

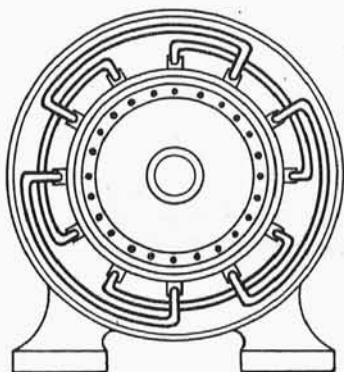
## ROZDZIAŁ IX.

### SILNIKI TRÓJFAZOWE ASYNCHRONICZNE.

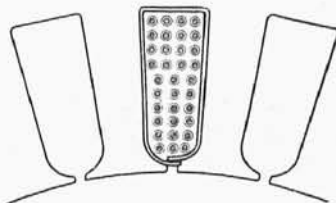
#### 113. Budowa silnika trójfazowego asynchronicznego.

Silnik ten składa się z nieruchomego stojana i z wirnika.

Stojan jest zbudowany tak samo, jak twornik prądnicy trójfazowej. Stanowi on pierścień, utworzony z cienkich blach żelaznych, umocowanych w odlanym kadłubie, rys. 241. Na wewnętrz-



Rys. 241.



Rys. 242.

nej powierzchni tego pierścienia są żłobki, rys. 242, w których umieszcza się uzwojenie trójfazowe z końcami, wyprowadzonymi do tabliczki zaciskowej. Zwykle do tabliczki zaciskowej wyprowadza się sześć końców, tak że można uskutecznić połączenia w trójkąt lub w gwiazdę.

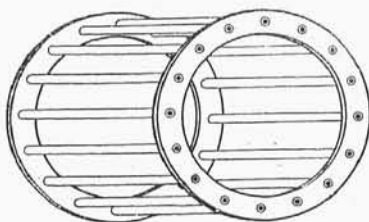
Wewnątrz stojana znajduje się wirnik w postaci wałka żelaznego. Szczelina pomiędzy wirnikiem i stojanem jest jaknajmniej-

sza. Niektórzy konstruktorowie biorą szczelinę  $\delta$  w cm. według wzoru empirycznego:

$$\delta = 0,02 + \frac{D}{900}$$

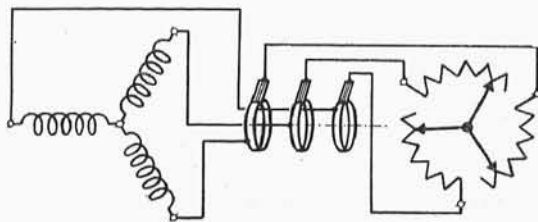
$D$  — wewnętrzna średnica stojana w świetle w cm.

Wirniki mają dwojaką konstrukcję. Bywają wirniki tak zwane zwarte, inaczej klatkowe, oraz uzwojone z pierścieniami ślizgowymi. Klatkowe mają rdzeń w postaci walca, utworzonego z cienkich blach żelaznych, w którym na obwodzie są otwory. Przez te otwory przetknięto pręty miedziane, połączone między sobą na obu końcach zapomocą pierścieni mosiężnych lub miedzianych, tak że tworzą rodzaj klatki, rys. 243.



Rys. 243.

Wirniki uzwojone mają uzwojenie takie same jak stojan, z połączeniem faz w gwiazdę lub w trójkąt. Końce uzwojenia wirnikowego są wyprowadzone do pierścieni ślizgowych, umieszczonych na wale. Po pierścieniach ślizgają się szczotki, połączone przewodami z potrójnym opornikiem, który przez łapki stykowe tworzy układ gwiazdowy, rys. 244.



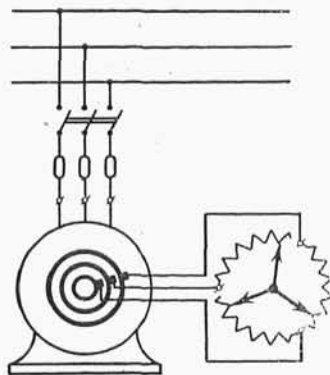
Rys. 244.

Ten opornik służy dla rozruchu i regulacji biegu.

Jeżeli stosujemy opornik tylko przy rozruchu, to zaopatrujemy silnik w zwieracz pierścieni, który po zwarcu zarazem podnosi szczotki.

Zapomocą tego urządzenia osiągamy małe zużycie szczotek i zmniejszamy opór w zwartym obwodzie wirnika.

