

**Zespół Dydaktyczno-Naukowy Napędów i Sterowania
Instytut Maszyn Roboczych Ciężkich**

Laboratorium Elektrotechniki i Elektroniki

Ćwiczenie M2

**BADANIE MASZYN INDUKCYJNYCH:
Silnika klatkowego i silnika pierścieniowego**

Data wykonania ćwiczenia.....

Data oddania sprawozdania.....

Data i ocena z zaliczenia sprawozdania

Zespół wykonujący ćwiczenie:

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

Wydział SiMR PW

Rok ak. 200../200..

Semestr.....

Grupa.....

Warszawa 2003r.

SPIS TREŚCI

1. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

1.1. Budowa silników indukcyjnych	3
1.2. Zasada działania trójfazowego silnika indukcyjnego	4
1.3. Moment obrotowy silnika indukcyjnego i jego charakterystyki w różnych warunkach pracy	8
1.4. Rozruch silników indukcyjnych	10
1.4.1. Rozruch bezpośredni silnika klatkowego	11
1.4.2. Rozruch silnika klatkowego przy zastosowaniu przełącznika gwiazda trójkąt	11
1.4.3. Sposoby rozruchu silników budowy pierścieniowej	13
1.5. Regulacja prędkości obrotowej silników indukcyjnych	14
1.5.1. Regulacja prędkości obrotowej silnika klatkowego	14
1.5.2. Regulacja prędkości obrotowej silników indukcyjnych budowy pierścieniowej	16

2. POMIARY

2.1. Wyznaczanie charakterystyk obciążenia silnika klatkowego	18
2.2. Wyznaczanie charakterystyk obciążenia silnika pierścieniowego	20

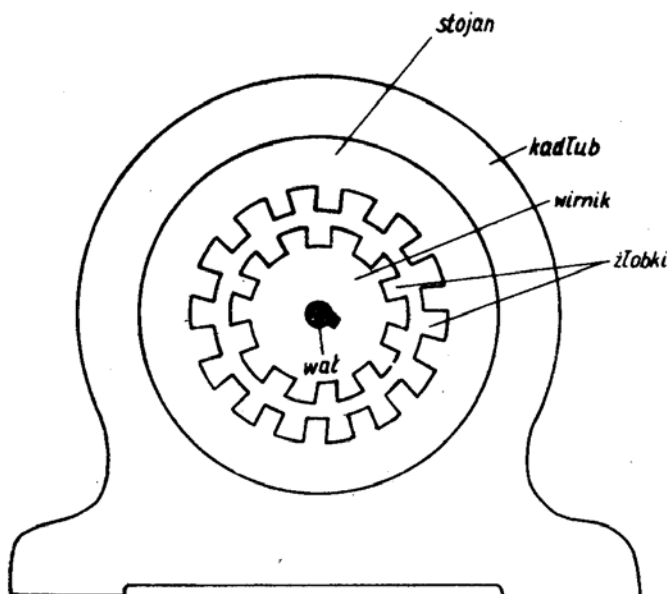
CEL ĆWICZENIA

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

2. WIADOMOŚCI TEORETYCZNE

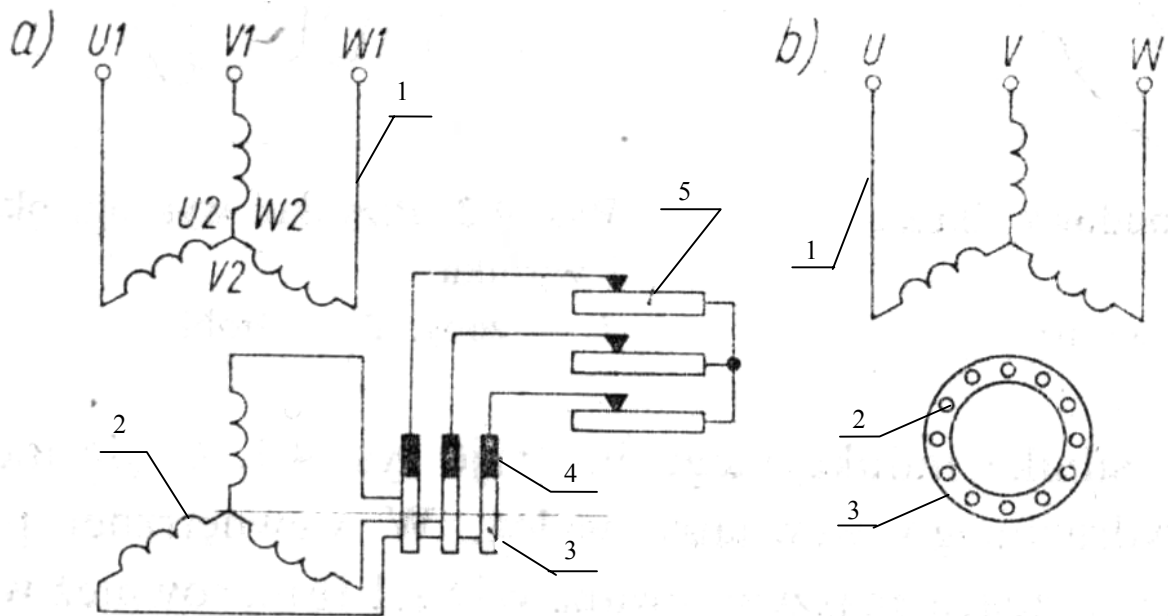
2.1. Budowa silników indukcyjnych

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) silnika pierścieniowego: 1 – uzwojenie stojana, 2 – uzwojenie wirnika
 3- pierścienie ślizgowe, 4 – szczotki, 5 – rezystancje przyłączone do obwodu wirnika
 b) silnika klatkowego: 1- uzwojenie stojana, 2 – pręty uzwojenia wirnika, 3 – pierścień
 zwierający pręty uzwojenia

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.2b poz.2 i 3).

