fluks gornjeg provodnika (A) neće zatvarati samo oko njega i neće prolaziti kroz prorez između gornjeg i donjeg provodnika (bez obzira da li je ovaj prorez ispunjen vazduhom ili bakrom) jer je magnetski otpor velik, već će ići putem manjeg otpora tj. kroz gvožđe i zatvaraće se oko provodnika (B). U trenutku puštanja motora u rad, kada je  $f_2 = f_1$ , rasuti fluksovi, budući da su promenljivi, indukuju *ems* takvog smera da bi njihove struje bile suprotne od struje koju stvara rasuti fluks. Budući da je induktivni otpor donjeg provodnika velik (obuhvaćen je velikim rasutim fluksom),

kroz njega protiče vrlo mala struja, a ostali deo struje potisnut je u gornji provodnik. Da bi se povećao radni otpor spoljni žleb se pravi od materijala većeg specifičnog otpora (bronza) i manjeg je preseka, a pošto je induktivni usled rasipanja mali, onda je struja uglavnom aktivna (u fazi sa  $emf$ ) pa je polazni momenat gornjeg žleba veliki. Unutrašnji žleb preuzima struju kako se broj obrtaja približava sinhronoj brzini jer je pri tome vrlo mala frekvencija u rotoru, a time je i manji uticaj induktivnog otpora rotora, pri čemu nestaje tendencija potiskivanja struje prema obodu rotora.

Međutim, u odnosu na standardne motore kratkospojenim rotorom, ovakva konstrukcija ima za posledicu izvesno pogoršanje radnih karakteristika.



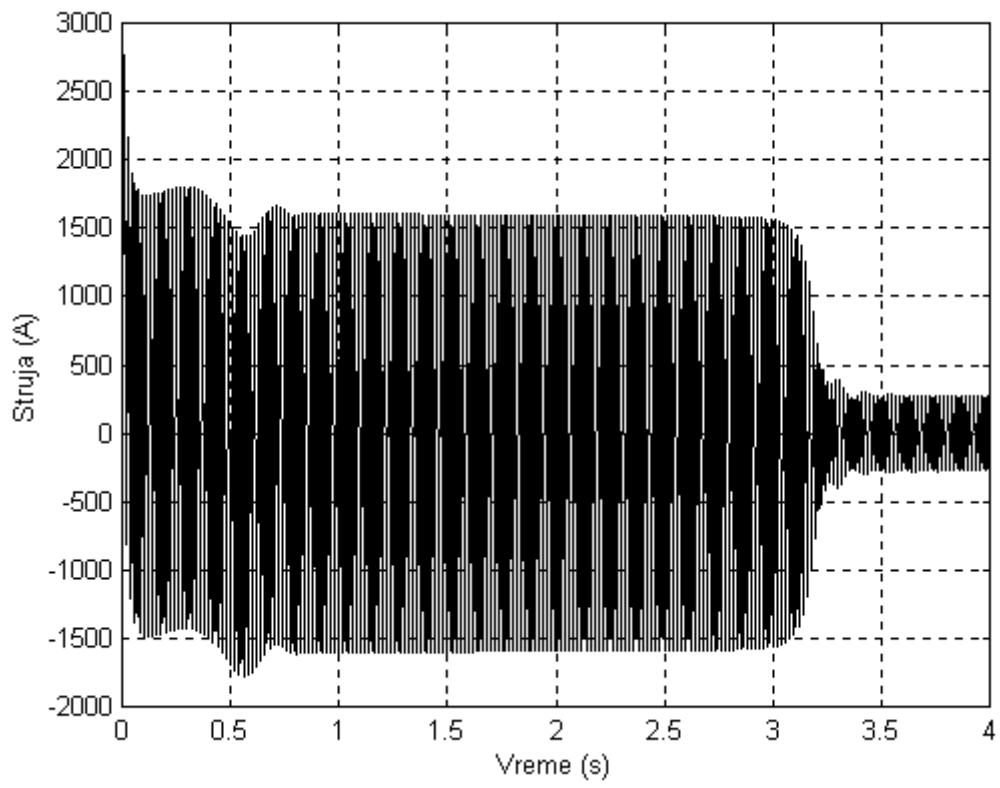
Slika 1-15 Duboki i dvostruki i žlebovi



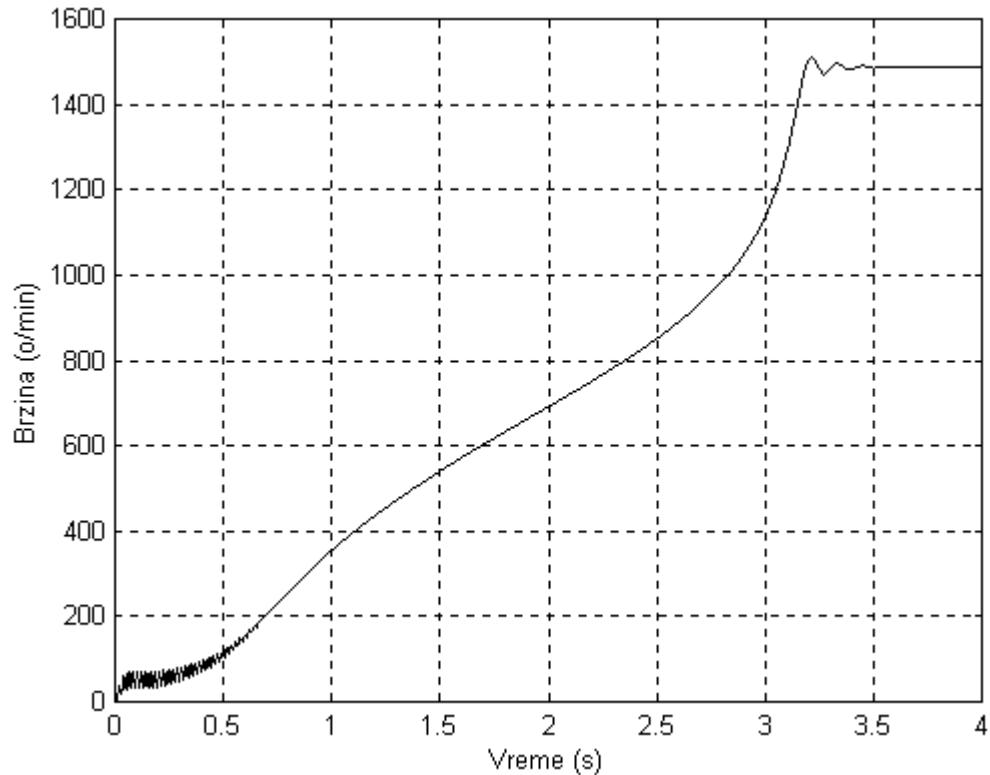
Slika 1-16 Poređenje momenata za AM sa normalnim, dubokim i dvostukim žlebovima