Prąd w tym silniku doprowadza się tylko do uzwojenia stojana, rys. 245; w wirniku zaś prąd powstaje przez indukcję od



Rys. 245.

prądu stojana. Oddziaływanie stojana na wirnik, przez który przepływa prąd indukowany, wprawia go w ruch, wytwarzając moment obrotowy, który wykonywa pracę mechaniczną. Możliwe to jest tylko przy zamkniętym obwodzie uzwojenia wirnikowego.

#### 114. Pole magnetyczne, wytworzone przez prąd trójfazowy w uzwojeniu stojana.

Gęstość strumieni magnetycznych w szczelinie pomiędzy stojanem a wirnikiem wzdłuż obwodu wirnika jest zmienna.

Gdy rozważamy pole jednej fazy, to mamy układ linii magnetycznych, wskazany na rys. 246. Zależność gęstości linii  $B$  od położenia punktu na obwodzie wyraża się funkcją okresową niesinusoidalną, która jak wiadomo z matematyki, może być rozłożona według Fourier'a na szereg sinusoid o coraz mniejszym okresie. Pierwsza sinusoida będzie miała okres równy okresowi rozważanej funkcji.

Wobec tego, że amplitudy tak zwanych wyższych harmonicznych sinusoid będą małe w porównaniu do pierwszej zasadniczej, możemy w przybliżeniu przyjąć, że gęstość linii pola magnetycznego w szczelinie pomiędzy stojanem i wirnikiem ma rozkład sinusoidalny taki, jak wskazuje rys. 246.

Przez  $\tau$  oznaczmy podziałkę biegunową pola magnetycznego, odpowiadającą połowie okresu sinusoidy.

W miejscu największej gęstości pola wybieramy początek spólrzędnych; wtedy rozkład pola jednej fazy wyrazimy wzorem:

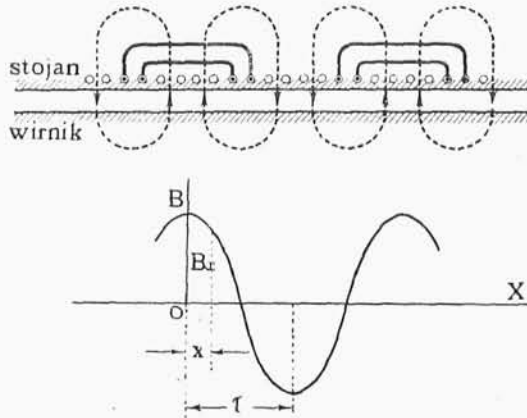
$$B_{1x} = \overline{B}_1 \cos \frac{\pi}{\tau} x$$

$\overline{B}_1$  — zmienia się z czasem według wzoru:

$$\overline{B}_1 = \overline{\overline{B}}_1 \sin \omega t$$

W zależności zatem od miejsca na obwodzie i czasu gęstość linii pola magnetycznego wyrazi się wzorem:

$$B_{1xt} = \overline{\overline{B}}_1 \sin \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x$$



Rys. 246.

Dla drugiej fazy, wobec przesunięcia prądu w czasie o trzecią część okresu i przesunięcia uzwojenia w przestrzeni na obwodzie stojana o  $\frac{2\tau}{3}$ , otrzymamy wzór:

$$B_{2xt} = \overline{\overline{B}}_2 \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left( \frac{\pi x}{\tau} + \frac{2\pi}{3} \right)$$

a dla trzeciej fazy

$$B_{3xt} = \overline{\overline{B}}_3 \sin \left( \omega t + \frac{4\pi}{3} \right) \cos \left( \frac{\pi x}{\tau} + \frac{4\pi}{3} \right)$$

Wypadkowe pole magnetyczne w pewnym punkcie na odległości  $x$  od początku spólrzędnych w chwili  $t$  będzie:

$$B_{xt} = B_{1xt} + B_{2xt} + B_{3xt}$$

Po podstawieniu i przekształceniu trygonometrycznych wzorów według związku:

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

otrzymamy:

$$B_{xt} = \frac{3}{2} \bar{B} \sin \left( \omega t - \frac{\pi x}{\tau} \right)$$

Zakładając stałe  $x$ , widzimy, że  $B_{xt}$  — zmienia się z czasem sinusoidalnie.

Zakładając stałe  $t$ , widzimy, że wokoło obwodu stojana pole magnetyczne wypadkowe ma rozkład sinusoidalny.

