

**Zakład Napędów Wieloźródłowych**  
**Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich PW**  
**Laboratorium Elektrotechniki i Elektroniki**

**Ćwiczenie M2 - instrukcja**

**Badanie trójfazowych maszyn indukcyjnych:  
silnik klatkowy, silnik pierścieniowy**

Data wykonania ćwiczenia.....  
Data oddania sprawozdania.....

**Zespół wykonujący ćwiczenie:**

	<i>Nazwisko i imię</i>	<i>ocena końcowa</i>
1.	.....	.....
2.	.....	.....
3.	.....	.....
4.	.....	.....
5.	.....	.....
6.	.....	.....
7.	.....	.....
8.	.....	.....
9.	.....	.....
10.	.....	.....

**Wydział SiMR PW**  
**Rok ak. 20.../20...**  
**Semestr.....**  
**Grupa.....**

**Warszawa 2007r.**

## SPIS TREŚCI

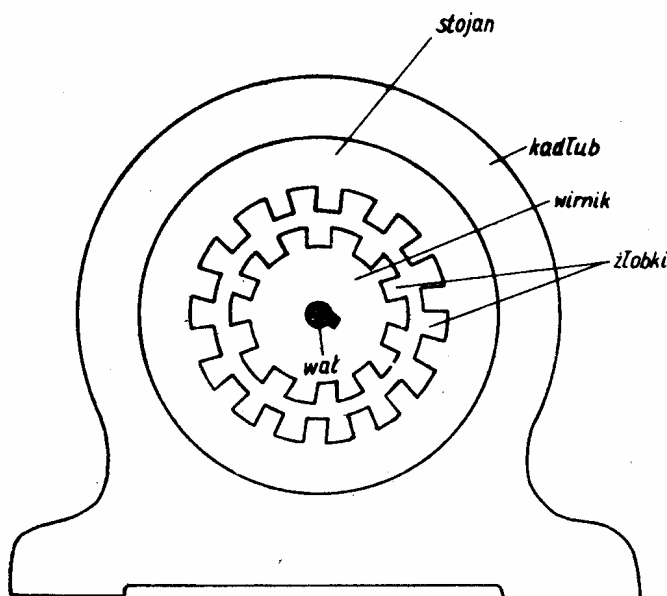
<b>1. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE</b>	
<b>1.1. Budowa silników indukcyjnych</b>	3
<b>1.2. Zasada działania trójfazowego silnika indukcyjnego</b>	4
<b>1.3. Moment obrotowy silnika indukcyjnego i jego charakterystyki w różnych warunkach pracy</b>	8
<b>1.4. Rozruch silników indukcyjnych</b>	
1.4.1. Rozruch bezpośredni silnika klatkowego	10
1.4.2. Rozruch silnika klatkowego przy zastosowaniu przełącznika gwiazda - trójkąt	11
1.4.3. Sposoby rozruchu silników budowy pierścieniowej	13
<b>1.5. Regulacja prędkości obrotowej silników indukcyjnych</b>	
1.5.1. Regulacja prędkości obrotowej silnika klatkowego	15
1.5.2. Regulacja prędkości obrotowej silników indukcyjnych budowy pierścieniowej	16

## CEL ĆWICZENIA

*Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania, sposobami rozruchu oraz regulacji prędkości obrotowej klatkowych i pierścieniowych trójfazowych silników indukcyjnych (asynchronicznych).*

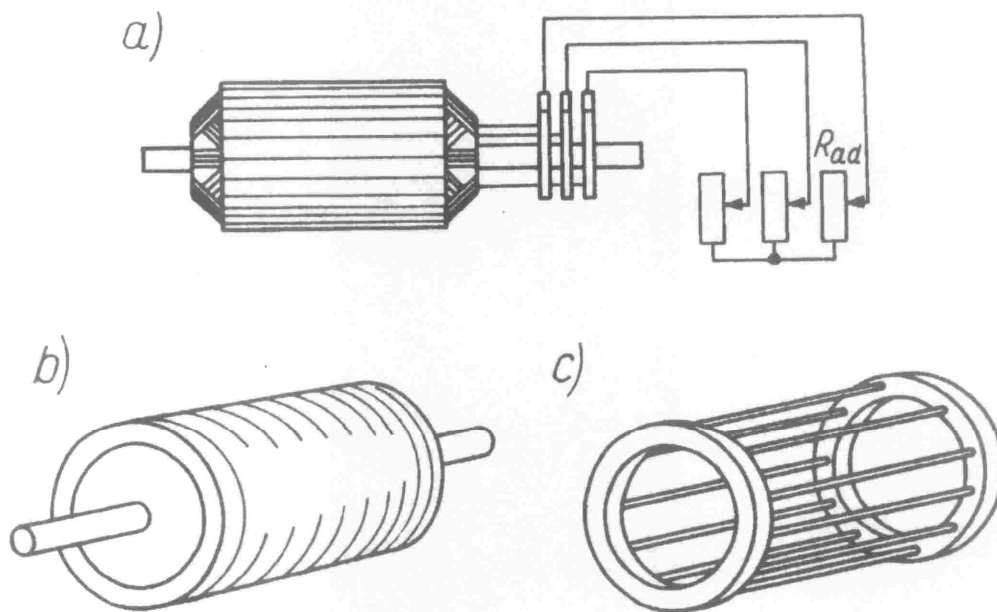
### 1. Budowa silników indukcyjnych

Budowę silnika indukcyjnego pokazuje rys.1. Część nieruchoma (stojan) ma kształt wydrążonego wewnątrz walca. W wewnętrznej przestrzeni stojana znajduje się część wirująca maszyny zwana wirnikiem, również w kształcie walca. Obwód magnetyczny stojana i wirnika jest wykonany w postaci rdzenia z blachy stalowej z dodatkiem krzemu, zwykle o grubości 0.5 mm; wirniki dużych maszyn indukcyjnych są wykonane z blach o grubości od 1 do 2 mm. Szczelina powietrzna między stojanem i wirnikiem ma w maszynach małej mocy wymiar od 0.1 do 0.5 mm, w dużych (powyżej 20 kW) od 1 do 3 mm. Na wewnętrznej stronie rdzenia stojana i zewnętrznej stronie rdzenia wirnika wykonane są na całej długości specjalne rowki zwane żłobkami, w których umieszczone są uzwojenia. Elementy obwodu magnetycznego między żłobkami noszą nazwę zębów.



Rys. 1. Schemat obwodów magnetycznych stojana i wirnika silnika asynchronicznego

Najczęściej stosowane są silniki indukcyjne trójfazowe. Silnik taki posiada trójfazowe uzwojenie stojana. Fazy uzwojenia w czasie pracy są połączone w gwiazdę lub w trójkąt. W małych silnikach stosuje się niekiedy jednofazowe lub dwufazowe uzwojenie stojana. Uzwojenie stojana wykonane jest z drutu izolowanego. Uzwojenie wirnika silnika indukcyjnego może być wykonane, podobnie jak stojana, z drutu izolowanego lub może mieć kształt nieizolowanych prętów, umieszczonych w żłobkach i połączonych ze sobą po obu stronach wirnika.



Rys.2. Schemat obwodów elektrycznych silników indukcyjnych  
 a) pierścieniowego; b) klatkowego (zwartego);  
 c) uzwojenie (klatka) wirnika klatkowego

Do obwodu uzwojenia wirnika można przyłączyć dodatkowe elementy zwiększające rezystancję każdej fazy. Do tego służą umieszczone na wale wirnika pierścienie ślizgowe, do których przylegają szczotki, połączone z dodatkowymi zewnętrznymi elementami. Taką zmianę rezystancji obwodu elektrycznego wirnika stosuje się w celu przeprowadzenia rozruchu, regulacji prędkości lub hamowania silnika. Ze względu na to, że charakterystycznym elementem omawianego typu silnika są pierścienie ślizgowe, nazywa się go silnikiem indukcyjnym pierścieniowym. Schemat obwodów elektrycznych silnika pierścieniowego z dodatkowymi elementami rezystancyjnymi ilustruje rys. 2a.