### 1.11.3 Simulacija pokretanja asinhronih mašina

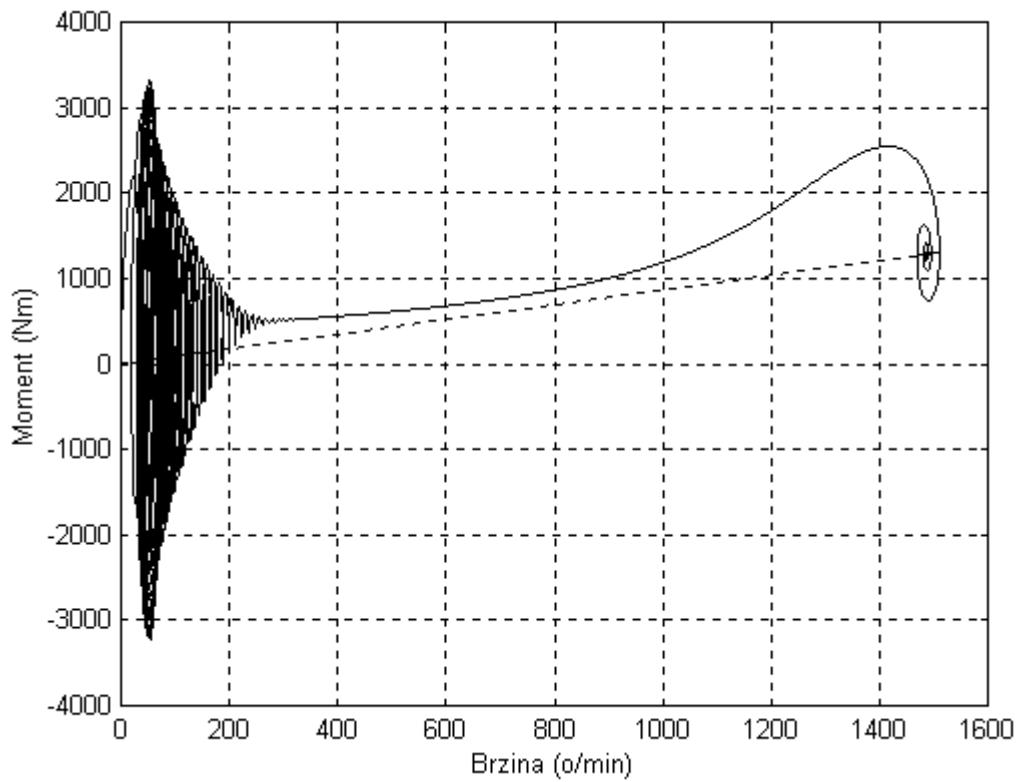
Na narednim slikama prikazani su prelazni procesi pojedinih veličina određenog trofaznog kavezognog asinhronog motora dobijeni simulacijom primenom programa MATLAB.



Slika 1-17 Struja faze A



Slika 1-18 Karakteristika brzine obrtanja



**Slika 1-19 Karakteristika momenta mašine i opterećenja**

### **1.12 Regulisanje brzine obrtanja asinhronih motora**

Mogućnost kontinualne promene brzine u širokim granicama i rad pri različitim brzinama je imperativ za savremene električne pogone. Zbog tvrde mehaničke karakteristike (brzina se menja se u veoma uskim granicama (svega nekoliko procenata) od praznog hoda do punog opterećenja), regulisanje brzine obrtanja asinhronih motora nije ni lako ni efikasno, u odnosu na mašine jednosmerne struje. Međutim, usled razvoja i pada cene mikroprocesora i komponenti energetske elektronike, asinhroni motori se sve više sreću i u regulisanim pogonima sa promenljivom brzinom obrtanja.

Efikasnost regulisanja brzine karakterišu:

- granice u kojima se brzina obrtanja može regulisati, a koje se obično daju odnosom maksimalne i minimalne brzine;
- ekonomičnost regulisanja, pod čime se podrazumevaju gubici u motoru ili u uređaju za regulisanje (a s time smanjuje stepen iskorišćenja) i cena opreme kojom se reguliše brzina;
- način regulisanja, odnosno da li se brzina motora reguliše u skokovima ili kontinualno;
- jednostavnost i sigurnost regulisanja.

Veličine pomoću kojih može da se reguliše brzina obrtanja asinhronog motora najlakše se vide iz osnovne jednačine koja opisuje brzinu obrtanja:

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

Ako rešimo jednačinu momenta po klizanju, dobijamo sledeći izraz:

$$s = f(U_1, \omega_s, M_k, R_1, X_{1\sigma}, R_2, X'_{2\sigma})$$

iz kojeg sledi da se pri konstantnom otpornom momentu (momentu tereta)  $M_k$  i konstantnoj brzini obrtannog magnetskog polja,  $\omega_s$ , regulacija klizanja AM može izvršiti na sledeći način:

- *Promenom napona* koji dovodimo na stator ( $U_1$ )
- *Promenom otpora* (radnog i induktivnog) u strujnom kolu statora i rotora. Regulisanje promenom induktivnog otpora je neekonomično i ograničeno i bez značaja za praksu.

Dakle, regulisanje brzine obrtanja možemo izvršiti:

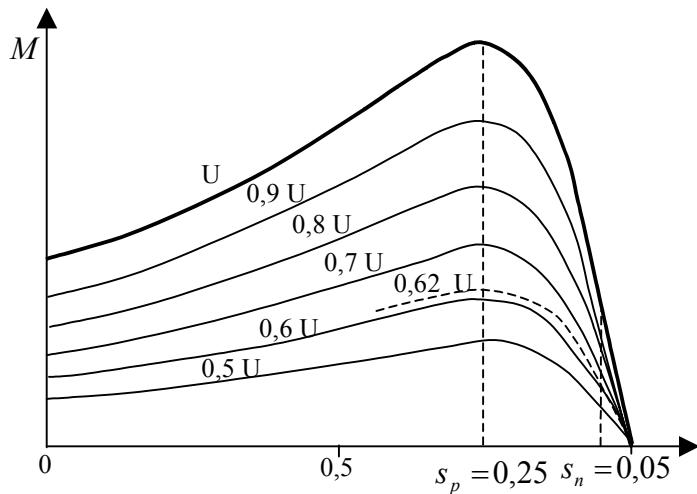
- *promenom frekvencije mreže* (izvora),
- *promenom broja pari polova* i
- *promenom klizanja*, a klizanje promenom *napona napajanja* i *promenom otpora u kolu rotora* (za mašine sa namotanim rotorom),
- *primenom kaskadnih spojeva*,
- *vektorskim upravljanjem*.

### **1.12.1 Regulisanje brzine asinhronih mašina sa namotanim rotorom**

Kod asinhronih mašina sa namotanim rotorom koristi se regulisanje brzine *promenom otpora u kolu rotora*. Uključenjem rotorskog otpornika u strujno kolo rotora povećava se, pri nepromjenjenom prevalnom momentu, prevalno klizanje i time smanjuje radna brzina motora, odnosno povećava područje stabilnog rada. Međutim, takva regulacija je vezana s gubicima energije i kao takva ne može biti osnova za trajni pogon, već samo za kratkotrajna prelazna stanja, npr. pokretanje ili zaustavljanje nekog pogona, ali ne velike snage.

### **1.12.2 Regulisanje brzine asinhronih mašina sa kratkospojenim rotorom**

Regulisanje brzine *promenom napona* napajanja vrši se smanjenjem napona, pomoću regulacionog transformatora ili uređaja energetske elektronike. Prednost ovog načina regulisanja je, pre svega, proširenju područja radnih brzina, dok su nedostaci usko područje regulacije – 10%, povećani gubici u rotoru, a i stator se više zagreva. Maksimalni momenat se smanjuje, pošto je on сразмерan sa kvadratom napona napajanja. Zato se ovaj način regulacije retko upotrebljava i to samo za elektromotore malih snaga, gde stepen iskorišćenja nije bitan.



**Slika 1-20 Regulisanje brzine promenom napona napajanja**

Napon napajanja se može, u principu, smanjiti do one vrednosti kod koje je novi prevalni momenat,  $M'_{pr}$  jednak naznačenom momentu, tj.  $M'_{pr} = M_n$ , odnosno područje regulacije brzine je određeno prevalnim klizanjem. Kod mašina manjih snaga prevalno klizanje je veće, pa je i područje regulacije veće.