Zakładając  $B_{xt} = \text{const.}$  wypadnie:

$$\omega t - \frac{\pi x}{\tau} = \alpha$$

gdzie  $\alpha$  — stała wielkość, a więc:

$$x = \frac{(\omega t - \alpha) \tau}{\pi}$$

Stąd szybkość wirowania pola:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\omega \tau}{\pi} = \frac{2\pi}{T} \frac{\tau}{\pi} = \frac{2\tau}{T}$$

Widzimy więc, że pole magnetyczne wiruje z szybkością obwodową:

$$\frac{2\tau}{T}$$

przechodząc w ciągu jednego okresu łuk, odpowiadający podwójnej podziałce biegunowej (czyli od  $N$  do  $N$ ). A zatem wiruje tak samo szybko, jak magneśnica silnika synchronicznego.

Przy częstotliwości prądu, wynoszącej 50 okresów na sekundę, w zależności od liczby par biegunów pola stojana, liczba obrotów pola na minutę wypada następująca:

| $p$     | $n$  |
|---------|------|
| 1       | 3000 |
| 2       | 1500 |
| 3       | 1000 |
| 4       | 750  |
| 5       | 600  |
| i t. d. |      |

Wogóle:

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

Kierunek wirowania pola zależy od kolejności faz na obwodzie stojana: 1—2—3—1, czy też 1—3—2—1—3—2—1 i t. d.

Łatwo spostrzec, że kierunek wirowania pola zmienia się przy wymianie miejsc zamocowania dowolnych dwóch drutów z trzech, doprowadzających prąd do uzwojenia stojana.

### 115. Prądy indukowane w wirniku.

Pod wpływem wirującego pola stojana wzniciają się przez indukcję prądy w uzwojeniu wirnika. Oddziaływanie pola wirującego na przewodniki, prowadzące te prądy, jest zgodne z kierunkiem wirowania pola<sup>1)</sup>; z tego powodu pod wpływem sił, działających na wirnik, zaczyna się on obracać ruchem przyspieszonym w kierunku wirowania pola, o ile moment obrotowy będzie większy od hamującego.

Zmiana kierunku wirowania wirnika może być uskuteczniiona tylko zapomocą zmiany kierunku wirowania pola. Jeżeliby momentu hamującego nie było zupełnie, to silnik przyspieszałby swój bieg, aż do szybkości synchronicznej, t. j. równej szybkości pola magnetycznego, gdyż tylko wówczas ustaloby indukcyjne działanie pola stojana na wirnik: ustaloby prąd w uzwojeniach wirnika, a więc zniknęłaby i siła, obracająca wirnik.

Przy obciążeniu, wirnik zwalnia biegu, powstaje prąd indukowany a stąd i moment napędowy, który, równoważąc się z momentem hamującym, utrzymuje wirnik w ruchu jednostajnym.

Jeżeli przez  $n_p$  oznaczmy liczbę obrotów pola magnetycznego na minutę, przez  $n_w$  — liczbę obrotów wirnika na minutę, to przy obciążonym silniku mamy:

$$n_p - n_w = n_s$$

Różnicę  $n_s$  nazywamy poślizgiem wirnika.

Prąd, powstający w uzwojeniach wirnika, jest oczywiście zmienny tak, jak w uzwojeniach stojana, lecz częstotliwość jego zmienności jest inna.

Prąd, indukowany w wirniku, powstaje skutkiem ruchu wirnika względem pola magnetycznego, więc częstotliwość jego za-

<sup>1)</sup> Według prawa Lenz'a, dotyczącego prądów indukowanych.

leży od poślizgu  $n_s$ , gdyż  $n_s$  właśnie wyraża liczbę obrotów na minutę pola magnetycznego względem wirnika.

Jeżeli pole jest 2p-biegunowe, to częstotliwość prądu w wirniku będzie:

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

Im mniej jest obciążony silnik, tem mniejsza jest częstotliwość prądu w wirniku.

Przykład. Silnik czterobiegunowy ma poślizg 1%, to przy 50 okresach zmienności prądu w sieci:

$$n_p = 1500 \quad n_w = 1485 \quad n_s = 15$$

więc:

$$f_w = \frac{15 \times 2}{60} = \frac{1}{2}$$

to znaczy, że prąd zmienia się w wirniku z częstotliwością bardzo małą zaledwie pół okresu na sekundę.

Taką zmienność łatwo widzieć na amperomierzu z ruchomą cewką i nieruchomym magnesem. Jeżeli taki amperomierz włączymy do jednego z przewodów, łączących szczotkę wirnika z rozrusznikiem, to wychylenia w prawo i w lewo wskazywać będą zmienność prądu.

Gdy wirnik stoi, to prądy w nim mają tę samą częstotliwość, co w stojanie.