Jeżeli obwód elektryczny jest wykonany z nieizolowanych prętów, to pręty te połączone po obu stronach wirnika pierścieniami zwierającymi. Tym samym obwód wirnika jest zawsze zwarty a zatem żadnych dodatkowych elementów przyłączać do niego nie można. Silnik taki nosi nazwę silnika indukcyjnego zwartego, nazywany bywa też klatkowym ze względu na to, że pręty wirnika połączone pierścieniami tworzą „klatkę” (rys.2c).

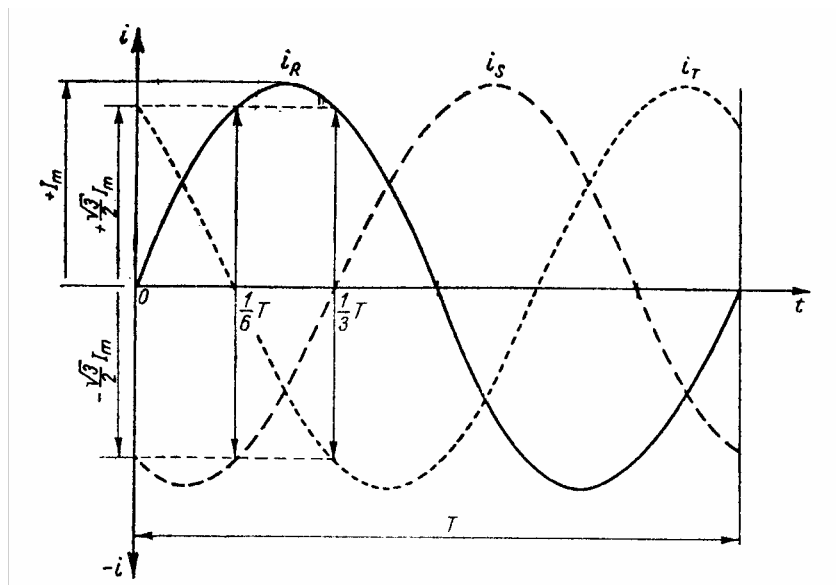
## 2. Zasada działania trójfazowego silnika indukcyjnego

Po przyłączeniu do sieci, w trzech nieruchomych cewkach (fazach) stojana, przesuniętych o  $120^\circ$ , płyną prądy fazowe sinusoidalne o wartości chwilowej  $i_R$ ,  $i_S$ ,  $i_T$ , przesunięte względem siebie o  $1/3$  okresu, co można wyrazić wzorami:

$$i_R = I_m \sin \omega t,$$

$$i_S = I_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$i_T = I_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right).$$



Rys.3. Przebiegi prądów w trzech fazach uzwojenia stojana

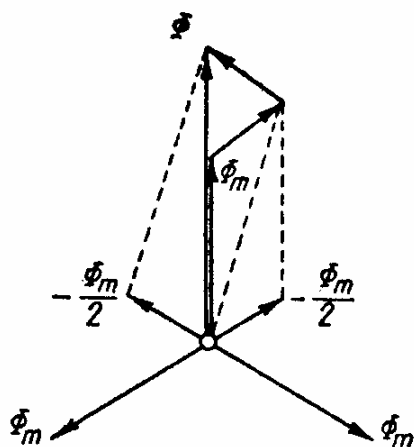
Przebiegi tych prądów w czasie przedstawiono graficznie na rys 3. Prądy te wytwarzają strumienie magnetyczne  $\phi_R$ ,  $\phi_S$ ,  $\phi_T$ , których kierunki są zgodne z osiami cewek. Pomijając nieliniowość spowodowaną nasyceniem można przyjąć, że zmieniają się one w czasie sinusoidalnie wraz z prądami fazowymi  $i_R$ ,  $i_S$ ,  $i_T$ , które je wytwarzają, czyli:

$$\begin{aligned}\phi_R &= \phi_m \sin \omega t, \\ \phi_S &= \phi_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \\ \phi_T &= \phi_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right),\end{aligned}$$

gdzie:  $\phi_m$  – wartość maksymalna strumienia jednej cewki.

W przestrzeni strumienie te zajmują położenie niezmiennie w stosunku do nieruchomych cewek i są względem siebie przesunięte o kąt  $120^\circ$ . Dają one w każdej chwili strumień wypadkowy  $\phi$ . Równy sumie geometrycznej strumieni składowych, czyli:

$$\vec{\phi} = \vec{\phi}_R + \vec{\phi}_S + \vec{\phi}_T$$

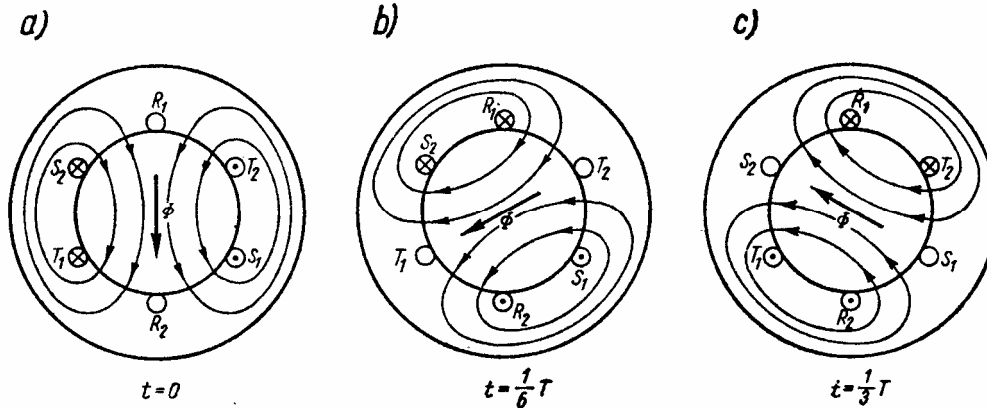


Rys. 4. Sumowanie wektorów strumieni składowych

Matematycznie można dowieść, że strumień wypadkowy ma stałą wartość, tzn. niezależną od czasu i wiruje w przestrzeni ze stałą prędkością kątową, zależną od częstotliwości prądu i liczby par biegunów maszyny. Wartość strumienia wypadkowego można określić dla dowolnej chwili czasu sumując strumienie składowe. Np. dla chwili, gdy w jednej z cewek (R) wartość chwilowa prądu osiągnie wartość maksymalną  $i_R = I_m$ , w pozostałych dwóch cewkach będzie ona miała wartość  $i_R = i_S = -I_m/2$  (patrz rys.3.). Przyjmując, że strumienie są proporcjonalne do prądów i uwzględniając ich przesunięcia w przestrzeni, otrzymamy dodając ich wektory zgodnie z rys. 4.:

$$\phi = \phi_m + \frac{\phi_m}{2} \cos 60^\circ + \frac{\phi_m}{2} \cos 60^\circ = \frac{3}{2} \phi_m$$

A zatem strumień wypadkowy  $\phi$  jest równy 1,5 krotnej wartości strumienia maksymalnego, wytwarzanego przez jedna cewkę stojana.



Rys.5. Linie sił wypadkowego strumienia magnetycznego  $\phi$  dla chwili a)  $t=0$ , b)  $t=T/6$ , c)  $t=T/3$

Na rysunku 5a przedstawiono przepływ prądów dla chwili  $t=0$  na wykresie przebiegów prądu w trzech fazach uzwojenia stojana (rys.3.). Płynące w uzwojeniu prądy wytwarzają pole magnetyczne o liniach sił pokazanych na rysunku. Pole to można przedstawić za pomocą wektora strumienia  $\phi$  skierowanego pionowo w dół dla chwili czasu  $t=0$ . Dla czasu  $t=T/6$  wektor strumienia magnetycznego obrócił się o  $60^\circ$ , tj o 1/6 pełnego obrotu (rys. 5b), zaś dla czasu  $t=T/3$  wektor  $\phi$  przekręca się o  $120^\circ$ , czyli o 1/3 pełnego obrotu (rys. 5c). W ten sposób w maszynie o jednej parze biegunów w ciągu jednego okresu  $T$  pole magnetyczne wykonuje obrót o kąt  $2\pi$ , a zatem ilość obrotów na sekundę jest liczbowo równa częstotliwości prądu, a prędkość kątowna wirowania pola – pulsacji prądu  $\omega=2\pi f$ . Prędkość tę nazywamy prędkością synchroniczną pola wirującego.