U praksi je često odnos prevalnog i naznačenog momenta jednak 2,6 ( $M_{pr}/M_n = 2,6$ ), iz čega sledi:

$$M \approx U^2 \Rightarrow U' = \sqrt{\frac{M'_{pr}}{M_{pr}}} U_n = \sqrt{\frac{M_n}{2,6 M_n}} U_n = \sqrt{\frac{1}{2,6}} U_n = 0,62 U_n$$

Pogledajmo sada šta se dešava sa strujom, ako smanjimo napon na  $0,62 U_n$ . Iz jednačine momenta sledi:

$$k \Phi' I'_2 \cos \varphi'_2 = k \Phi I_2 \cos \varphi_2 ,$$

uz  $\Phi' = 0,62 \Phi$ ,  $\cos \varphi'_2 = 0,7$ ,  $\cos \varphi_2 = 1$ , imamo:

$$I'_2 = \frac{1}{0,62 \cdot 0,7} I_2 = 2,30 I_2 .$$

Dakle, zbog značajno povećane struje, namotaj rotora se intenzivno zagreva (proporcionalno sa kvadratom struje, dakle približno pet puta intenzivnije).

Regulisanje brzine *promenom broja pari polova* ne može da obezbedi kontinualnu promenu brzine, već diskretnu, i to dve, najviše tri različite brzine. Ostvaraju se na dva načina: stavljanjem nekoliko nezavisnih namotaja statora sa različitim brojem pari polova, ili postavljanjem jednog namotaja čiji se odvojci izvode do prebacovača. Ovaj način regulisanja može da se primeni samo kod motora sa kratkospojenim rotorom, jer se kratko spojeni rotor prilagođava svakom broju polova namotaja statora. U slučaju namotanog rotora bilo bi neophodno, sa promenom pari polova na statoru, izvršiti istu operaciju na

rotorskog namotaju, što usložnjava konstrukciju, a time i cenu izrade takvog namotaja. Dalje, treba imati u vidu da se promenom broja pari polova menjaju i sve karakteristike motora.

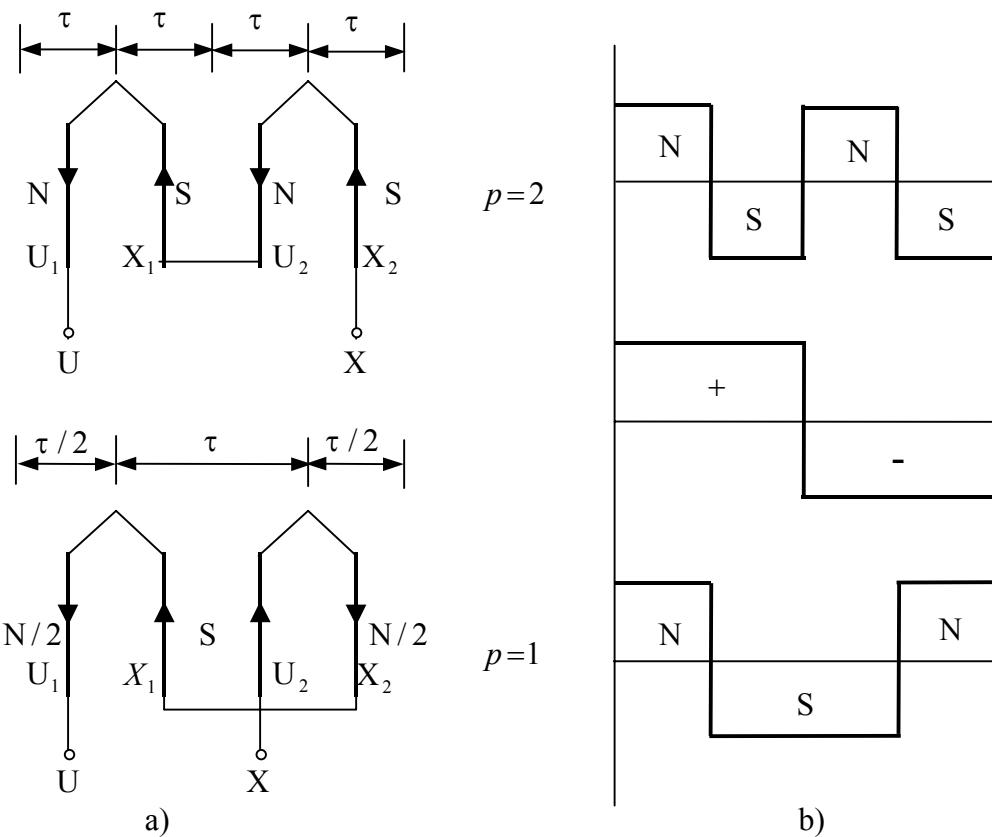
Promena broja pari polova se može ostvariti na sledeće načine:

1. stavljanjem dva ili više (ne više od 4) odvojena (nezavisna) namotaja na statoru, svaki dimenzionisan za drugi broj polova. Uključenjem jednog statorskog namotaja rotor se vrti brzinom koja je odgovara broju polova tog namotaja. Kada prekopčamo na drugi statorski namotaj rotor se vrti brzinom koja odgovara tom drugom namotaju.
2. stavljanjem jednog statorskog namotaja čiji se mnogobrojni odvojci izvode do jednog prebacáca pomoću kojeg se namotaj spreže tako da dobijemo drugačiji redosled navojnih delova (različite polaritete). Od ovakvih načina prespajanja, najpoznatija je tzv. Dalanderova sprega, jedna od sprega koja omogućuje prespajanje polova (promenu brzina) u odnosu 1:2. Dalanderove sprege su poseban slučaj tzv. polno amplitudne modulacije, kod koje se promenom smera struje navojnog dela vrši promena smisla magnećenja ispod pojedinog pola.

Prednost prvog načina je u tome što se snage i momenti kod pojedinih polariteta mogu nezavisno odrediti, pa se lako prilagođuje raznim pogonskim zahtevima. Nedostatak je i u višoj ceni zbog veće potrošnje bakra i prostora za taj bakar jer su i ostali delovi statora nešto povećani.

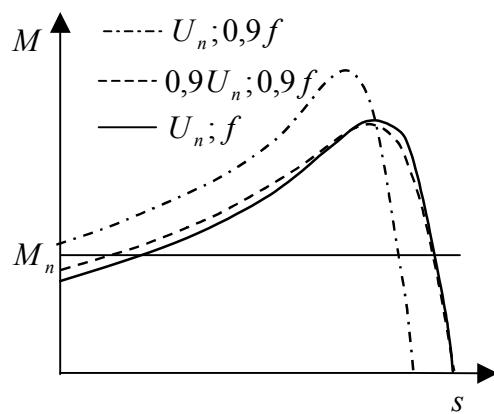
Moguća je, dakako, i kombinacija prvog i drugog načina kad se želi više brzina (od dve). Najčešće se asinhronne mašine prave za dve brzine, ali se grade i oni s tri ili četiri brzine, posebno u dizaličnoj tehnici, a za teške centrifuge u šećeranama služe čak i 5- brzinski motori.

Iako se brzina obrtanja prespajanjem polova vrlo grubo podešava, ipak je česta u jednostavnijim elektromotornim pogonima, posebno dizaličnim i sličnim, gde se uz njihovu primenu smanjuju dinamički gubici.



**Slika 1-21 a) prespajanje polova b) polna modulacija**

Regulacija brzine *promenom učestanosti* je, sa razvojem energetske elektronike, postala najznačajnija, pri čemu se, kako se ne bi promenilo magnetsko zasićenje mašine, često izvodi sa istovremenom promenom napona napajanja (tzv. *U/f regulacija*,  $U/f = \Phi = \text{const.}$ ). Prednosti ovog načina regulisanja brzine sadržane su u veoma dobrim tehničkim osobinama: zadržava se vrednost maksimalnog momenta, promena brzine je kontinualna i u širokom opsegu, koristi se standardni motor sa kratkospojenim rotorom. Međutim, potreban je dodatni uređaj za obezbeđenje promenljive učestanosti i napona napajanja.