Mamy tu wtedy zwykły transformator.

## 116. Pole magnetyczne obciążonego silnika.

Gdy silnik jest obciążony, to ma prąd w stojanie i w wirniku.

Jak widzieliśmy, prąd stojana wywołuje sinusoidalne pole magnetyczne, wirujące z szybkością  $n_p$  obrotów na minutę.

Prąd zmienny w uzwojeniu wirnika jest również wielofazowy, a więc wytwarza także pole magnetyczne sinusoidalne, wirujące względem wirnika z szybkością:

$$n_p' = \frac{60 f_w}{p}$$

Ponieważ jednak:

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

przeto:

$$n_p' = n_s$$

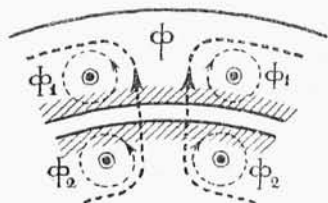
a więc szybkość wirowania pola wirnikowego względem wirnika równa się poślizgowi i jest skierowana w kierunku ruchu wirnika, gdyż w tę stronę wiruje pole stojana, które prądy wzniciło.

Wobec tego pole wirnika względem stojana wiruje z szybkością:

$$n_w + n_s = n_p$$

a więc z tą samą szybkością co pole stojana, i to przy wszelkich poślizgach wirnika.

W tych warunkach pola magnetyczne stojana i wirnika kojarzą się, skąd otrzymuje się jedno pole wirujące, wywołane wspólnie prądami stojana i wirnika, podobnie jak w transformatorze. Pozatem są pola rozproszenia magnetycznego, którego linie obejmują jedynie odpowiednie cewki tylko stojana lub tylko wirnika, rys. 247:  $\Phi$  — strumień, skojarzony z uzwojeniami stojana i wirnika jednocześnie, wirujący



Rys. 247.

z szybkością  $n_p$  obrotów na minutę,  $\Phi_1$  — strumień magnetyczny, skojarzony z drutami stojana,  $\Phi_2$  — strumień magnetyczny, skojarzony z drutami wirnika.

### 117. Moment obrotowy trójfazowego silnika asynchronicznego.

W obciążonym silniku asynchronicznym główną siłę elektromotoryczną w wirniku wznicią strumień magnetyczny skojarzony, on też, oddziałując na przewody z prądem w wirniku, daje moment obrotowy.

Wokoło wirnika gęstość skojarzonego strumienia magnetycznego jest rozłożona sinusoidalnie. Tak samo sinusoidalnie jest rozłożone na obwodzie wirnika natężenie prądów w drutach. Oznaczmy przez  $B_x$  gęstość linii magnetycznych w szczelinie na odległości  $x$  od początku współrzędnych, przez  $I_x$  natężenie prądu w drucie, znajdującym się w tymże miejscu, przez  $z$  liczbę wszystkich drutów na obwodzie wirnika, przez  $\frac{D}{2}$  odległość tych drutów od osi wirnika i przez  $l$  — długość każdego drutu wirnika w polu magnetycznym, wtedy moment obrotowy, działający na wirnik, będzie wynosił:

$$M = (B_x I_x l)_{sr} z \frac{D}{2}$$



gdyż  $(B_x I_x D)_{sr}$  wyraża średnią siłę działania strumienia magnetycznego na pojedynczy drut wirnika.  $B_x$  i  $I_x$  zmieniają się na obwodzie sinusoidalnie, przeto:

$$(B_x I_x)_{sr} = B I \cos \varphi \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Wartości skuteczne  $B$  i  $I$  równają się  $\frac{B_{max}}{\sqrt{2}}$  i  $\frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$ , kąt  $\varphi$  stanowi przestrzenną różnicę faz pomiędzy sinusoidą gęstości strumienia magnetycznego i sinusoidą prądu na obwodzie wirnika.

Prąd  $I$  w dowolnym drucie wirnika zmienia się w czasie sinusoidalnie i jego wartość  $I = \frac{I_{max}}{\sqrt{2}}$  może być wyrażona wzorem:

$$I = \frac{E}{\sqrt{r^2 + (\omega_w L)^2}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

$E$  — siła elektromotoryczna, przypadająca na jeden drut uzwojenia wirnikowego,  $r$  — oporność omowa uzwojenia wirnikowego, na jeden drut,  $L$  — indukcyjność uzwojenia wirnikowego na jeden drut,  $\omega_w$  — pulsacja prądu wirnikowego;

$$\omega_w = 2\pi \frac{n_s p}{60}$$

Siłę elektromotoryczną we wzorze (2) można wyrazić zapomocą gęstości linii magnetycznych  $B$  i szybkości ruchu wirnika względem pola magnetycznego oraz współczynnika stałego  $K_1$ .