Prąd trójfazowy o częstotliwości  $f_1$  płynący w trójfazowym uzwojeniu stojana o parach biegunów wytwarza pole magnetyczne wirujące względem stojana z prędkością synchroniczną  $n_1$ :

$$n_1 = \frac{60 f_1}{p} \quad (1)$$

Pole wirujące przecina uzwojenie stojana z częstotliwością  $f_1$  i indukuje w nim przeciwnie skierowaną do przyłożonego napięcia siłę elektromotoryczną  $E_1$  określonej wzorem:

$$E_1 = 4,44 f_1 z_1 k_{q1} \phi, \quad (2)$$

gdzie:

- $z_1$  – liczba zwojów jednej fazy stojana,
- $k_{q1}$  – współczynnik uzwojenia stojana,
- $\phi$  – strumień magnetyczny.

Siła elektromotoryczna  $E_1$  różni się od napięcia zasilającego o wielkość spadku napięcia na impedancji uzwojenia stojana.

Jednocześnie w przecinanym przez strumień wirującego pola magnetycznego zwojeniu nieruchomego wirnika, indukuje się siła elektromotoryczna  $E_2$  określona wzorem:

$$E_2 = 4,44 f_1 z_2 k_{q2} \phi, \quad (3)$$

gdzie:

$z_2$  – liczba zwojów jednej fazy wirnika,  
 $k_{q2}$  – współczynnik uzwojenia wirnika.

W zamkniętym uzwojeniu wirnika pod wpływem *sem*  $E_2$  popłynie prąd.

Na skutek wzajemnego oddziaływania wirującego strumienia magnetycznego stojana i prądu wirnika powstaje siła działająca na poszczególne pręty uzwojenia wirnika starająca się przesunąć to uzwojenie (wirnik) w kierunku ruchu pola wirującego. W tych warunkach powstaje moment obrotowy. Wirnik rusza i obraca się z prędkością  $n < n_1$ , ponieważ indukowanie się siły elektromotorycznej w wirniku możliwe jest tylko przy występowaniu prędkości względnej uzwojenia wirnika względem pola wirującego.

Częstotliwość  $f_2$  z jaką pole wirujące przecina uzwojenie obracającego się wirnika wyrazi się wzorem:

$$f_2 = \frac{p \cdot (n_1 - n)}{60} = \frac{p \cdot n_1}{60} \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (4)$$

gdzie:

$(n_1 - n)$  – prędkość obrotowa względem wirnika.  
 Wyrażenie  $(n_1 - n)/n_1$  nazywa się poślizgiem  $s$

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (5)$$

lub

$$s\% = \frac{n_1 - n}{n_1} 100 \quad (6)$$

Po przekształceniu wzoru (5) można otrzymać wzór na prędkość obrotową wirnika:

$$n = (1 - s) \cdot n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} (1 - s) \quad (7)$$

Ze wzoru (4) wynika, że

$$f_2 = f_1 \cdot s \quad (8)$$

stąd

$$s = \frac{f_2}{f_1} \quad (9)$$

Siła elektromotoryczna  $E_{2s}$  indukowana w uzwojeniu wirującego wirnika wyraża się wówczas wzorem:

$$E_{2s} = 4,44 \cdot f_2 \cdot z_2 \cdot k_{q2} \cdot \phi \quad (10)$$

lub

$$E_{2s} = 4,44 \cdot s \cdot f_1 \cdot z_2 \cdot k_{q2} \cdot \phi$$

stąd

$$E_{2s} = s \cdot E_2 \quad (11)$$

Pod wpływem siły elektromotorycznej  $E_{2s}$  w wirniku płynie prąd o częstotliwości  $f_2$ . Prąd ten wytworzy pole magnetyczne wirujące z prędkością obrotową synchroniczną  $n_2$  względem obracającego się wirnika silnika:

$$n_2 = \frac{60 \cdot f_2}{p} = \frac{60 \cdot f_1 \cdot s}{p} = n_1 \cdot s = n_1 - n \quad (12)$$

Ostatecznie pole magnetyczne wirnika wiruje względem wirującego pola magnetycznego stojana z prędkością równą sumie  $n_2 + n$ .

Ze wzoru (12) wynika

$$n_2 + n = n_1 \quad (13)$$

Znaczy to, że niezależnie od prędkości obrotowej silnika pole magnetyczne wiruje w przestrzeni z taką samą prędkością jak wirujące pole magnetyczne stojana. W rezultacie obydwa te pola tworzą wypadkowe pole magnetyczne wirujące w przestrzeni z prędkością obrotową  $n_1$ , podczas gdy wirnik obraca się z prędkością  $n$ .

### 3. Moment obrotowy silnika indukcyjnego i jego charakterystyki w różnych warunkach pracy

Moc czynna  $P$  przeniesiona za pomocą pola wirującego z obwodu stojana do obwodu elektrycznego wirnika wyraża się wzorem:

$$P = 3 \cdot E_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad (14)$$

gdzie:

$E_2$  –  $Sem$  indukowana w jednej fazie uzwojenia nieruchomego wirnika,

$I_2$  – prąd płynący w wirniku,

$\varphi_2$  – kąt przesunięcia fazowego między  $I_2$  i  $E_2$

Moc  $P$  można wyrazić znanym z mechaniki wzorem:

$$P = M \cdot \omega_1 = M \frac{2\pi \cdot n_1}{60} \quad (15)$$

gdzie:

$M$  – moment obrotowy jaki wywiera na wirnik wirujące pole magnetyczne,

$\omega_1$  – prędkość kątowna pola wirującego,

$n_1$  – prędkość obrotowa synchronicznego pola wirującego.

Ze wzoru (15) moment obrotowy  $M$ :

$$M = \frac{P}{\omega_1} = \frac{3E_2 I_2 \cos \varphi_2}{\omega_1} = \frac{3E_2 I_2 \cos \varphi_2}{\frac{2\pi \cdot f_1}{p}} \quad (16)$$

Ostatecznie

$$M = c \cdot E_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (17)$$

gdzie:

$c$  – stała konstrukcyjna.



Ze wzoru (17) wynika, moment obrotowy, z jakim pole wirujące oddziałuje na wirnik silnika asynchronicznego, zależy od wartości siły elektromotorycznej  $E_2$  indukowanej w obwodzie wirnika, od wartości prądu  $I_2$ , jaki popłynie w uzwojeniu wirnika pod wpływem tej siły elektromotorycznej oraz od współczynnika mocy  $\cos \psi_2$  obwodu wirnika.