**Slika 1-22 Regulisanje brzine promenom frekvencije**

Osim ovih načina regulisanja brzine obrtanja, postoje i načini vezani za *kaskadne veze* asinhronog motora sa drugim uređajima (asinhronim motorom, uređajima energetske elektronike).

*Vektorsko upravljanje* ima veliki značaj u savremenim elektromotornim pogonima. Kod asinhronog motora ne postoje direktno pristupačne upravljačke veličine, kao kod mašina jednosmerne struje, već se normalno upravlja učestanošću i amplitudom (odносно efektivnom vrednošću) višefaznih statorskih veličina (npr. strujom statora), od kojih svaka deluje i na magnetsko stanje i na momenat mašine, pa je upravljanje spregnuto. Analizom se može pokazati da je i kod asinhronog motora moguće raspregnuto upravljanje kao kod jednosmernog motora preko odgovarajućih pristupačnih faznih veličina. Za direktno i nezavisno upravljanje momentnom asinhronom mašinom potrebno je u svakom trenutku poznavati amplitudu i položaj polifazora rotorskog fluksa (tzv. orientaciju polja) u odnosu na statorski koordinatni sistem.

Kod rešavanja problema određivanja orientacije polja kod asinhronog motora se, u početku, primenjivalo tzv. *direktno vektorsko upravljanje* koje se baziralo na merenju fluksa u mašini (npr. Halove sonde). Kasnije je kod *indirektnog vektorskog upravljanja* problem rešavan merenjem položaja rotora pomoću inkrementalnog enkodera i obračunavanjem efekta klizanja.

### 1.13 Viši harmonici

U dosadašnjem razmatranju pretpostavili smo, radi jednostavnosti, da su sve električne i magnetske veličine sinusne. Međutim, u mašini postoje prostorni viši harmonici *mps* i kod sinusoidnog napona napajanja, a uz nesinusoidni napon napajanja postoje i vremenski viši harmonici.

#### 1.13.1 Viši prostorni harmonici (za osnovni vremenski)

Prostorni viši harmonici su prirodna posledica uticaja raspodeljivanja struje u provodnicima žlebova što rezultuje stepenastom raspodelom magnetopobudne sile. Čak i kada ne bi bilo žlebova na statoru, već bi navojci bili jednakoraspoređeni po obimu, prostorni oblik *mps* ne bi imao sinusoidni, već trapezni oblik.

Treba imati u vidu i da reakcija indukta može izazvati odstupanje od sinusoidne raspodele, što pogotovo dolazi do izražaja kod mašina sa istaknutim polovima (jednosmernih i sinhronih). Pod reakcijom indukta podrazumevamo situaciju koju imamo kod opterećene mašine, kod koje osim  $mps$  pobude imamo i delovanje  $mps$  indukta, a rezultantni fluks se stvara njihovim zajedničkim delovanjem. Mogućna zasićenost takođe može doprineti prostornom izobličenju polja.

Zbog simetrije u odnosu na os apcisa, i simetralu polja,  $mps$  sadržava samo neparne sinusne članove. Viši harmonik  $v$ -toga reda ima  $v$  puta više talasa od osnovnog harmonika, pa zaključujemo da  $v$ -ti harmonik ima  $v$  puta veći broj pari polova, odnosno da je:

$$p_v = v p .$$

Brzina  $v$ -toga harmonika će biti  $v$  puta manja od brzine osnovnog harmonika:

$$n_v = \frac{60f}{p_v} = \frac{60f}{v p} = \frac{n}{v} .$$

Pojasni i tetivni navojni sačinilac za više prostorne harmonike je:

$$k_{pv} = \frac{\sin v \frac{m}{z} 90^\circ}{m \sin v \frac{1}{z} 90^\circ},$$

$$k_{tv} = \sin v \frac{y}{\tau} 90^\circ .$$

Ukupni navojni sačinilac prostornog harmonika reda  $v$  je:

$$k_v = k_{pv} k_{tv} .$$

Izrazi za magnetopobudnu silu *trofaznog namotaja* kod višeg prostornog harmonika  $v$ -toga reda su:

$$F_{\theta v} = F_{mv} \left[ \cos v \theta \cdot \cos \omega t + \cos v (\theta - 120^\circ) \cdot \cos (\omega t - 120^\circ) + \cos v (\theta - 240^\circ) \cdot \cos (\omega t - 240^\circ) \right]$$

gde je, u opštem slučaju za raspodeljeni ( $m \neq 1$ ) i tetivni ( $y < \tau$ ) namotaj, amplituda naizmenične  $mps$ :

$$F_{mv} = \frac{4}{\pi} \frac{k_v N_{pf} I \sqrt{2}}{v 2 p} [A/2 pola]$$

gde je  $N_{pf}$  broj provodnika po fazi.

Amplituda  $v$ -toga harmonika obrtne  $mps$   $q$ -faznog tetivnog raspodeljenog namotaja je:

$$F_{Av} = \frac{q}{2} F_{mv} = \frac{q}{\pi} \frac{k_v N_{pf} I \sqrt{2}}{v p} [A/2 pola] .$$

Ako primenimo Leblanovu teoremu, za pojedine harmonike imamo:

$$v = 3k \quad F_{\theta v} = 0$$

$v = 6k + 1 \quad F_{\theta v} = F_{Av} \cos(v\theta - \omega t)$ , obrće se u istom smeru kao i osnovna harmonična komponenta,

$v = 6k - 1 \quad F_{\theta v} = F_{Av} \cos(v\theta + \omega t)$ , obrće se u suprotnom smeru u odnosu na osnovnu harmoničnu komponentu.

Dakle, viši prostorni harmonici reda  $3k$ , budući da su istofazni, ne stvaraju obrtno polje, te o njima nećemo dalje voditi računa. Na primer peti harmonik predstavlja u motoru još jedan asinhroni motor sa pet puta većim brojem polova i obrnutim redosledom faza, ali sa istom frekvencijom.

### 1.13.2 Viši vremenski harmonici (za osnovni prostorni)

Napajanje naizmeničnih mašina pomoću uređaja energetske elektronike, u cilju njihove regulacije, rezultuje pojavom viših vremenskih harmonika napona i struje. Zbog česte pojave ovakvog napajanja, opravdano je odrediti njihov uticaj.

Izrazi za magnetopobudnu silu kod višeg vremenskog harmonika  $v$  - tog reda su:

$$F_{tv} = F_{Av} [\cos\theta \cdot \cos v\omega t + \cos(\theta - 120^\circ) \cdot \cos(v\omega t - 120^\circ) + \cos(\theta - 240^\circ) \cdot \cos(v\omega t - 240^\circ)]$$

Ako za trofazni namotaj sprovedemo analizu viših vremenskih harmonika (za osnovni prostorni) sličnu onoj kod viših prostornih harmonika (za osnovni vremenski), dolazi se do sledećih zaključaka:

$$v = 3k \quad F_{tv} = 0$$

$v = 6k + 1 \quad F_{tv} = F_{Av} \cos(\theta - v\omega t)$ , obrće se u istom smeru kao i osnovna harmonična komponenta,