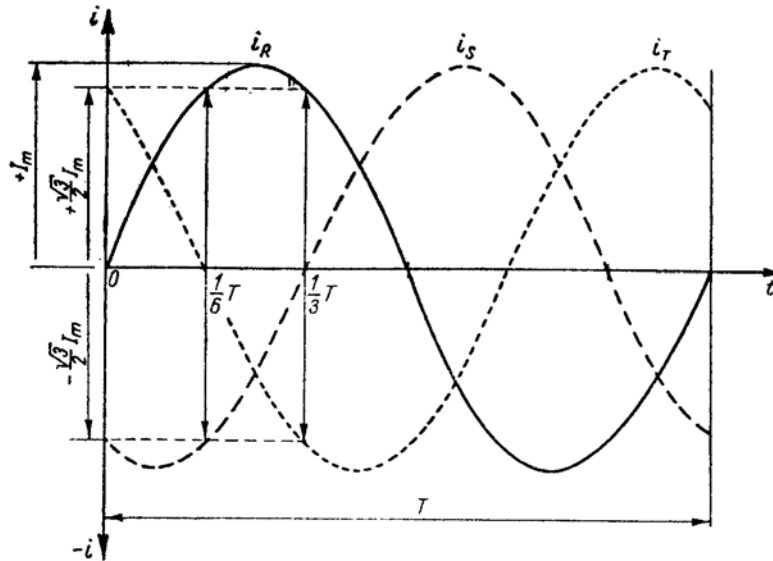
1.2. Zasada działania trójfazowego silnika indukcyjnego

Po przyłączeniu do sieci, w trzech nieruchomych cewkach (fazach) stojana, przesuniętych o 120° , 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

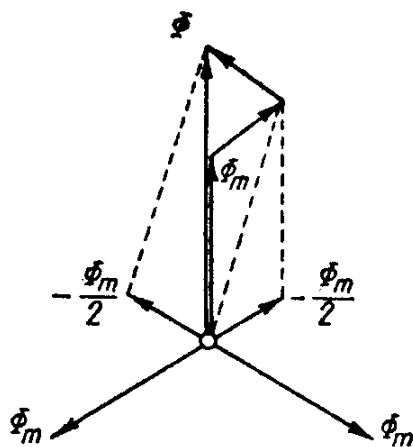
Przebiegi tych prądów w czasie przedstawiono graficznie na rys 3. Prądy te wytwarzają strumienie magnetyczne ϕ_R , ϕ_S , ϕ_T , których kierunki są zgodne z osiami cewek. Pomijając nieliniowość spowodowaną nasyceniem można przyjąć, że zmieniają się one w czasie sinusoidalnie wraz z prądami fazowymi i_R , 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: ϕ_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° . Dają one w każdej chwili strumień wypadkowy ϕ . Równy sumie geometrycznej strumieni składowych, czyli:

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

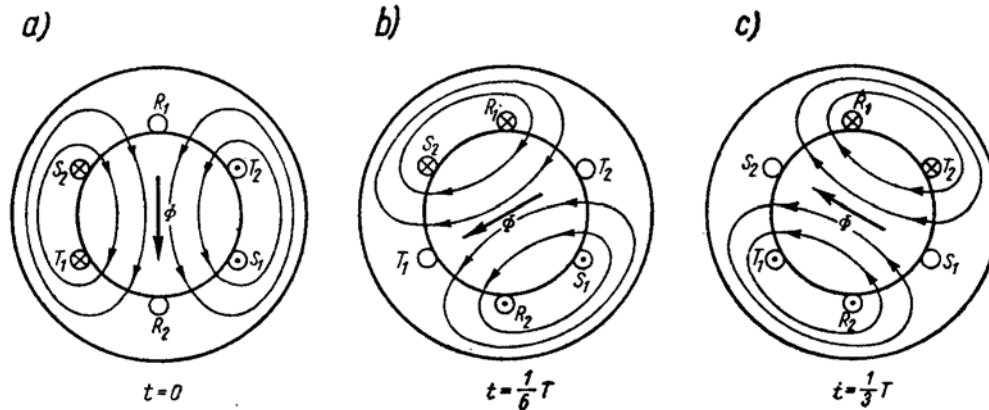


Rys. 4. Sumowanie wektorów strumieni składowych

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 ϕ jest równy 1,5 krotnej wartości strumienia maksymalnego, wytwarzanego przez jedna cewkę stojana.



Rys.5. Linie sił wypadkowego strumienia magnetycznego ϕ 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 ϕ skierowanego pionowo w dół dla chwili czasu $t=0$. Dla czasu $t=1/T$ wektor strumienia magnetycznego obrócił się o 60° , tj o $1/6$ pełnego obrotu (rys. 5b), zaś dla czasu $t=T/3$ wektor ϕ przekręca się o 120° , 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 2π , 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,
- ϕ – 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:

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

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

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

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

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

Ze wzoru (4) wynika, że

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

stąd

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

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

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

lub

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

stąd

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

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:

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

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 .

1.3. 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:

$$P = 3 E_2 I_2 \cos \psi_2 , \quad (14)$$

gdzie:

E_2 – *SEM* indukowana w jednej fazie uzwojenia nieruchomego wirnika,

I_2 – prąd płynący w wirniku,

ψ_2 – kąt przesunięcia fazowego między I_2 i E_2

Moc P można wyrazić znanym z mechaniki wzorem:

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

gdzie:

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

ω_1 – prędkość kątowna pola wirującego,

n_1 – prędkość obrotowa synchronicznego pola wirującego.

Ze wzoru (15) moment obrotowy M :

$$M = \frac{P}{\omega_1} = \frac{3E_2 I_2 \cos \psi_2}{\omega_1} = \frac{3E_2 I_2 \cos \psi_2}{2\pi f_1} \quad (16)$$

Ostatecznie

$$M = c E_2 I_2 \cos \psi_2 \quad (17)$$

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.