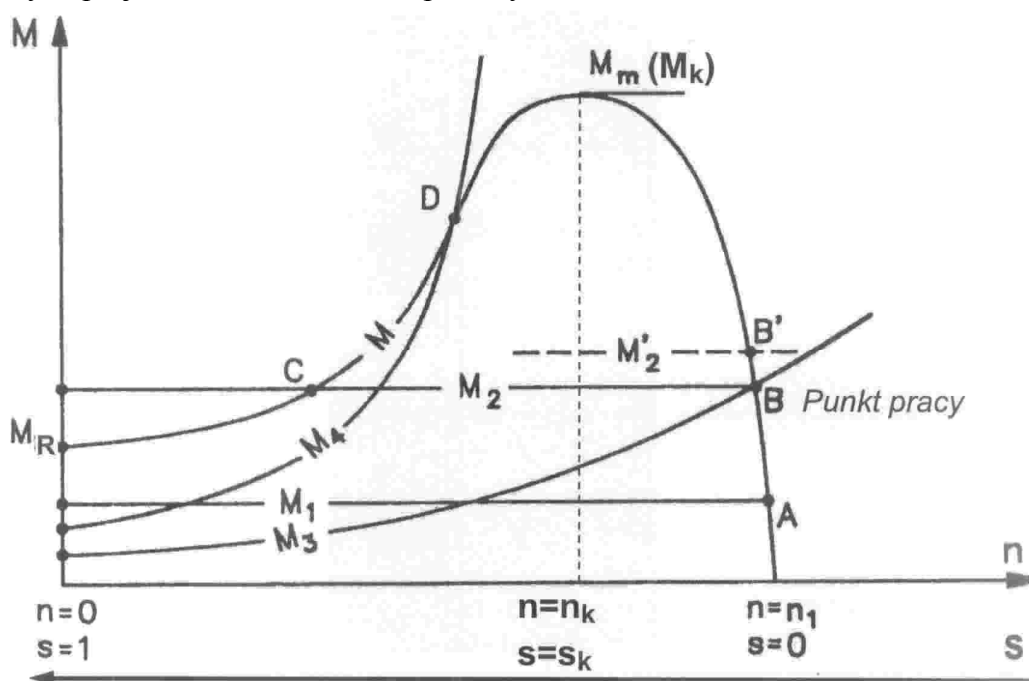
Przeprowadzając odpowiednią analizę można wyznaczyć stosunek momentu obrotowego silnika przy danym obciążeniu (poślizgu  $s$ ) do jego momentu krytycznego:

$$\frac{M}{M_k} = \frac{2}{\frac{s_k + s}{s} + \frac{s}{s_k}} \quad (26)$$

gdzie:

$M_k$  i  $s_k$  - moment i poślizg krytyczny

Jest to tzw. Wzór Kloss'a określający w przybliżeniu przebieg charakterystyki  $M = f(s)$ , przydatny w projektowaniu układów napędowych.



Rys. 6. Naturalna charakterystyka mechaniczna silnika asynchronicznego

Na rys. 6 podano przebieg charakterystyki mechanicznej  $M = f(n,s)$  silnika klatkowego zasilanego napięciem  $U = const$ .

Jeżeli moment obciążenia silnika  $M_l$  w chwili włączenia go do sieci jest mniejszy od początkowego momentu rozruchowego  $M_R$ , to wirnik zaczyna się obracać w kierunku wirowania pola magnetycznego.

Gdy obciążenie jest stałe w całym zakresie prędkości, to prędkość wzrasta, aż do wartości, przy której moment obciążenia równy jest momentowi silnika, czyli do punktu przecięcia się charakterystyki mechanicznej silnika i charakterystyki obciążenia momentem  $M_l$  (punkt A). Wzrost prędkości następuje w okresie rozruchu silnika, zgodnie z ogólnym równaniem dynamiki:

$$M - M_l = J \frac{d\omega}{dt}$$

Jeżeli silnik pracuje w punkcie  $A$ , a moment obciążenia wzrośnie do wartości  $M_2$ , to prędkość nieco się zmniejszy, poślizg wzrośnie i nowy stan pracy ustali się w punkcie  $B$ , gdzie przecina się charakterystyka obciążenia z charakterystyką mechaniczną silnika. Jednak rozruch silnika przy stałym momencie  $M_2$  nie jest możliwy gdyż przy prędkości równej zero  $M_R < M_2$ ; silnik tak obciążony nie dokona rozruchu, lecz pozostanie w stanie zwarcia. Gdyby jednak silnik był obciążony np. momentem  $M_3$ , to dokonałby rozruchu, a jego prędkość ustaliłaby się w punkcie  $B$ . Warunkiem rozruchu jest, więc aby w każdym zakresie prędkości od zera do wartości ustalonej, określonej wartością momentu obciążenia, moment silnika był większy od momentu obciążenia.

Przy obciążeniu silnika momentem  $M_2$  prosta  $M_2$  ma z krzywą momentu silnika dwa punkty wspólne:  $B$  i  $C$  (rys. 6). Punkt  $B$  jest punktem pracy stabilnej, gdyż w razie, jakiegokolwiek chwilowej zmiany charakterystyki silnika lub obciążenia układ ponownie wróci do pracy w punkcie  $B$ , jeżeli zniknie przyczyna zmiany charakterystyki. Jeżeli np. moment obciążenia chwilowo wzrośnie do wartości  $M'_2$ , to wirnik zostanie przyhamowany, moment silnika wzrośnie i nowy stan pracy ustali się w punkcie  $B'$ . Jeżeli moment obciążenia z powrotem zmniejszy się do wartości  $M_2$ , to prędkość wzrośnie, moment silnika zmniejszy się i układ powróci do pracy w punkcie  $B$ . Tak się zachowa układ przy dowolnym stałym obciążeniu w całym zakresie charakterystyki silnika od  $s=0$  do  $s=s_k$ , tę część charakterystyki nazywa się **częścią stabilną**

Inaczej zachowuje się silnik pracujący w punkcie  $C$ . Jeżeli obciążenie wzrosło to silnik zmniejszy prędkość. Ale przy mniejszej prędkości moment silnika jeszcze się zmniejsza, a zatem gdy obciążenie powróci do poprzedniej wartości, to silnik się zatrzyma. Zakres prędkości charakterystyki od  $s=1$  do  $s=s_k$  jest zakresem **pracy niestabilnej** silnika (dla stałych obciążeń).

#### 4. Rozruch silników indukcyjnych

Rozruch silnika jest procesem przejścia od stanu postoju do stanu jego ustalonej pracy w określonych warunkach zasilania i obciążenia. Rozruch winien być tak przeprowadzony, aby moment rozruchowy był dostatecznie duży (z uwagi na obciążenie), a prąd rozruchowy nie przekroczył dopuszczalnej wielkości (ze względu na wymagania sieci). Duży prąd rozruchowy może się okazać groźny również dla silnika, mimo że czas trwania rozruchu nie przekracza na ogół kilkudziesięciu sekund. Dotyczy to głównie silników dużych oraz silników często uruchamianych. Głównymi parametrami określającymi warunki rozruchowe silnika są:

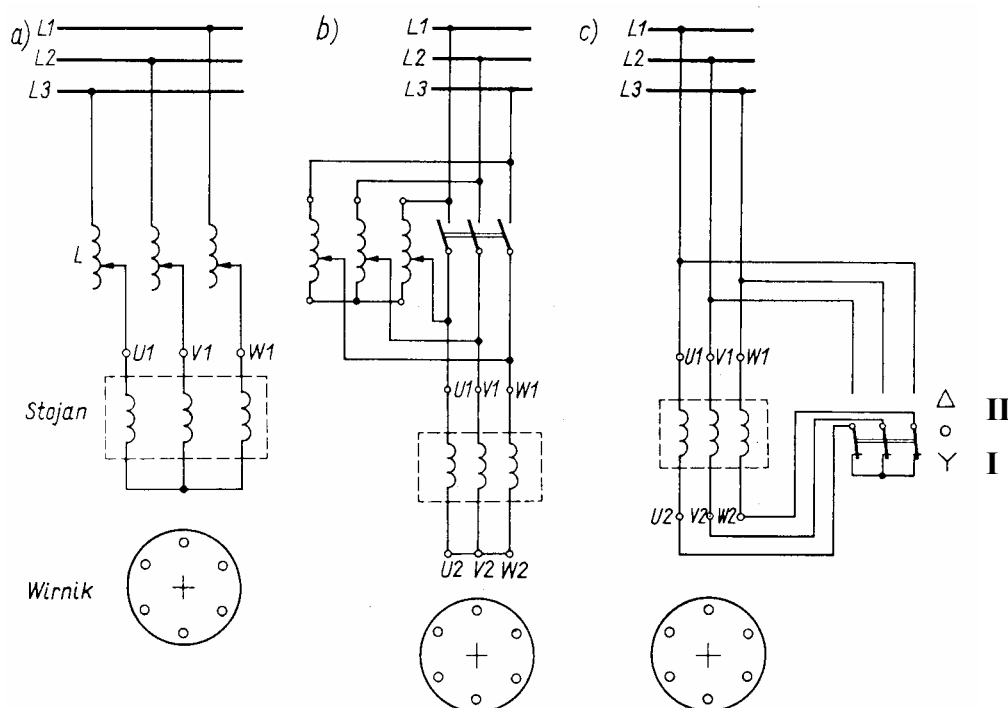
- a) moment rozruchowy  $M_r$ ,
- b) prąd rozruchu  $I_r$ ,
- c) czas trwania rozruchu  $t_r$ .