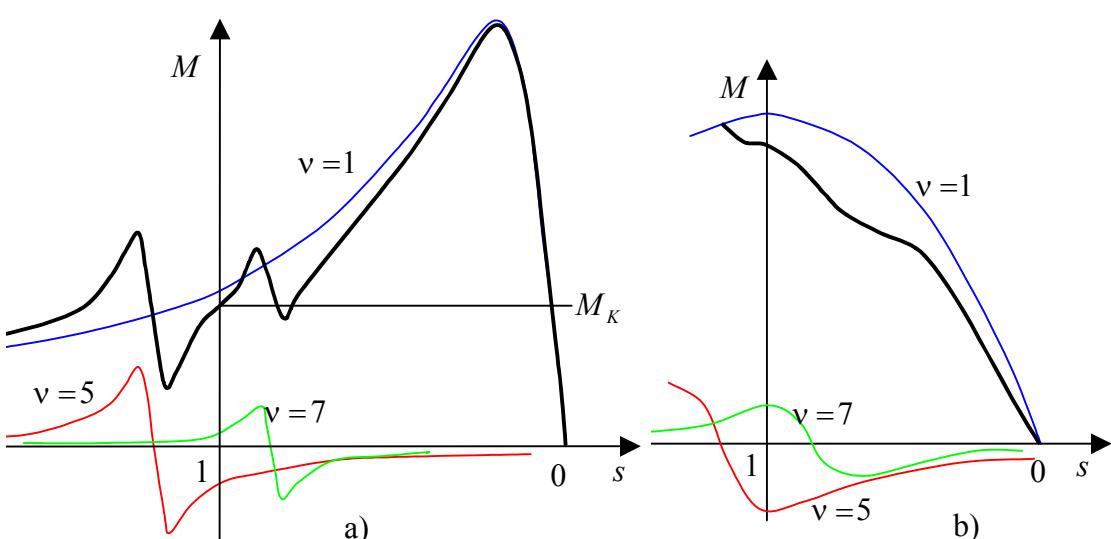
$v = 6k - 1 \quad F_{tv} = F_{Av} \cos(\theta + v\omega t)$ , obrće se u suprotnom smeru u odnosu na osnovnu harmoničnu komponentu.

Ovde su posmatrani vremenski harmonici prvog prostornog harmonika *mps*. Svakako da postoje i vremenski harmonici viših prostornih harmonika ali njihov razmatranja izostavljamo pretpostavljajući da je njihov uticaj neznatan.

Viši harmonici struje i napona pogoršavaju radne osobine električnih mašina izazivajući dodatne gubitke, momente i druge neželjene pojave.

### 1.13.3 Asinhroni momenti

Analizirajmo sada uticaj viših harmonika na rad motora. Najvažnija karakteristika za rad asinhronog motora je karakteristika momenta u zavisnosti od brzine obrtanja. Uticaj  $v$ -tog harmonika, koji daje obrtno polje, možemo da prikažemo kao poseban motor na istom vratilu sa  $v$  puta većim brojem parih polova i s naponom smanjenim u odnosu amplituda višeg i osnovnog harmonika polja. Karakteristika momenta takvog motora razlikovaće se od karakteristike momenta za osnovni harmonik po tome, što će sinhrona brzina obrtanja biti  $v$ -puta manja i što će maksimalni momenat biti manji u odnosu kvadrata "napona", tj. kvadrata amplituda  $mps$ .



Slika 1-23 Asinhroni momenti a) kavezni motor b) klizno-kolutni motor

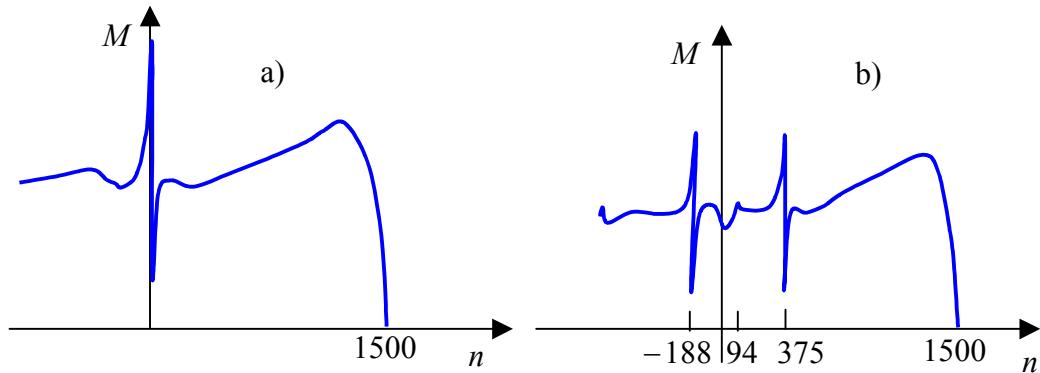
Sa slike se vidi da je uticaj viših harmonika jak kod malih brzina obrtanja, a da je praktično zanemariv u blizini sinhronizma. Zbog toga možemo očekivati probleme kod pokretanja. Ako je npr. momenat opterećenja konstantan, i veći od sedla kojeg prouzrokuje 7. harmonik, onda motor neće moći da ubrza preko tog sedla, nego će moći da se okreće sa oko  $1/7$  sinhronne brzine obrtanja, pri čemu će motor uzimati iz mreže mnogo veću struju od naznačene, te može doći do pregaranja motora. Ova analiza vredi za pokretanje motora sa kratkospojenim rotorom, a to je uvek slučaj kod kaveznih motora.

Kod pokretanja asinhronne mašine sa kliznim kolutovima pomoću pokretača, karakteristike svih viših harmonika se menjaju na isti način kao i karakteristike osnovnog harmonika. Ako uzmemo da je otpor pokretača tako velik, da imamo maksimalni momenat prilikom pokretanja ( $s_{pr}=1$ ), dobijemo karakteristike momenta prema slici 1-23 b). Sa slike je vidljivo da se rezultantni momenat ne smanjuje mnogo, iz čega sledi da menjanjem otpora pokretača možemo praktički uvek da postignemo dovoljno velike momente pokretanja, pa prema tome kod motora sa namotanim rotorom problem pokretanja ne postoji u tolikoj meri kao kod kaveznih motora.

#### 1.13.4 Sinhroni momenti

Svaki harmonički član  $mps$  u statoru prouzrokuje u rotoru iste takve takve harmoničke članove. Ako neki viši harmonički član rotora dođe u sinhronizam sa nekim višim harmoničkim članom statora, koji nije izazvao posmatrani viši harmonički član u rotoru, nastupa među njima sinhroni momenat. Ovaj slučaj se može tretirati kao dvostruko napajan motor. Ovi sinhroni momenti su vezani za tačno određenu brzinu obrtanja, kod čega ugaoni pomeraj među obrtnim poljima ranije spomenutih viših harmoničkih članova statora i rotora može da iznosi najviše  $\pm 180^\circ$ , izvan čega ispadaju iz sinhronizma. Kod snimanja momenata ovi sinhroni momenti se vide kao oštra povišenja i sniženja momenta.

Ovaj sinhroni momenat može da nastupi i u stanju mirovanja rotoru a, pa ako je veći od pozitivnog zbira svih pokretnih asinhronih momenata, može imati posledicu da motor i bez opterećenja uopšte ne krene. Ovo je upravo slučaja kada stator i rotor imaju isti broj žlebova. Zubi statora i rotora dođu tada u položaj kada stoje jedan nasuprot drugom, pa među njima nastupa reakcioni sinhroni motor, koji drži rotor i ne da mu da se pokrene.



Slika 1-24 a) sinhroni momenat kod pokretanja, b) sinhroni momenti

#### 1.13.5 Sile vibracija

Usled viših harmonika mogu nastati i jednostrane  $mps$ , koje se vrte i koje svojim magnetskim silama prouzrokuju jednostrane potezne sile na rotoru koje tresu (vibriraju) rotor. Ove sile imaju isto delovanje kao npr. neizbalansirane mase rotora, čija jednostrana centrifugalna sila, koja se okreće sa rotorom, prouzrokuje vibracije rotora i preko ležajeva vibracije cele mašine.