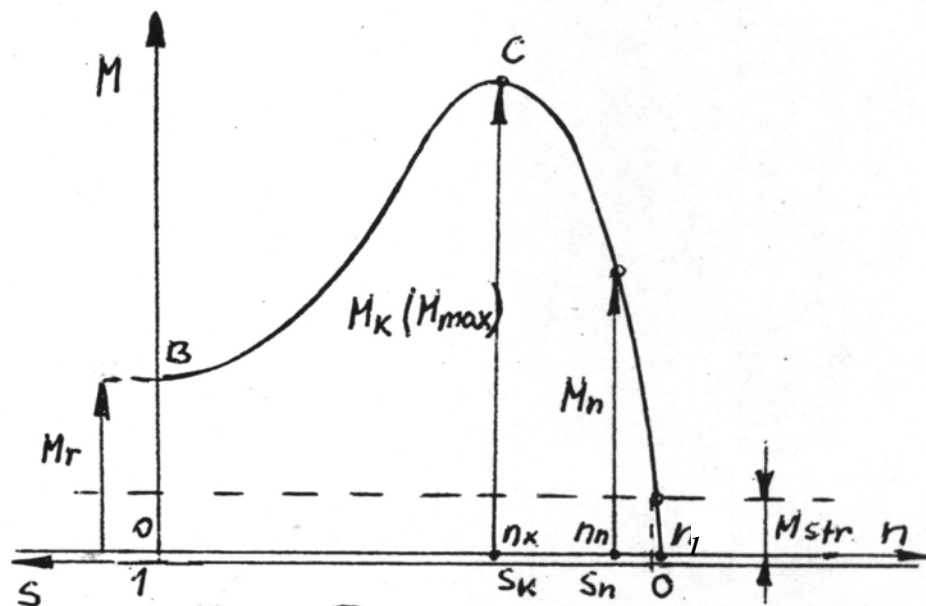
Przeprowadzając odpowiednią analizę można wyznaczyć stosunek momentu obrotowego silnika przy danym obciążeniu (poślizgu s) do jego momentu krytycznego:

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

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 $M = f(s)$ silnika klatkowego zasilanego napięciem $U = \text{const}$.

Część OC krzywej momentu podanej na rys. 6a odpowiada pracy stabilnej silnika. Na tej części charakterystyki (w zakresie poślizgów od $s = 0$ do $s = s_k$) każde zwiększenie momentu obciążenia podczas ustalonej pracy silnika, powoduje zachwianie dotychczasowej równowagi jego momentów: obrotowego i obciążeniowego. W wyniku tego wirnik zostaje przyhamowany, jego obroty zmniejszają się, zaś poślizg rośnie. Rośnie również siła

elektromotoryczna wirnika, pod wpływem której w obwodzie wirnika płynie większy prąd. Stąd również wzrost momentu obrotowego silnika. Tak więc silnik samoczynnie dostosuje swój moment do każdorazowego obciążenia.

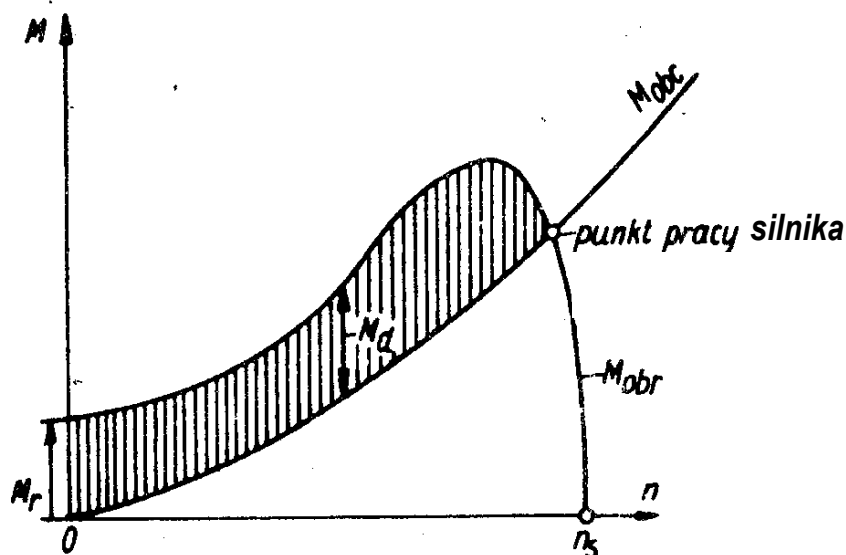
Część CB krzywej $M = f(s)$ odpowiada pracy niestabilnej silnika, ponieważ w granicach poślizgów od $s = s_k$ do $s = 1$ moment obrotowy maleje w miarę wzrostu obciążenia, a więc i poślizgu s , co powoduje zatrzymanie się silnika,

1.4. 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 .

Zarówno moment rozruchowy jak i prąd rozruchowy nie zależą od obciążenia ale od własności silnika. Od obciążenia zależny jest natomiast czas rozruchu. Ponadto o czasie trwania rozruchu decyduje wielkość momentu dynamicznego M_d układu napędowego (rys.7.). Im większy jest M_d oraz im mniejsze są momenty zamachowe mas poruszanych przez silnik, tj. rozruch trwa krócej.