##### 4.1. Rozruch bezpośredni silnika klatkowego

Ten sposób rozruchu polega na bezpośrednim włączaniu silnika do sieci zasilającej. W tym przypadku silnik klatkowy pobiera z sieci prąd rozruchowy znacznie większy od znamionowego ( $I_r/I_n = 4\div 8$ ). Duży prąd rozruchowy pobierany w czasie rozruchu silnika klatkowego powoduje powstanie dużych spadków napięć w sieci zasilającej, co ma szkodliwy wpływ na pracę innych odbiorników włączonych do tej samej sieci.

#### 4.2. Rozruch silnika klatkowego przy zastosowaniu przełącznika gwiazda trójkąt

Silniki asynchroniczne klatkowe większych mocy uruchamia się przy obniżonym napięciu stosując w tym celu specjalne układy np. przełącznik gwiazda trójkąt (Y/ $\Delta$ ) – rys.7c.



Rys 7. Rozruch silnika klatkowego a) przy użyciu dławików (reaktancji), b) przy użyciu autotransformatora, c) przy użyciu przełącznika gwiazda-trójkąt

Zasadę działania przełącznika (Y/ $\Delta$ ) przedstawiono na rys. 7c. W pierwszym etapie rozruchu (położenie I) uzwojenie stojana jest połączone w gwiazdę, a napięcie  $U_f$  na każdej fazie uzwojenia stojana jest  $\sqrt{3}$  razy mniejsze od przewodowego napięcia  $U$  sieci zasilającej.

W drugim etapie rozruchu uzwojenie stojana połączone w trójkąt (położenie II), a napięcie  $U_{f\Delta}$  na każdej fazie uzwojenia stojana jest równe napięciu przewodowemu sieci zasilającej.  $U_{f\Delta} = U$ .

Ustalona praca silnika odbywa się przy połączeniu uzwojeń stojana w trójkąt. Stąd też przełącznikiem gwiazda-trójkąt może być uruchamiany jedynie silnik przystosowany do pracy w trójkąt. Znaczący to, że napięcie znamionowe każdej fazy uzwojenia musi być równe napięciu przewodowemu sieci zasilającej.

Wprowadzono oznaczenia:

$I_{rpY}$  - prąd rozruchowy (przewodowy) pobierany przez silnik połączony w gwiazdę,

$I_{rp\Delta}$  - prąd rozruchowy (przewodowy) pobierany przez silnik połączony w trójkąt,

$U_{pY}$  - napięcie przewodowe zasilające silnik połączony w gwiazdę,

$U_{p\Delta}$  - napięcie przewodowe zasilające silnik połączony w trójkąt,

$U_{fY}$  - napięcie fazowe silnika połączonego w gwiazdę,

$U_{f\Delta}$  - napięcie fazowe silnika połączonego w trójkąt,

$M_{rY}$  - moment rozruchowy silnika połączonego w gwiazdę,

$M_{r\Delta}$  - moment rozruchowy silnika połączonego w trójkąt.

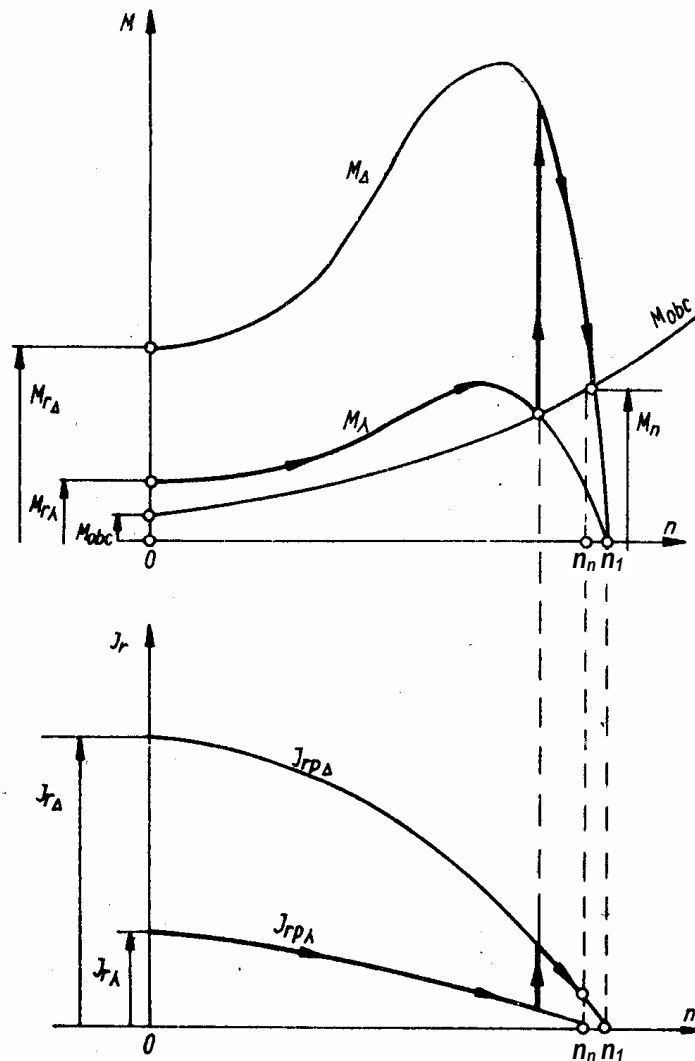
Wówczas, stosunek:

$$\frac{I_{rpY}}{I_{rp\Delta}} = \frac{U_{pY}}{\sqrt{3}Z} : \frac{\sqrt{3}U_{p\Delta}}{Z} = \frac{1}{3} \quad (27)$$

oraz

$$\frac{M_{rY}}{M_{r\Delta}} = \left( \frac{U_{fY}}{U_{f\Delta}} \right)^2 = \left( \frac{U_{pY}}{\sqrt{3}U_{p\Delta}} \right)^2 = \frac{1}{3} \quad (28)$$

Prąd rozruchowy oraz moment rozruchowy są 3 razy mniejsze przy połączeniu w gwiazdę niż przy połączeniu w trójkąt. Dlatego też przełącznikiem gwiazda-trójkąt można jedynie uruchamiać silniki klatkowe nieobciążone lub obciążone częściowo momentem nieprzekraczającym 30% momentu znamionowego. Wykresy momentów i prądów przy właściwym operowaniu przełącznikiem Y/Δ podane są na rys.8.



Rys.8. Przebieg momentu oraz prądów przy rozruchu silnika klatkowego z przełącznikiem gwiazda-trójkąt

Właściwe operowanie przełącznikiem Y/Δ polega na przełączeniu uzwojenia stojana z gwiazdy w trójkąt w odpowiednim momencie tj. w chwili, gdy silnik osiągnie obroty bliskie obrotom znamionowym. Jeżeli silnik uruchamiany np. pod obciążeniem przy połączeniu

uzwojeń we gwiazdę, nie zdoła osiągnąć dostatecznie dużej prędkości obrotowej, to przy przełączeniu na trójkąt wystąpi gwałtowne uderzenie pobieranego prądu. W pewnych przypadkach prąd ten może osiągnąć nawet wartość bliską wartości prądu rozruchowego przy rozruchu bezpośrednim. Podobne zjawisko nastąpi przy uruchamianiu silnika z niewielkim obciążeniem lub w stanie biegu jałowego, ale przy zbyt wczesnym przełączeniu uzwojenia z gwiazdy w trójkąt. Przełączniki Y/Δ do małych mocy są typu ręcznego, lub automatyczne z zastosowaniem styczników i przekaźnika czasowego.