Ovakva jednostrana obrtna polja nastaju superpozicijom dvaju obrtnih polja viših harmonika bilo statora, bilo rotora, bilo statora i rotora, kada se obrću u suprotnim smerovima, i ako se red tih harmonika razlikuje za jedan.

#### 1.13.6 Mere za smanjenje uticaja viših harmonika

Da bi sprečili navedene nepovoljne efekte izazvane višim harmonicima, kod izgradnje električnih mašina nastoji se da se spreči pojava viših harmonika značajnijeg intenziteta, kao i onemogući njihovo nepovoljno delovanje. Najznačajniju ulogu u kod toga ima broj žlebova na statoru i rotoru. Na osnovu teorijskih razmatranja i praktičnih iskustava, došlo se do sledećih odnosa brojeva žlebova na statoru i rotoru, koji daju dobre rezultate kod motora manjih snaga (Tabela 1-3).

**Tabela 1-3 Povoljni odnos brojeva žlebova na statoru i rotoru kod motora manjih snaga**

Motor	Broj žlebova statora / broj žlebova rotora
2-polni	18/26 24/26 24/20 24/28 36/28
4-polni	18/26 24/18 24/28 36/28
6-polni	18/26 36/30 36/33 36/46
8-polni	24/18 36/46

Negativni uticaj viših harmoničkih članova možemo da smanjimo i sa skraćenjem koraka namotaja, čime možemo da eliminišemo određeni viši harmonički član.

Kod mašina sa namotanim rotorom već samo skraćenje koraka zadovoljava. Kod kaveznih mašina gotovo uvek izvodimo i skošenje žlebova statora prema žlebovima rotora. Pod skošenjem podrazumevamo žleb duž rotora koji ne ide paralelno sa simetralom vratila, nego je tangencijalno skošen za veći ili manji ugao. Skošavaju se samo žlebovi statora ili samo žlebovi rotora, što zavisi o tehnološkom procesu, dok je sa stanovišta sprečavanja uticaja viših harmonika *mps* to svejedno. Efekat skošenja je utoliko veći ukoliko je skošenje veće. Preko 2 do 3 žlebna koraka se ne ide zbog gubitak u snazi, jer skošenje deluje kao i smanjenje koraka namatanja, tj. pojavljuje se još jedan faktor namotaja manji od 1. Skošenje izaziva i dodatne parazitne momente i gubitke, odnosno veće zagrevanje motora. Često se izvodi skošenje za jedan žlebni korak, što je obično dovoljno efikasno, a ujedno je uticaj gubitka snage tako mali da ga u praktičnim proračunima zanemaruјemo. Kod tog skošenja, gotovo da imamo slučaj kao da je broj žlebova beskonačan, čime se izbegavaju stepenice u krivi *mps*, koje su glavni uzrok postojanja viših harmonika.

Uopšteno se može tvrditi da veći broj žlebova u rotoru daje bolju karakteristiku momenta, ali i veće dodatne gubitke, zbog čega se obično ide na manji broj žlebova na rotoru, u odnosu na stator.

### 1.14 Obrtni transformator

Asinhroni motor u osnovi predstavlja jedan oblik transformatora. Naime, ako na stator (primar) priključimo trofazni naizmenični napon, u *zakočenom* rotoru će se indukovati napon  $E_2$ , koji će biti manji ili veći od primarnog napona  $E_1$  u odnosu broja navojaka i faktora namotaja:

$$E_2 = \frac{k_2 N_2}{k_1 N_1} E_1 .$$

Asinhroni motor sa zakočenim rotorom koji služi samo električno-električno (ne elektromehaničko) pretvaranje energije nazivamo *obrtnim (zakretnim) transformatorom ili indupcionim regulatorom*.

Kod normalnog transformatora u svakom stubu imamo pulzirajuće polje, koje indukuje napon transformacije, dok kod zakretnog transformatora imamo pulzirajuće polje, koje indukuje napon rotacije.

Asinhrona mašina, pa prema tome i zakretni transformator ima vazdušni procep (zazor), pa je zbog tog struja magnećenja puno veća u odnosu na normalni transformator (kod

motora manjih snaga kreće se i do 80% naznačene struje!). Budući da su namotaji kod asinhronih mašina relativno puno razmaknuti (jedan je na statoru, a drugi na rotoru), rasipanje fluksa je mnogo veće nego kod normalnog transformatora. Konačno, zakretni transformator je zbog svoje komplikovanije konstrukcije, mnogo skuplji od normalnog transformatora iste snage. Do sada su bili navedeni samo nedostaci zakretnog transformatora. Ponekad ga ipak koristimo, jer on ima prednost jer zakretanjem rotora možemo kontinualno regulisati napon.

Zakretanjem rotora možemo zakretati i vektore napona sekundarnih faza u odnosu na vektore primarnih faza. Analizirajmo rad sprege na slici 1-25. Ovde je sekundarna strana statora, na taj način se indukovani napon u statoru vektorski pribraja naponu mreže, na koji je priključen namotaj rotora, što je jednofazno prikazano vektorskim dijagrameom. Ako okrenemo rotor za mehanički ugao  $\alpha$ , vektor napona indukovanih u statoru  $E_1$  se okreće za električni ugao  $\theta$ :

$$\theta = p\alpha .$$

Okretanjem rotora možemo prema tome kontinualno menjati u granicama od:

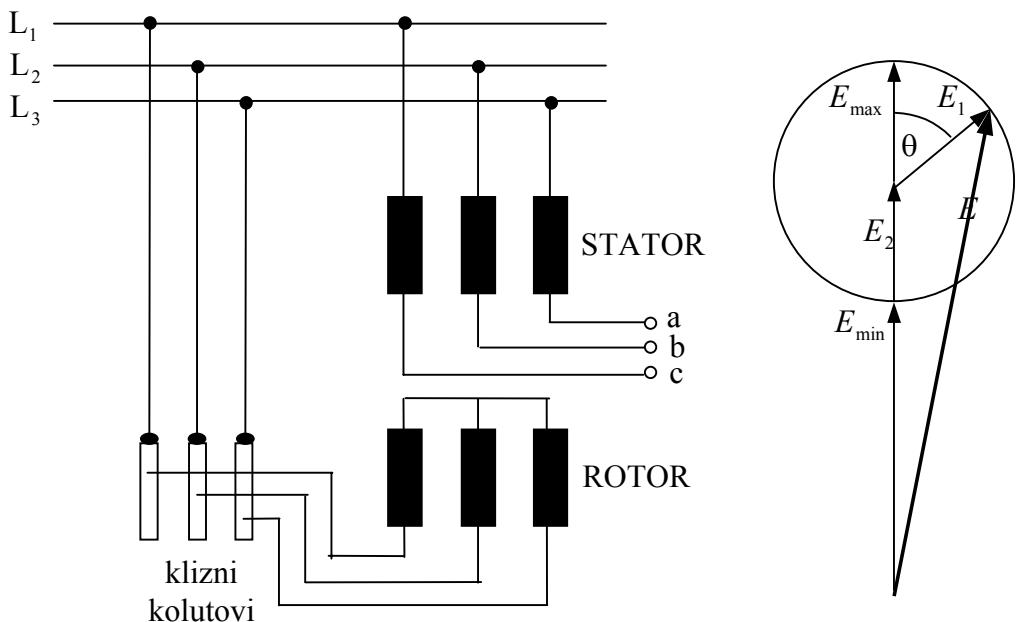
$$E_{\min} = E_2 - E_1$$

do

$$E_{\max} = E_2 + E_1 .$$

U ovom razmatranju zamenili smo uloge statora i rotora. Rotorski namotaj ovde predstavlja primarnu stranu. Razlog tome je da imamo samo tri klizna koluta, inače bi trebali da imamo šest kliznih kolutova, jer iz rotora trebalo izvesti oba kraja svake faze rotorskog namotaja (jedan za priključak na mrežu, a drugi na priključak prijemnika).