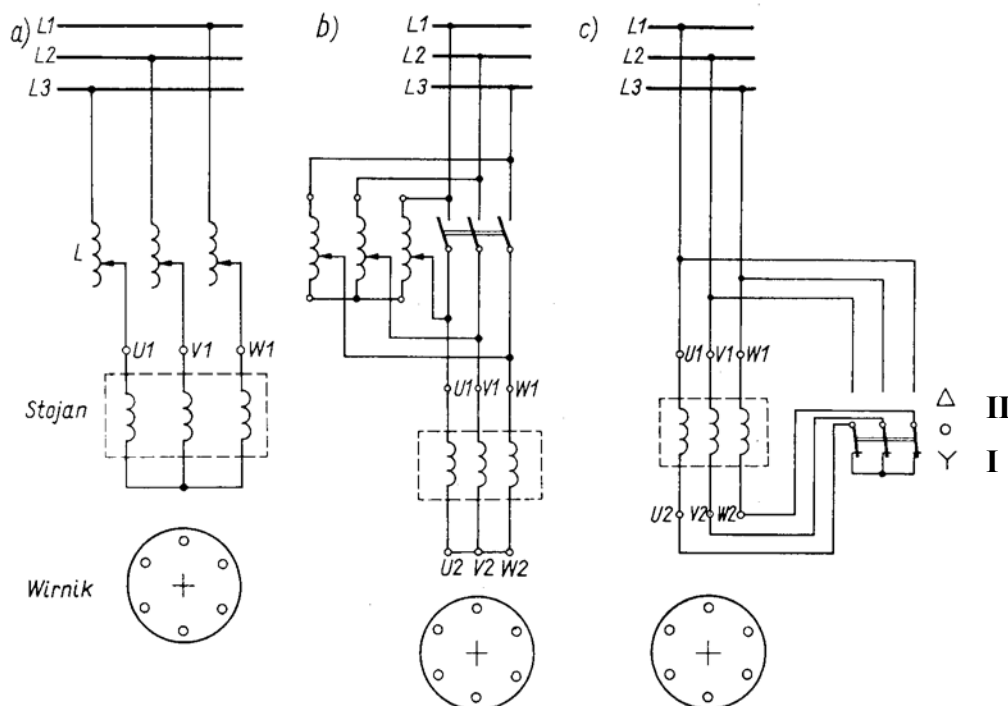
Rys. 7. Przebieg momentu dynamicznego M_d w czasie rozruchu silnika indukcyjnego

1.4.1 Rozruch bezpośredni silnika klatkowego

Ten sposób rozruchu polega na bezpośrednim włączeniu 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.

1.4.2. 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/ Δ) – rys.8c.



Rys 8. Rozruch silnika klatkowego a) przy użyciu dławików (reaktancji), b) przy użyciu autotransformatora, c) przy użyciu przełącznika gwiazda-trójkąt

Zasadę działania przełącznika (Y/ Δ) przedstawiono na rys. 8c. 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.

Jeżeli oznaczymy:

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

$I_{r\Delta}$ - 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,

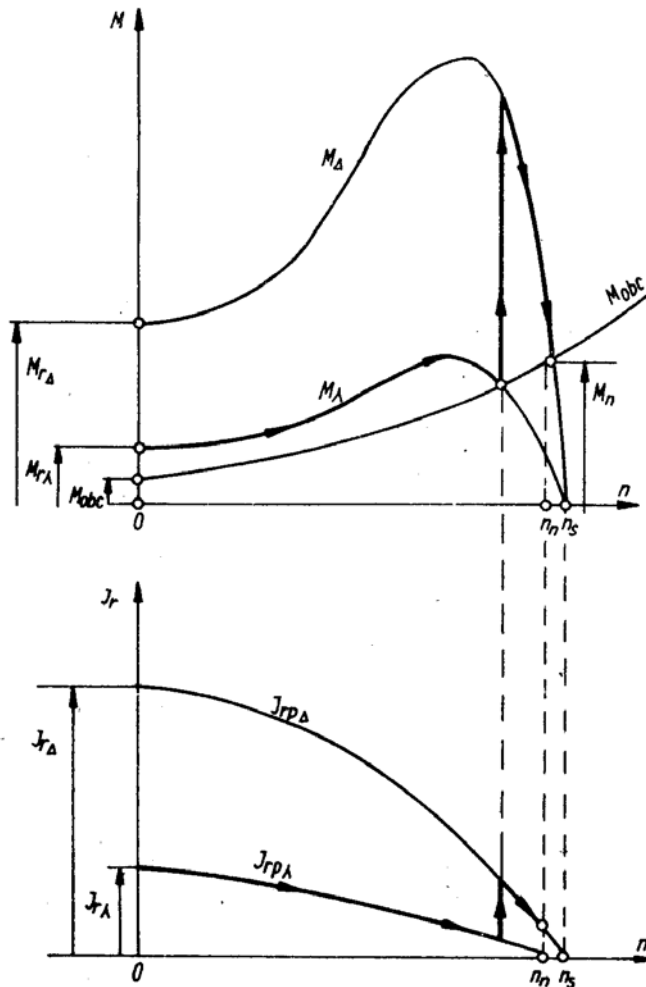
To okaże się, że stosunek:

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

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 nie przekraczającym 30% momentu znamionowego. Wykresy momentów i prądów przy właściwym operowaniu przełącznikiem Y/Δ podane są na rys.9.



Rys.9. 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 8a) polega na szeregowym ich włączeniu do obwodu każdej fazy stojana na czas trwania rozruchu.

Zastosowanie zaś autotransformatora (rys. 8b) 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

1.4.3. Sposoby rozruchu silników budowy pierścieniowej

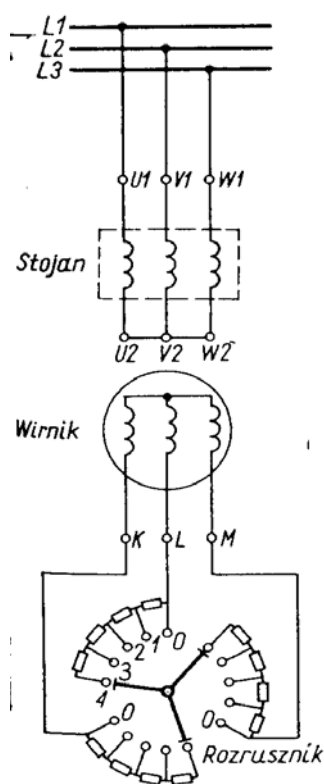
Aby silnik indukcyjny mógł ruszyć jego moment rozruchowy musi być większy od momentu hamującego. W tym przypadku silnik zwiększa swoją prędkość obrotową aż do chwili, gdy nastąpi równowaga między momentem obrotowym i hamującym. Stosunek momentu rozruchowego określony jest jako krotność momentu rozruchowego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