Uruchomienie silnika klatkowego z zastosowaniem rezystancji lub reaktancji indukcyjnej (rys 7a) polega na szeregowym ich włączeniu do obwodu każdej fazy stojana na czas trwania rozruchu.

Zastosowanie zaś autotransformatora (rys. 7b) powoduje, że w pierwszej fazie rozruchu uzwojenie stojana jest zasilane napięciem wtórnym autotransformatora, a więc obniżonym. Po uzyskaniu prędkości obrotowej silnika znamionowej uzwojenie stojana przełącza się na pełne napięcie sieci zasilającej

#### 4.3. Sposoby rozruchu silników budowy pierścieniowej

Aby silnik indukcyjny mógł ruszyć jego moment rozruchowy musi być większy od momentu hamującego. W tym przypadku silnik zwiększa swoją prędkość obrotową aż do chwili, gdy nastąpi równowaga między momentem obrotowym i hamującym. Stosunek momentu rozruchowego określony jest jako krotność momentu rozruchowego i oznacza się

jako: 
$$\lambda_r = \frac{M_R}{M_n} \quad (29)$$

Krotność  $\lambda_r$  dla silników indukcyjnych jest zawarta w granicach 0.35 do 2.1.

Ważny jest również prąd rozruchu, który znacznie przewyższa wartość prądu znamionowego, przy czym krotność prądu rozruchu oznacza się jako

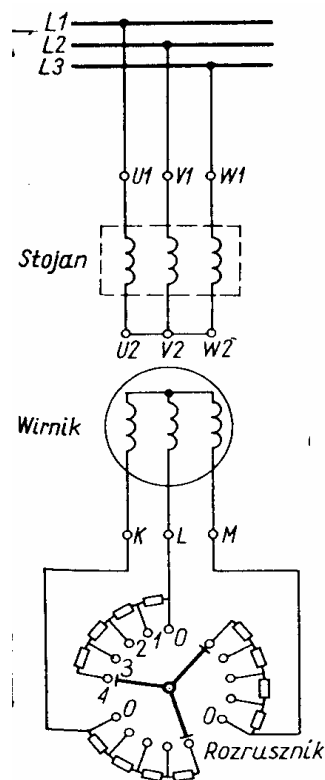
$$\lambda_i = \frac{I_r}{I_n} \quad (30)$$

gdzie  $I_r$  – prąd rozruchu,  $I_n$  – prąd znamionowy

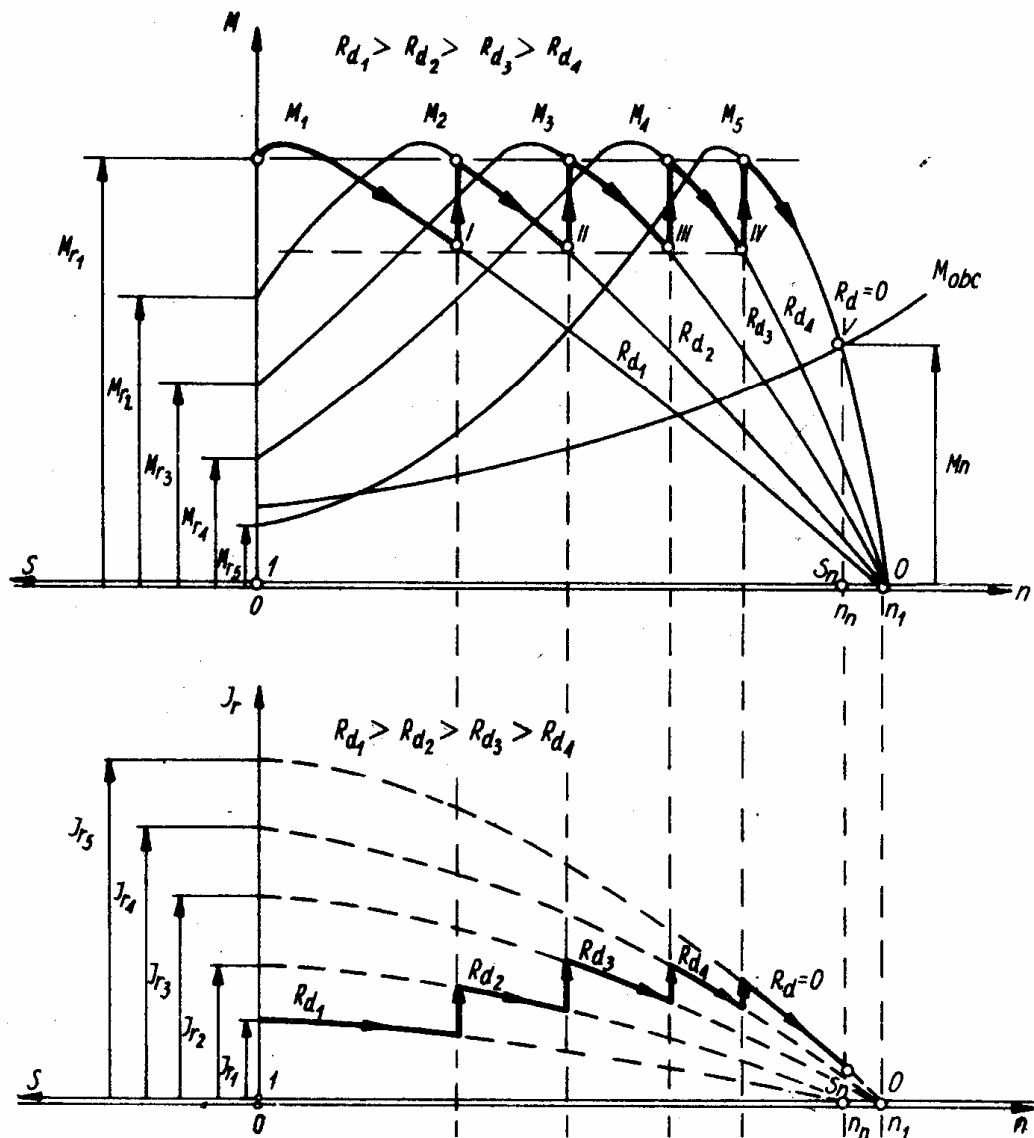
Krotność  $\lambda_i$  dla silników indukcyjnych jest zawarta w granicach od 4 do 8. Duża wartość prądu rozruchu powoduje wystąpienie w sieci dużego spadku napięcia, co może spowodować niedopuszczalne chwilowe obniżenie napięcia sieci.

Rozruch silnika pierścieniowego dokonuje się przy włączonych w obwód rezystorach rozruchowych. (rys.9.).

Rezystor rozruchowy  $R_r$  ma zwykle kilka stopni, umożliwiających w miarę wzrostu prędkości obrotowej wirnika przechodzenie na coraz inną charakterystykę  $M=f(s)$  odpowiadającą coraz innej wartości rezystancji  $R_r$ . Te charakterystyki pokazano na rys.11. Przy rozruchu liczba stopni rozruchowych zwykle nie przekracza 4. Ten sposób jest stosowany przy tzw. rozruchu ciężkim, tzn. w przypadku, gdy silnik indukcyjny jest od razu obciążony dużym momentem hamującym. Wartość prądu rozruchowego nie zależy od wartości momentu hamującego, natomiast zależy od wartości rezystancji całkowitej.



Rys. 9. Układ połączeń do rozruchu silnika pierścieniowego



Rys. 10. Przebieg rozruchu silnika pierścieniowego.