U primeni zakretni transformator često srećemo kao izvor regulisanog napona u ispitnim stanicama transformatora i asinhronih motora.

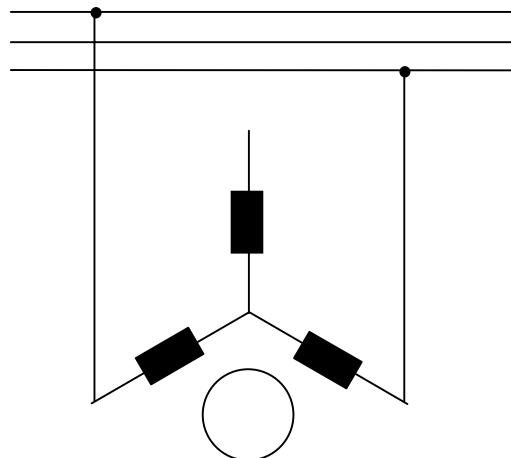


Slika 1-25 Obrtni transformator

### 1.15 Jednofazni asinhroni motori

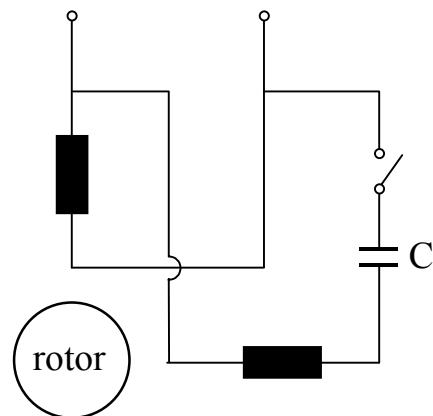
Jednofazni asinhroni motori se primenjuju u jednofaznim mrežama, što je veoma značajno s obzirom na činjenicu da trofazna mreža, pogotovo u udaljenim područjima, ne mora biti na raspolaganju. Izrađuju se za male snage, obično do 0,5 kW, jer je to ekonomičnije rešenje u odnosu na izgradnju trofaznih asinhronih motora iste snage. Osnovni nedostaci, u odnosu na trofazne motore, su nedostatak polaznog momenta, manja snaga za isto magnetsko kolo, lošiji faktor snage i promenljiva snaga i momenat.

Rad jednofaznog asinhronog motora može se posmatrati i kao specijalni slučaj rada trofaznog asinhronog motora. Naime, jednofazni asinhroni motor je najlakše dobiti iz trofaznog ako bi se napajanje jednog statorskog namotaja prekinulo. Tim prekidanjem preostala dva namotaja bi bila vezana redno i priključena na monofazno napajanje (linijski napon iz trofaznog sistema). Uz simetrično napajanje, trofazni asinhroni motor će iz jednog simetričnog režima preći u nesimetričan režim rada, koji se analizira primenom simetričnih komponenti. Posledica nesimetričnog režima jeste loš stepen iskorisćenja (povećani gubici) i pogoršanje momentnih osobina.



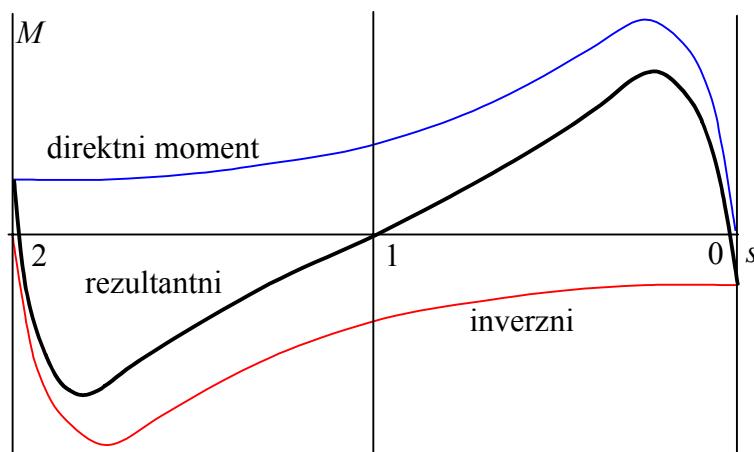
Slika 1-26 Dobijanje jednofaznog AM iz trofaznog AM

Kod asinhronih motora koji su kontruisani za jednofazni rad, namotaj rotora je kavezni. Namotaj statora se sastoji iz dva dela- glavne faze smeštene u 2/3 ukupnog broja žlebova i pomoćne faze smeštene u preostale 1/3 žlebova, koja je u odnosu na glavnu fazu prostorno pomerena za  $90^\circ$ . Pošto je za stvaranje obrtnog magnetskog polja, pored prostornog pomeraja, potreban i vremenski pomeraj struja, obično se na red sa pomoćnom fazom priključuje kondenzator (Slika 1-27). Pomoćna faza može da bude uključena samo za vreme zaletanja, kada motor radi kao dvofazni, ili trajno, pri čemu se u prvom slučaju primenjuje zaletni kondenzator, dok se u drugom slučaju primenjuje pogonski kondenzator, ili opcionalno odvojeni pogonski i zaletni kondenzator. Kada rotor postigne određenu brzinu, obično 70-80% sinhronne brzine, centrifugalni prekidač isključi namotaj pomoćne faze.



Slika 1-27 Jednofazni asinhroni motor sa zaletnim kondenzatorom

Obrazložimo sada nepostojanje polaznog momenta. Po *Leblanovoj teoremi*, direktno i inverzno polje stvaraju sa rotorskim strujama obrtne momente svako u svom smeru, s karakteristikama koje su nam poznate iz prethodnih izlaganja. Rezultujući momenat ima vrednost jednaku nuli pri polasku, tj. ne postoji polazni momenat (Slika 1-28). Naime, polazni momenat ni ne može da postoji jer jednofaznim priključkom nije određen smer obrtanja. Zato jednofazni motor može da krene samo uz spoljnju pomoć ili dodatne uređaje (npr. kondenzatore).



Slika 1-28 Karakteristika momenta jednofaznog asinhronog motora

### **1.16 Asinhroni generator**

Generatorski režim rada asinhrone mašine nastupa kada se rotor mašine obrće stranom pogonskom mašinom u smeru obrtanja magnetskog polja brzinom većom od sinhrone. U ovom režimu rada generator predaje aktivnu snagu mreži, međutim zbog potrebe za snabdevanjem reaktivnom snagom za stvaranje magnetskog polja pobude, asinhroni generator ne može da radi sam na sopstvenu mrežu, već samo paralelno bar sa jednim sinhronim generatorom. Naznačeno klizanje generatora je otprilike isto kao naznačeno klizanje motora, ali ima negativan predznak. U odnosu na sinhronu generatore, osnovni nedostatak asinhronih generatora je potreba za reaktivnom energijom, odnosno potreba za barem jednim sinhronim generatorom, dok su prednosti vezane za jeftiniju i jednostavniju opremu, što dolazi do izražaja kod manjih snaga. Naime, kod asinhronih generatora nije potrebna aparatura za sinhronizaciju, pogonska mašina ne zahteva skupi regulator brzine obrtanja, već samo uređaj za njeno ograničenje, a nije potreban ni automatski regulator napona. Asinhroni generatori nisu naišli na neku širu upotrebu, i danas ih susrećemo kao pomoćne generatore manjih snaga.