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

Krotność λ_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

$$\lambda_1 = \frac{I_r}{I_n} \quad (30)$$



Rys. 10. Układ połączeń do rozruchu silnika pierścieniowego

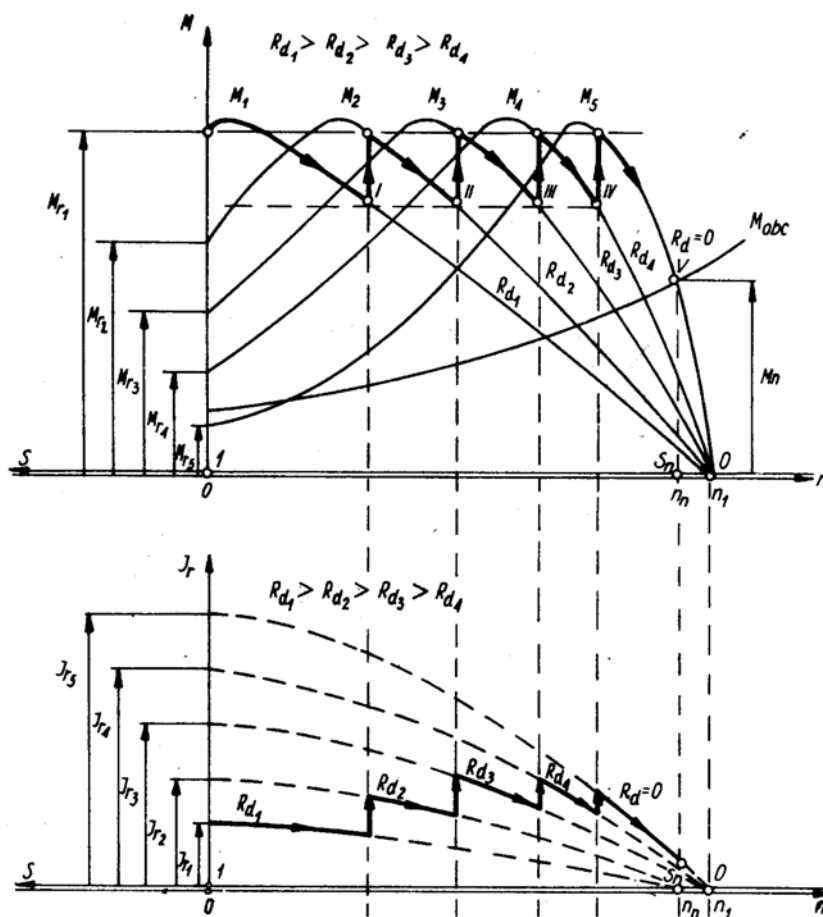
gdzie I_r – prąd rozruchu, I_n – prąd znamionowy

Krotność λ_1 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.10.).

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. 11. Przebieg rozruchu silnika pierścieniowego.

1.5. 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.

1.5.1. Regulacja prędkości obrotowej silnika klatkowego

Z równań:

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

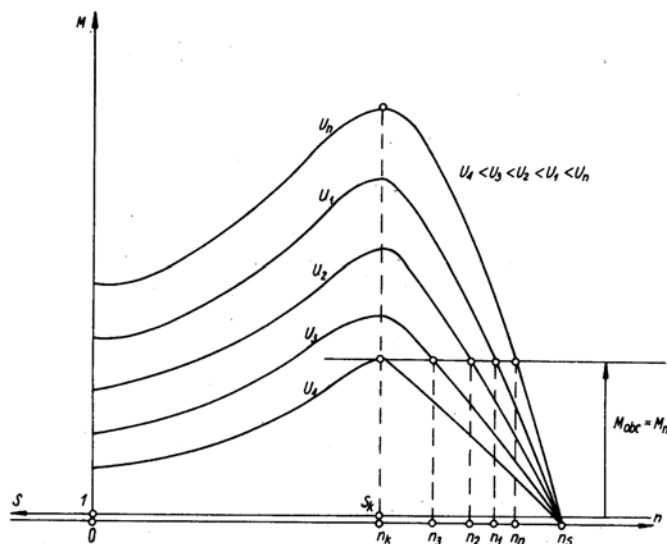
$$M = k U^2 \quad (32)$$

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

- liczby par biegunów,
- 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.



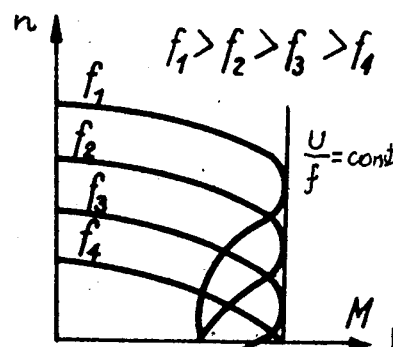
Rys. 12. Charakterystyki związane z regulacją prędkości obrotowej silnika obciążonego stałym momentem, przez zmianę napięcia zasilającego.

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 λ . 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:

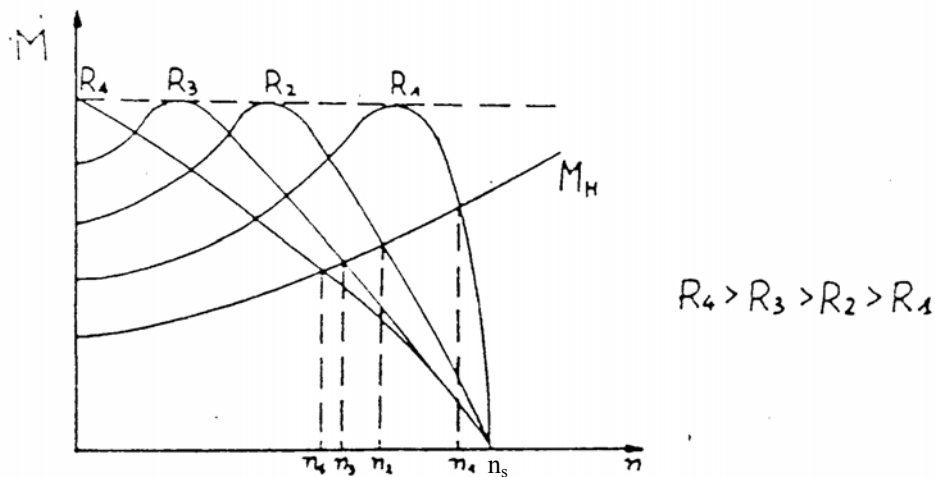
- przeprowadzona w sposób ciągły zapewnia płynną regulację prędkości obrotowej,
- pozwala na regulację prędkości obrotowej w szerokim zakresie > niż 1:20 („w górę” i „w dół” od znamionowej prędkości obrotowej),
- znajduje zastosowanie w silnikach szybkoobrotowych, stosowanych w obrabiarkach do drewna,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