$$E = B l \frac{\pi D n_s}{60} = K_1 B n_s$$

a więc:

$$I = \frac{K_1 B n_s}{\sqrt{r^2 + (\omega_w L)^2}}$$

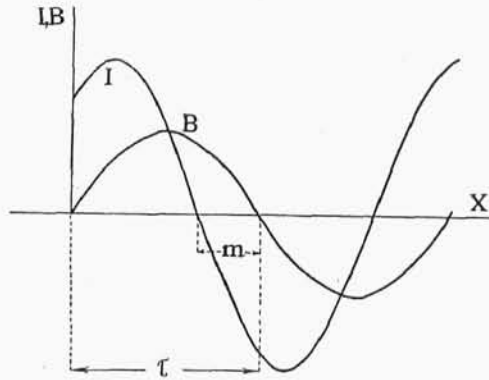
Wyraz na  $\cos \varphi$  w równaniu (1) znajdziemy na zasadzie następującego rozumowania.

Przestrzenne opóźnienie prądu w fazie względem gęstości strumienia magnetycznego na obwodzie wirnika, rys. 248, wynosi:

$$\varphi = \frac{\pi}{\tau} m$$

i pochodzi stąd, że uzwojenie wirnika ma samoindukcję, więc maximum prądu nie będzie miało miejsca w chwili, gdy mamy

maximum siły elektromotorycznej, natomiast maximum siły elektromotorycznej w drucie mamy wtedy, gdy drut ten przechodzi w miejscu, gdzie jest maximum gęstości linii strumienia magnetycznego.



Rys. 248.

Słowem, opóźnienie przestrzenne jest wynikiem opóźnienia w czasie.

Rozważany drut wirnika posuwa się względem strumienia magnetycznego, a więc i linii, wyrażającej zmienność gęstości linii pola  $B$ , z szybkością obwodową względną:

$$\frac{2p \tau n_s}{60}$$

gdyż obwód wirnika wynosi  $2p \tau$ , a poślizg  $n_s$ . Czas, w ciągu którego drut przechodzi odcinek  $m$ , rys. 248, ruchem względnym, będzie:

$$\frac{60 m}{2p \tau n_s}$$

Czas ten jest właśnie opóźnieniem w czasie prądu względem siły elektromotorycznej w wirniku. Opóźnienie to, wyrażone kątem różnicy faz  $\varphi'$ , daje się obliczyć zapomocą opóźnienia, wyrażonego czasem, w sposób następujący:

$$\varphi' = \frac{2\pi}{T_w} \frac{60 m}{2p \tau n_s}$$

tu:

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

Po podstawieniu wyrazu na  $T_w$  i skróceniu, otrzymamy:

$$\varphi' = \frac{\pi m}{\tau}$$

a więc kątowne opóźnienie w przestrzeni jest takie same, jak i w czasie.

Prąd w obwodzie z samoindukcją opóźnia się względem siły elektromotorycznej o kąt  $\varphi$ , dla którego:

$$\cos \varphi = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (\omega_w L)^2}}$$

Po uwzględnieniu wyrazów na  $I$  i na  $\cos \varphi$ , równanie (1), str. 187, przybierze postać:

$$(B_x I_x)_{sr} = \frac{K_1 B^2 r n_s}{r^2 + (\omega_w L)^2}$$

Moment obrotowy różni się od powyższego średniego iloczynu tylko czynnikami stałymi, wobec tego, ujmując wszystkie czynniki stałe w jeden czynnik  $K$ , otrzymamy na moment obrotowy silnika asynchronicznego wzór:

$$M = K \frac{B^2 r n_s}{r^2 + (\omega_w L)^2}$$

Ponieważ pulsacja prądu w wirniku:

$$\omega_w = 2\pi \frac{p n_s}{60} = k n_s$$

przeto:

$$M = K \frac{B^2 r n_s}{r^2 + (k n_s L)^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