## 5. Regulacja prędkości obrotowej silników indukcyjnych

Regulacja obrotów silnika polega na wymuszonej zmianie jego prędkości obrotowej, niezależnie od naturalnej zmiany tej prędkości w funkcji momentu obciążenia.

Wymagania jakie się stawia silnikowi elektrycznemu przy regulacji prędkości obrotowej dotyczą:

- zakresu regulacji,
- ciągłości regulacji,
- ekonomiki regulacji.

### 5.1. Regulacja prędkości obrotowej silnika klatkowego

Z równań:

$$n = \frac{60f_1}{p}(1-s) \quad (31)$$

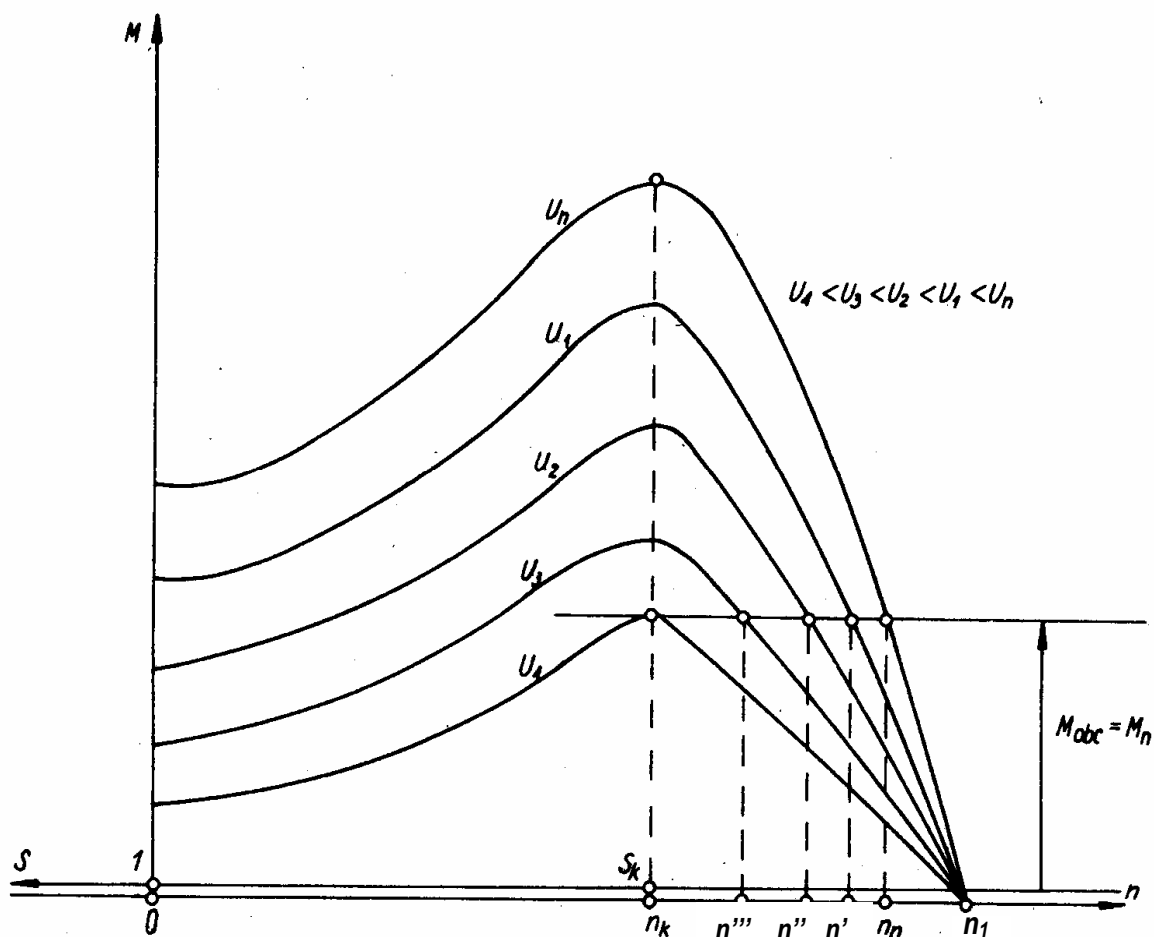
$$M = k U^2 \quad (32)$$

wynika, że regulację prędkości obrotowej silnika asynchronicznego klatkowego można uzyskać przez zmianę:

- liczby par biegunów  $p$ ,
- napięcia zasilania  $U$
- częstotliwości  $f_1$  napięcia zasilającego.

Ad. a) Zmiana liczby par biegunów:

- pozwala na skokową regulację prędkości obrotowej z maksymalną liczbą stopni swobody stosowaną w praktyce, nie przekraczającą czterech;
- daje regulację prędkości obrotowej bez start;
- wykorzystana jest w silnikach klatkowych wielobiegunowych.

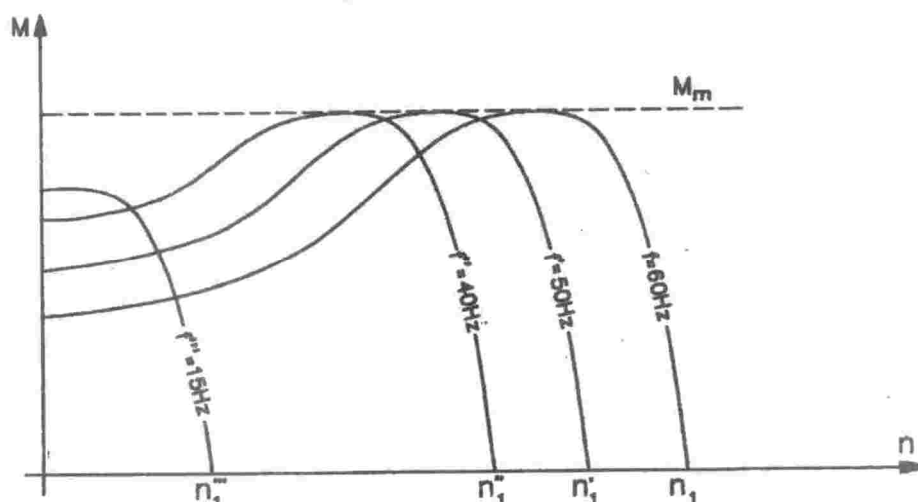


Rys. 11. Charakterystyki związane z regulacją prędkości obrotowej silnika obciążonego stałym momentem, przez zmianę napięcia zasilającego.

Ad. b) Zmiana napięcia zasilania stojana

Zmiana napięcia zasilania stojana powoduje zmianę charakterystyki momentu silnika. Z rys. 12 wynika, że zmiana napięcia „w dół” od napięcia znamionowego zasilania pozwala na regulację prędkości w wąskim zakresie tj. od  $n=n_n$  do  $n=n_k$  silnika obciążonego. Ponadto przy obniżonym napięciu zasilania silnikowi grozi utknięcie na skutek zmniejszenia się jego przeciążalności  $\lambda$ . Napięcie zasilania niższe od znamionowego przy obciążeniu silnika równym obciążeniu znamionowym ( $M_{obc}=M_n=const$ ), a więc przy stałej mocy użytecznej powoduje wzrost prądów w obwodzie wirnika oraz obwodzie stojana. Tym samym następuje wtedy wzrost strat mocy w uzwojeniach, silnik zaczyna się nagrzewać, a izolacja jego uzwojeń po pewnym czasie ulega uszkodzeniu. Z tych względów niedopuszczalna jest praca ciągła przy obciążeniu znamionowym silnika zasilanego napięciem mniejszym od znamionowego. Wymienione wady zdecydowały, że sposób regulacji prędkości obrotowej silnika asynchronicznego polegający na zamianie wartości napięcia zasilającego nie jest stosowany.