Rys.13. Charakterystyki mechaniczne przy różnych częstotliwościach napięcia zasilającego

1.5.2. Regulacja prędkości obrotowej silników indukcyjnych budowy pierścieniowej

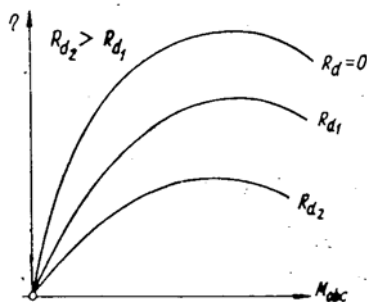
Zmianę prędkości obrotowej można uzyskać przez zmianę częstotliwości napięcia zasilania f_1 , przez zmianę liczny par biegunów uzwojenia i przez zmianę poślizgu s wzór (1). Zmianę poślizgu można uzyskać przez zmianę wartości rezystancji w obwodzie uzwojenia wirnika, oraz przez zmianę wartości napięcia 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 je 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).



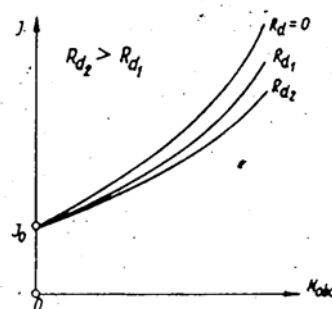
Rys.13 Charakterystyki mechaniczne silnika pierścieniowego przy różnych rezystancjach w obwodzie wirnika.

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

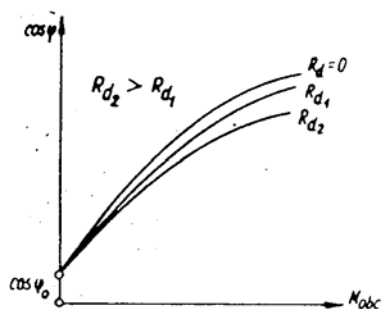
Przy tej metodzie regulacji prędkości obrotowej, sprawności jest proporcjonalna do uzyskiwanej prędkości – przy małych prędkościach obrotowych małe wartości sprawności.



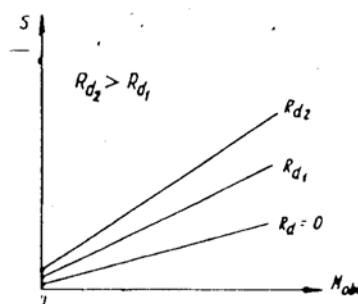
Rys.14. Charakterystyki sprawności silnika indukcyjnego pierścieniowego w funkcji obciążenia.



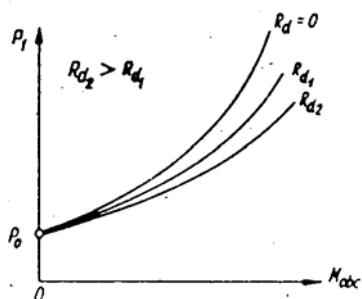
Rys.15. Charakterystyki prądu pobieranego z sieci przez silnik pierścieniowy w funkcji obciążenia



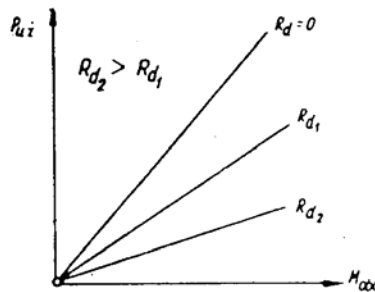
Rys. 16. Charakterystyki współczynnika mocy silnika pierścieniowego w funkcji obciążenia