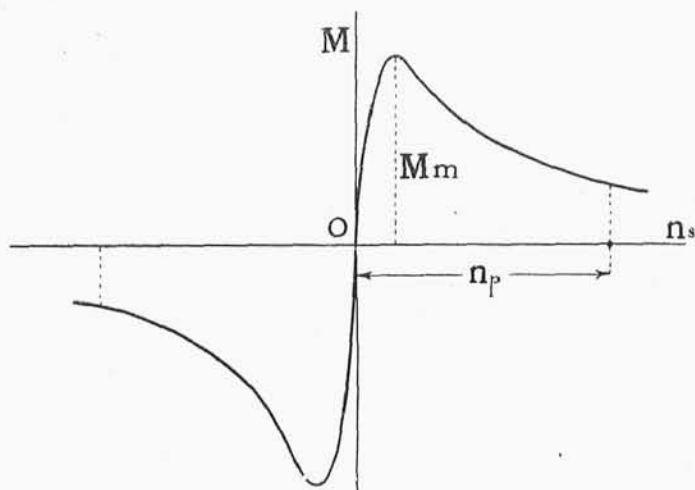
Z tego wzoru możemy wysnuć cały szereg wniosków<sup>1)</sup>.

## 118. Zależność momentu obrotowego od szybkości biegu silnika.

Wzór (3) wyprowadzony w poprzednim § służyć może do zbadania zależności momentu obrotowego od poślizgu  $n_s$ , jeżeli innym wielkościom damy wartości stałe. Rozważając wzór ogólnie i zmieniając  $n_s$  od  $-\infty$  do  $+\infty$ , znajdziemy dla  $n_s > 0$  również  $M > 0$ ; dla  $n_s = 0$ ;  $M = 0$ ; a przy  $n_s < 0$  także  $M < 0$ .

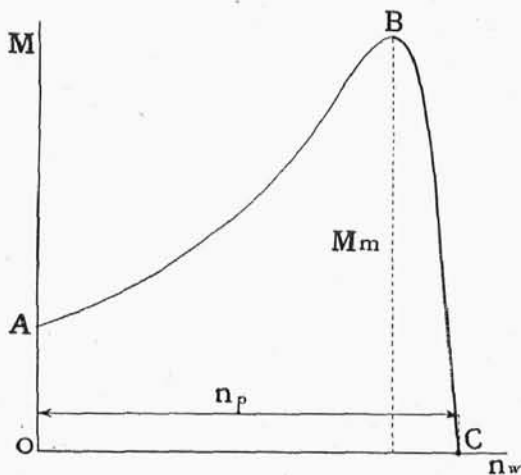
<sup>1)</sup> Szczegóły pracy maszyn asynchronicznych są przedstawione zapomocą wykresu kołowego w rozdziale XIII §§ 168—176.

Na rys. 249, zależność  $M$  od  $n_s$  przedstawiona jest wykreślnie z uwzględnieniem pewnej zmiany  $B$  w zależności od prądu stojana <sup>1)</sup>, przy stałym napięciu prądu stojana.



Rys. 249.

Gdy maszynę asynchroniczną mamy używać jako silnik, to nas obchodzi tylko ta część wykresu, która stosuje się do  $n_s > 0$ . Wtedy, podstawiając do wzoru (3), str. 189, zamiast  $n_s$  różnicę  $(n_p - n_w)$ , znajdziemy zależność momentu obrotowego silnika od szybkości wirowania wirnika <sup>2)</sup>.



Rys. 250.

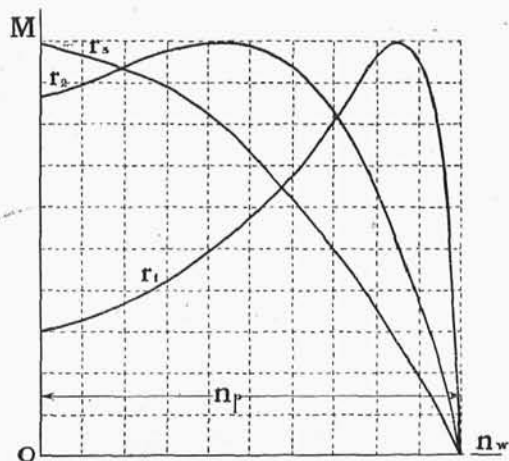
<sup>1)</sup> Patrz rozdział XIII.

<sup>2)</sup> Przyjmując oczywiście, że  $B$  jest stałe, co w przybliżeniu uczynić możemy, gdy chodzi o ogólny charakter właściwości silnika.

Od chwili rozruchu, w miarę wzrostu szybkości biegu, moment obrotowy silnika wzrasta wraz z szybkością do pewnego maksimum, a następnie spada do zera w chwili gdy wirnik osiągnie szybkość równą szybkości wirowania pola magnetycznego, czyli tak zwaną szybkość synchroniczną, rys. 250.

Mamy dwa charakterystyczne zakresy szybkości biegu silnika.