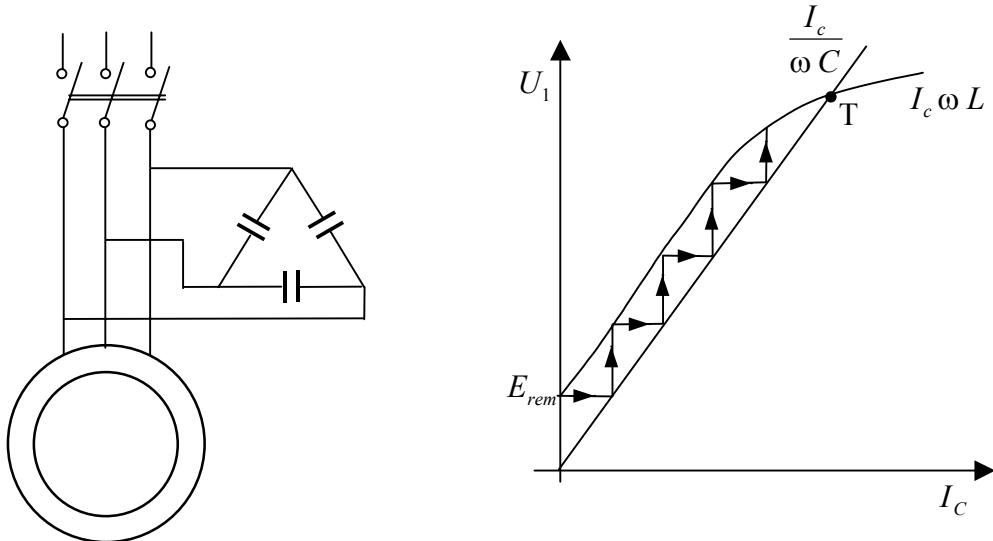
**Slika 1-29 Asinhroni generator**

Reaktivna energija za stvaranje magnetskog polja pobude svakako se mora dovesti spolja kako kod motornog, tako i kod generatorskog pogona. Pri tom mogu nastupiti sledeća dva slučaja:

- Paralelni pogon s postojećom mrežom (odnosno sinhronim generatorom) iz koje se uzima potrebna reaktivna snaga i vraća proizvedena aktivna snaga.
- Samostalni pogon asinhrone mašine u vidu asinhronog generatora sa sopstvenom generatorskom pobudom.

Paralelni pogon asinhronog generatora sa postojećom mrežom izvodi se uglavnom u malim pomoćnim elektranama bez posluge (mini hidroelektrane, vetrenjače). Asinhrona mašina sa kratkospojenim rotorom pri tome ne zahteva uređaje za sinhronizaciju i regulaciju napona a pogonska mašina (turbina) ne treba skupi regulator brzine obrtanja, već samo uređaj za njeno ograničenje. Predaja snage je samopodešavajuća i odgovara snazi mašine u datom trenutku.

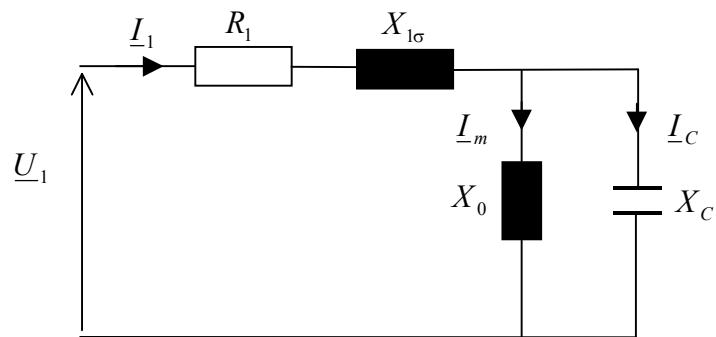
Analizirajmo sada uslove samopobudjivanja simetričnih trofaznih asinhronih generatora. Proces samopobudjivanja dan je na slici 1-30. Na istoj slici prikazane su karakteristika praznog hoda (magnećenja),  $U = f(J_0)$  i napon na kondenzatorskim baterijama,  $U_C$ . Pojednostavljena ekvivalentna šema jedne faze data je na slici 1-31.



Slika 1-30 Samopoobudjivanje asinhronog generatora pomoću kondenzatora

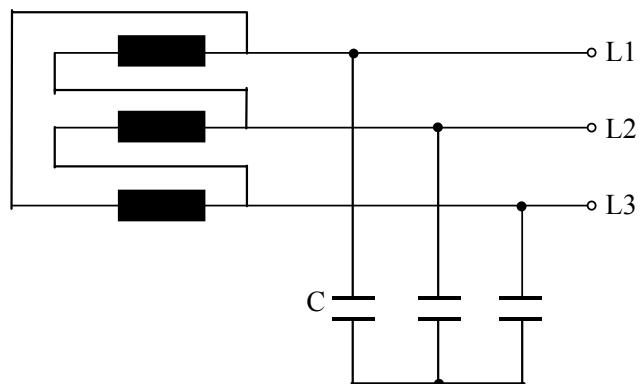
Ako se rotor navedene asinhronе mašine pokrene pomoću pogonskog motora izvesnom brzinom, usled remanentnog magnetizma rotora u namotaju statora će se indukovati elekromotorna sila  $E_{rem}$  male vrednosti. Posledica ove elektromotorne sile je izvesna kapacitivna struja u kondenzatoru, odnosno u namotaju statora. Pošto je ova struja po smeru odgovara struji magnećenja  $I_m$ , ona povećava indukovani *ems*. Na ovaj način, mehanizmom samopobudjivanja, napon se povećava od  $E_{rem}$  do one vrednosti napona pri kojoj jednačina prave seće karakteristiku praznog hoda (tačka T).

$$U_C = I_C X_C = I_C \frac{1}{\omega C}$$

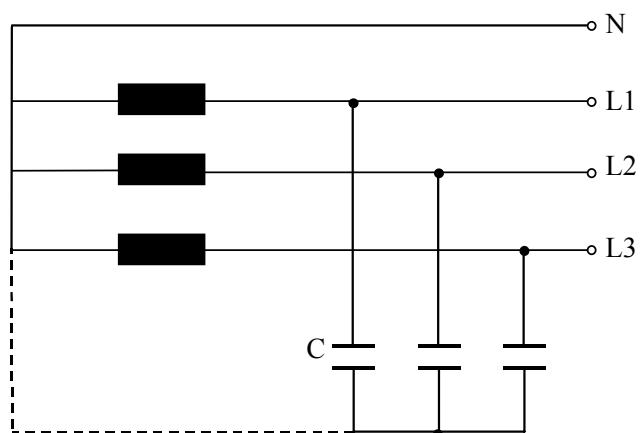


Slika 1-31 Pojednostavljena ekvivalentna šema jedne faze

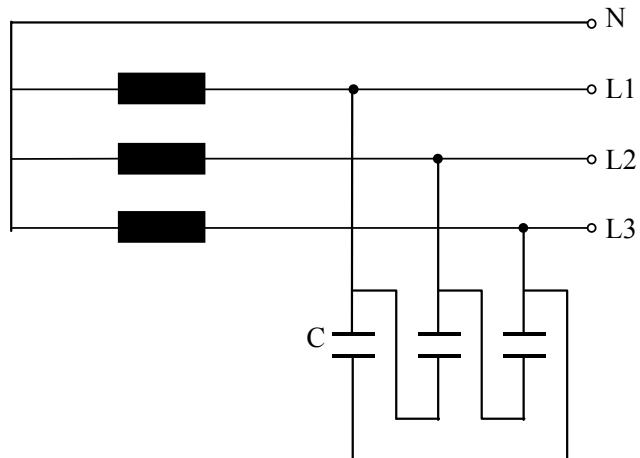
AG  
3~



AG  
3~



AG  
3~



Slika 1-32 Spojevi za priključak kondenzatora

### **1.17 Literatura**

- [1] B. Mitraković: *Asinhrone mašine*, Naučna knjiga, Beograd, 1986.
- [2] A. Dolenc: *Asinhrone mašine*, Sveučilišna naklada Liber, Zagreb, 1970.