Rys. 17. Charakterystyki poślizgu silnika pierścieniowego w funkcji obciążenia



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

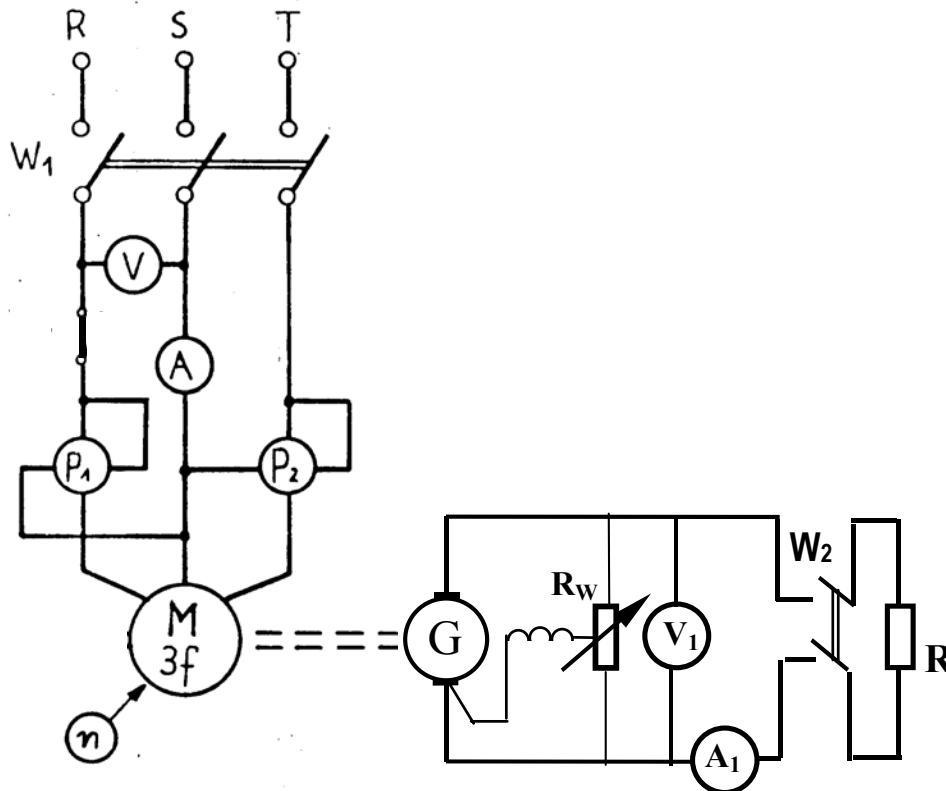


Rys. 19. Charakterystyki mocy użytecznej silnika pierścieniowego w funkcji obciążenia

Wpływ rezystancji dodatkowej włączonej w obwód wirnika na 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.

2. POMIARY

2.1. Wyznaczanie charakterystyk obciążenia silnika klatkowego



Rys. 20. Schemat połączeń do pomiarów charakterystyk obciążenia silnika klatkowego

Pomiaru charakterystyk obciążenia należy dokonać dla:

- połączenia uzwojeń stojana badanego silnika klatkowego w trójkąt,
- połączenia uzwojeń stojana badanego silnika klatkowego w gwiazdę

I) Przy połączeniu uzwojeń w trójkąt należy kolejno:

- 1 - przełącznik Y/ Δ ustawić w położeniu 0,
- 2 - włączyć zasilanie – wyłącznik W_1 .
- 3 - wyłącznik W_2 ustawić w położeniu 0,
- 4 - przełącznik Y/ Δ ustawić w położeniu Δ .

Silnik zostaje uruchomiony przy połączeniu uzwojenia stojana w trójkąt. Silnik jest zasilany obniżonym napięciem trójfazowym o wartości 130/76V.

Po uruchomieniu silnika i zamknięciu wyłącznika W_2 należy ustalić obciążenie, zmieniając odpowiednio rezystancję wzbudzenia R_w (przy stałej rezystancji R). Pomiaru charakterystyki obciążenia wykonuje się zmniejszając stopniowo obciążenie prądnicą.

Ostatni pomiar powinien zostać dokonany przy pracy silnika w stanie jałowym (moment obciążenia równy zero – wyłącznik W_2 otwarty).

Dla danego punktu pomiarowego należy zanotować w tabeli I wartości:

- U, I - napięcia i prądu silnika indukcyjnego,
- $\pm P_1, \pm P_2$ - mocy elektrycznej (w układzie Arona),
- n - prędkości obrotowej wału silnika indukcyjnego,
- U_1, I_1 - napięcia i prądu prądnicy.

Wyniki pomiarów należy wpisać do tablicy 1.

Tablica 1. Uzwojenie stojana połączone w trójkąt

Lp.	Pomiary						Obliczenia						
	U V	I A	$\pm P_1$ W	$\pm P_2$ W	n Obr./ min.	U_1 V	I_1 A	P W	P_3 W	M_{obc} Nm	η %	$\cos\varphi$ -	s %
1													
2													
3													
4													
.													
.													

Dokonując obliczeń należy korzystać z zależności:

- moc pobierana z sieci $P = \pm P_1 \pm P_2$ [W],
 - moc na wale silnika indukcyjnego $P_3 = U_1 I_1 + \Delta P_{CU} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_m$,
- gdzie:
- $\Delta P_{CU} = I_1^2 R_{tb}$ – straty w uzwojeniach prądnicy hamowniczej; ($R_{tb} = 0,7 \Omega$),
 - ΔP_{Fe} – straty w żelazie prądnicy; ($\Delta P_{Fe} \approx 30 W$)
 - ΔP_m , - straty mechaniczne prądnicy; ($\Delta P_m \approx 20 W$)
 - moment obciążenia $M_{obc} = 9,55 P_3 / n$ [Nm]; n [obr./min]
 - sprawność silnika indukcyjnego $\eta = P_3 / P$,
 - współczynnik mocy $\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}UI}$
 - poślizg $s\% = \frac{n_1 - n}{n_1} 100\%$

Na podstawie otrzymanych wyników wykreślić charakterystyki P, P_3 , η , $\cos\varphi$, n, I, $s = f(M_{obc})$.

II) W celu uruchomienia silnika klatkowego, którego uzwojenie stojana połączone jest w gwiazdę należy:

- 1 - przełącznik Y/ Δ ustawić w położeniu 0,
- 2 - włączyć zasilanie silnika – wyłącznik W_1 ,
- 3 - przełącznik W_2 ustawić w położeniu 0,
- 4 - przełącznik Y/ Δ ustawić w położeniu Y.

Pomiary należy wykonać analogicznie jak dla punktu II.

Wyniki pomiarów należy wpisać do tablicy 2.