Dla szybkości, odpowiadających części wykresu  $BC$ , przy zmniejszaniu się szybkości biegu, mamy wzrost momentu obrotowego. Natomiast przy szybkościach, odpowiadających części  $AB$ , przy zmniejszaniu się szybkości, moment maleje. Taka właściwość silnika sprawia, że w zakresie odcinka  $BC$  silnik ma bieg stały, natomiast w zakresie odcinka  $AB$  bieg jego jest chwiejny, gdyż drobne zwiększenie momentu hamującego spowoduje spadek szybkości i zatrzymanie się silnika <sup>1)</sup>, drobne zmniejszenie tego momentu wywoła wzrost szybkości aż do punktu na odcinku  $BC$ , przy którym moment obrotowy stanie się równy momentowi hamującemu.



Rys. 251.

Kształt wykresu, wyrażającego zależność  $M$  od  $n_w$ , podany na rys. 250, odpowiada silnikom w normalnych warunkach biegu, z wirnikiem zwartym lub też z pierścieniami zwartymi, pospolicie w praktyce stosowanym. Wogóle kształt ten zależy od oporności omowej wirnika  $r$ .  $M$  maksym. jednak nie zależy od  $r$ .

Im  $r$  jest mniejsze, tem wyraźniejsze mamy maksimum momentu. We wzorze (3), str. 189, przy wielkim oporze  $r$ , w mia-

<sup>1)</sup> Jeżeli, np., moment hamujący trochę wzrośnie, to będzie większy od napędowego, silnik więc zwolni biegu, przez to moment napędowy zmniejszy się, różnica pomiędzy momentem napędowym i hamującym wzrośnie, silnik będzie dalej zwalniał, aż zatrzyma się.



nowniku można opuścić składnik  $kn_sL$ , wtedy  $M$  wypadnie proporcjonalne do poślizgu  $n_s$ . Na rys. 251 podajemy kilka wykresów zależności  $M$  od  $n_w$  przy różnych oporach  $r$ , tu  $r_3 > r_2 > r_1$ .

Przy  $n_w = 0$  mamy moment rozruchowy, otóż ten moment ze wzrostem  $r$  rośnie, jednak tylko do pewnych granic, a potem przy dalszym wzroście  $r$  maleje. Widać to ze wzoru na moment rozruchowy, który otrzymamy, zakładając  $n_s = n_p$  we wzorze (3), str. 189.

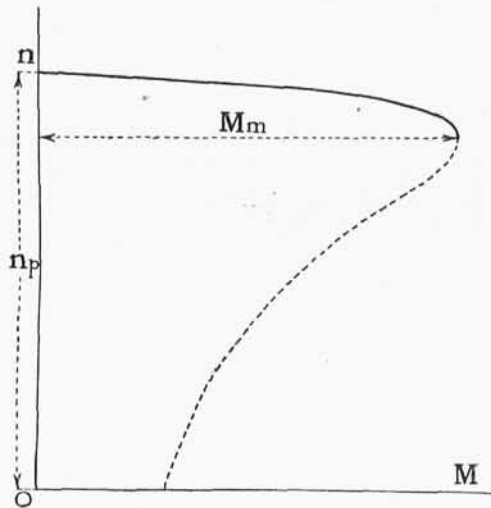
$$M_r = K \frac{B^2 r n_p}{r^2 + (kn_p L)^2}$$

### 119. Zależność szybkości biegu silnika od obciążenia.

Odwracając wykres, podany na rys. 250-ym, otrzymamy zależność:

$$n_w = f(M)$$

wyrażoną wykresem rys. 252. Z tego wykresu widzimy, że przy biegu luzem wirnik obraca się z szybkością  $n_p$  obrotów na minutę.