Ad. c) Zmiana częstotliwości napięcia zasilającego:



Rys. 12. Regulacja prędkości obrotowej wału silnika przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego

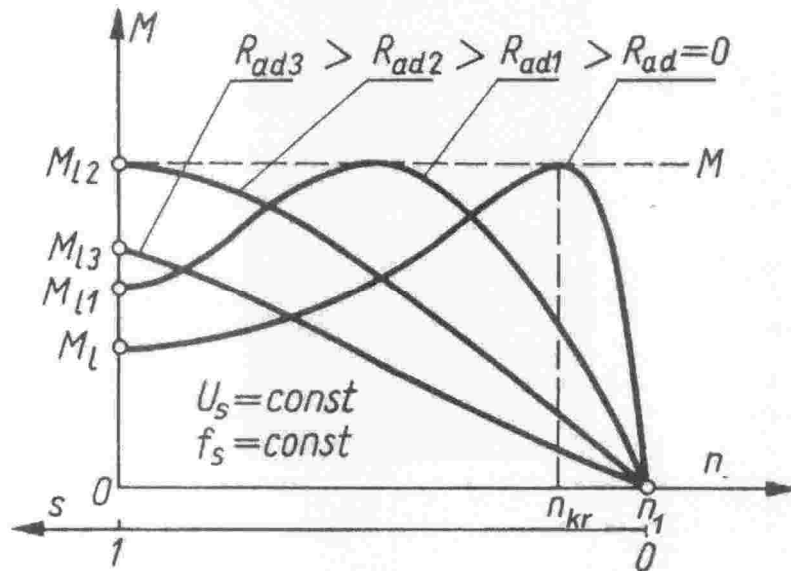
- przeprowadzona w sposób ciągły zapewnia płynną regulację prędkości obrotowej,
- pozwala na regulację prędkości obrotowej w szerokim zakresie  $>$  niż 1:20 („w górę” i „w dół” od znamionowej prędkości obrotowej),
- znajduje zastosowanie w silnikach szybko-obrotowych, stosowanych w obrabiarkach do drewna, szlifierkach, polerkach itp.,
- wymaga stosowania złożonych układów elektronicznych zwanych przetwornicami częstotliwości.

### 5.2. Regulacja prędkości obrotowej silników indukcyjnych budowy pierścieniowej

Zmianę prędkości obrotowej można uzyskać przez zmianę częstotliwości napięcia zasilania  $f_1$ , przez zmianę liczny par biegunów uzwojenia i przez zmianę poślizgu  $s$  wzór (1). Zmianę poślizgu można uzyskać przez zmianę wartości rezystancji w obwodzie uzwojenia wirnika. oraz przez zmianę wartości napięcia doprowadzanego do uzwojenia stojana. Regulacja prędkości obrotowej przez zmianę częstotliwości wymaga oddzielnego źródła zasilania i dlatego jest opłacalna jedynie dla silników wymagających ciągłej regulacji w szerokich granicach. Regulacja prędkości obrotowej przez zmianę liczby par biegunów



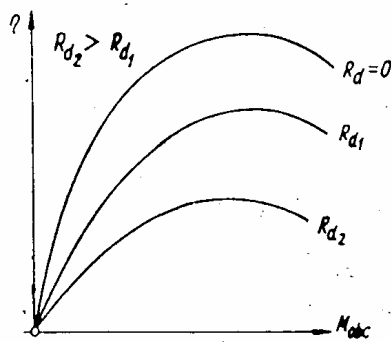
uzwojenia stojana wynika ze zmiany prędkości pola wirującego, a więc i prędkości silnika wg. zależności zgodnej ze wzorem (31). Uzwojenie stojana wykonuje się tak, aby można było przełączać, przez co powstają pola o różnych liczbach par biegunów. Pozwala to na stopniową zmianę prędkości (od dwóch do czterech). Na przykład silnik mający przełącznik na dwie prędkości nazywa się dwubiegunowym. Przy regulacji prędkości obrotowej za pomocą zmiany rezystancji w obwodzie wirnika (rys.13), użyte rezystancje muszą być przystosowane do pracy ciągłej (muszą mieć większe przekroje niż oporniki użyte do rozruchu).



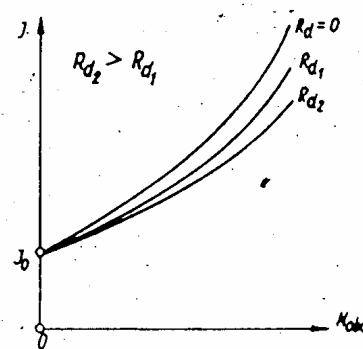
Rys.13. Charakterystyki mechaniczne silnika pierścieniowego przy różny rezystancjach w obwodzie wirnika

Na rys.13 przedstawiono charakterystyki mechaniczne silnika pierścieniowego przy różnych rezystancjach włączonych w obwód wirnika.

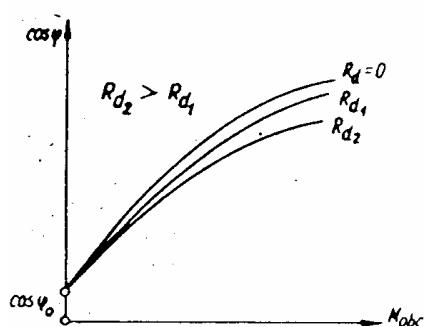
Charakterystyki sprawności  $\eta=f(M_{obc})$ , prądu pobieranego z sieci  $I=f(M_{obc})$ ,  $\cos\varphi=f(M_{obc})$ , poślizgu  $s=f(M_{obc})$ , mocy pobieranej z sieci  $P_1=f(M_{obc})$ , oraz mocy użytecznej  $P_{uz}=f(M_{obc})$  przedstawiono na rysunkach 14-19.



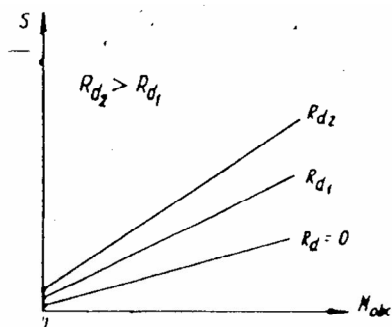
Rys 14. Charakterystyki sprawności silnika indukcyjnego pierścieniowego w funkcji obciążenia,



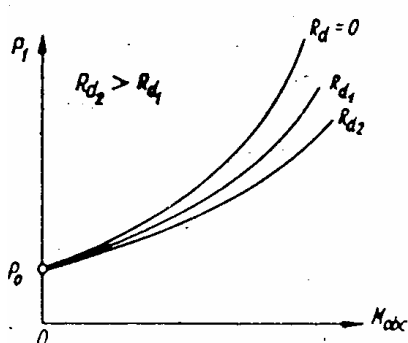
Rys.15. Charakterystyki prądu pobieranego z sieci przez silnik pierścieniowy w funkcji obciążenia



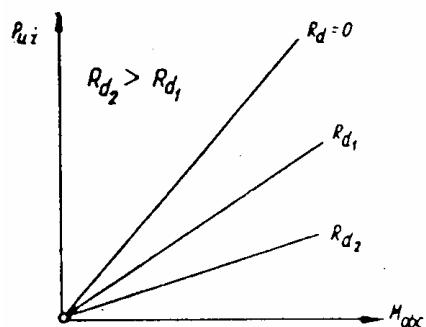
Rys. 16. Charakterystyki współczynnika mocy silnika pierścieniowego w funkcji obciążenia



Rys. 17. Charakterystyki poślizgu silnika pierścieniowego w funkcji obciążenia



Rys. 18. Charakterystyki mocy pobieranej z sieci przez silnik pierścieniowy w funkcji obciążenia



Rys. 19. Charakterystyki mocy użytecznej silnika pierścieniowego w funkcji obciążenia

### Literatura:

1. Praca zbiorowa pod redakcją Władysława Wasiluka, Maszyny i urządzenia elektryczne, Warszawa 1976, WPW,
2. Franciszek Przeździecki, Elektrotechnika i Elektronika, Warszawa 1977, PWN,
3. Praca zbiorowa, Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków, Warszawa 1999, WTN.

Opracował: dr inż. Andrzej Rostkowski