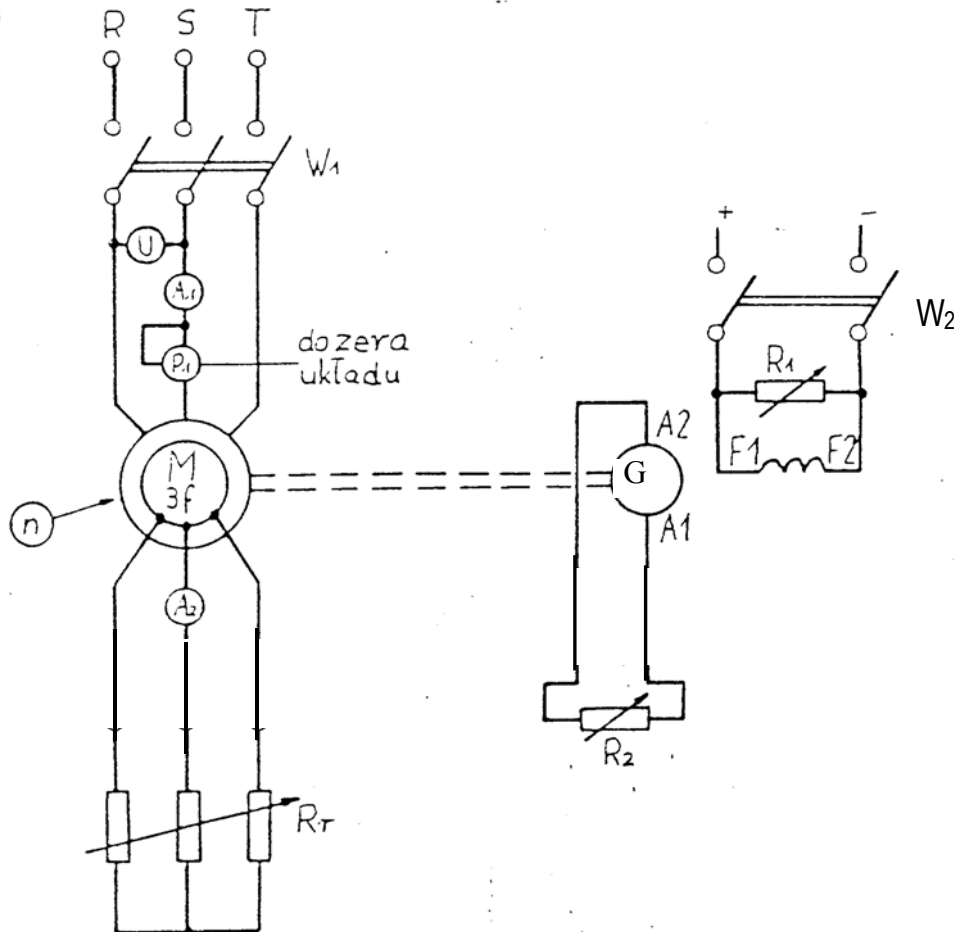
Tablica 2. Uzwojenie stojana połączone w gwiazdę

Lp.	Pomiary						Obliczenia						
	U V	I A	$\pm P_1$ W	$\pm P_2$ W	n Obr./ min.	U_1 V	I_1 A	P W	P_3 W	M_{obc} Nm	η %	$\cos\varphi$ -	s %
1													
2													
3													
4													
.													
.													

Na podstawie otrzymanych wyników wykreślić charakterystyki P , P_3 , η , $\cos\phi$, n , I , $s=f(M_{obc})$.

Uwaga: Charakterystyki należy wykreślić w ten sposób, aby na jednym wykresie znajdowały się krzywe tych samych parametrów, ale dla dwóch wariantów połączeń uzwojenia stojana (w Δ i Y).

2.2. Wyznaczanie charakterystyk obciążenia silnika pierścieniowego



Rys.21. Schemat połączeń do pomiarów charakterystyk obciążenia silnika pierścieniowego

W celu uruchomienia indukcyjnego silnika pierścieniowego wraz z prądnicą hamowniczą należy kolejno:

- 1 - włączyć zasilanie silnika indukcyjnego - napięcie trójfazowe 380/220V - wyłącznik W_1 zamknięty,
- 2 - włączyć zasilanie obwodu wzbudzenia prądnicy - napięcie = 220V - wyłącznik W_2 zamknięty,
- 3 - odpowiednie obciążenia ustalić regulując opornik R_2 i R_1 .

Pomiary należy przeprowadzić dla różnych wartości rezystancji dodatkowej włączonej w obwód wirnika silnika indukcyjnego, regulując opornik R_r .

Dla danego punktu pomiarowego należy zanotować wartości:

- U , I_1 - napięcia i prądu silnika indukcyjnego,
- P_1 - mocy elektrycznej,
- n - prędkości obrotowej wału silnika indukcyjnego,
- M_{obc} - momentu obciążenia (masa odważnika - 5kg)

Wyniki pomiarów należy wpisać do tablicach 3, 4, 5, odpowiednio dla nastawienia opornika R_r , w pozycję „6”, „3” i „0”

Tablica 3 (R_r w pozycji „6”) $R_r=0$.

L.p.	Pomiary					Obliczenia			
	U	I_1	P_1	n	M_{obc}	P_3	P_{Uz}	η	s
	V	A	W	obr/min	Nm	W	W	-	%
1.									
2.									
3.									

Tablica 4 (R_r w pozycji „3”) $R_r=0.56\Omega$

L.p.	Pomiary					Obliczenia			
	U	I_1	P_1	n	M_{obc}	P_3	P_{Uz}	η	s
	V	A	W	obr/min	Nm	W	W	-	%
1.									
2.									
3.									

Tablica 5 (R_r w pozycji „0”) $R_r=1.23\Omega$

L.p.	Pomiary					Obliczenia			
	U	I_1	P_1	n	M_{obc}	P_3	P_{Uz}	η	s
	V	A	W	obr/min	Nm	W	W	-	%
1.									
2.									
3.									

Dokonując obliczeń należy posługiwać zależnościami:

moc pobierana $P_3=3P_1$ [W],

moc oddana $P_{uz}=0.105 M_{obc} n$ [W],

sprawność $\eta=P_{uz}/P_3$; współczynnik mocy $\cos\varphi=\frac{P_3}{\sqrt{3}UI_1}$

poślizg $s\%=\frac{n_1-n}{n_1}100\%$.

Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń należy wykreślić charakterystyki:
 $n=f(M_{obc})$; $P_{uz}=f(M_{obc})$, $I_1=f(M_{obc})$, $\cos\varphi=f(M_{obc})$, $\eta=f(M_{obc})$, $s=f(M_{obc})$.

Uwaga: Charakterystyki należy wykreślić w ten sposób, aby na jednym wykresie znajdowały się krzywe tych samych parametrów, ale dla trzech różnych wartości rezystancji R_r włączonej w obwód wirnika.

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