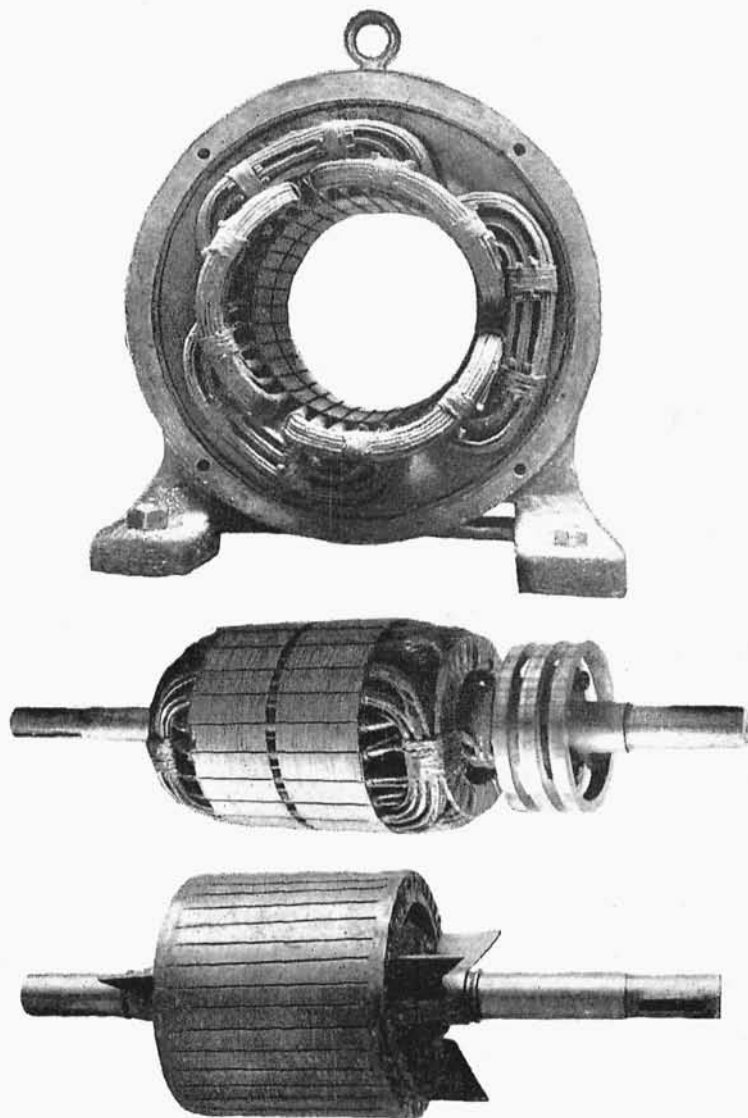


Rys. 252.

W miarę obciążania silnika, szybkość jego stopniowo maleje. Gdy moment obciążenia przekroczy wartość  $M_m$ , silnik niezwłocznie staje. Zwykle silniki mają  $M_m$  dwa razy większe od momentu normalnego obciążenia. Stosują się jednak także  $M_m$  jeszcze większe.

Spadek szybkości biegu od biegu luzem do biegu przy normalnym obciążeniu, czyli tak zwany poślizg, wynosi zwykle od 10

Tab. VI.



1. Uzwojony stojan silnika asynchronicznego trójfazowego.
2. Wirnik silnika asynchronicznego trójfazowego z uzwojeniem, połączonem z pierścieniami ślizgowemi.
3. Wirnik silnika asynchronicznego trójfazowego zwarty—klatkowy, ze skrzydełkami do przewietrzania.

Maszyny firmy Polskie Towarzystwo Elektryczne w Warszawie.

do 4% w i mniej przy mocy silnika od 1 do 100 KM. Mniejsze silniki mają poślizg większy.

Im oporność uzwojeń wirnika jest większa, tem większy jest poślizg przy tym samym momencie hamującym, rys. 251.

## 120. Zależność momentu obrotowego od napięcia prądu zasilającego silnik.

Ze wzoru na moment obrotowy widzimy, że jest on proporcjonalny do kwadratu gęstości linii magnetycznych  $B^2$ , gęstość zaś linii w strumieniu magnetycznym silnika ustala się odpowiednio do napięcia prądu na zaciskach uzwojeń stojana. Wynika to stąd, że napięcie to równa się niemal<sup>1)</sup> sile elektromotorycznej wzbudzonej w uzwojeniach stojana przez strumień wirujący. Wobec tego, im wyższe damy napięcie na zaciskach stojana, tem większa musi wypaść siła elektromotoryczna, a więc i tem większa gęstość linii magnetycznych.

Możemy zatem twierdzić, że moment obrotowy jest proporcjonalny niemal do kwadratu napięcia prądu, zasilającego silnik.

## 121. Prąd biegu luzem w silniku asynchronicznym.

Na szczególną uwagę zasługuje w silnikach asynchronicznych prąd biegu luzem: jest to głównie prąd magnesujący, a więc znacznie opóźniony w fazie względem napięcia. Obwód magnetyczny silnika asynchronicznego ma na swoim szlaku szczelinę między stojanem a wirnikiem, przeto oporność magnetyczna jest duża, co powoduje powstawanie znacznego prądu magnesującego, bez porównania większego, niż np., w transformatorach. Dlatego prąd biegu luzem w silnikach do 2 kW wynosi od 50 do 33% prądu przy pełnem obciążeniu; w silnikach większych — od 33 do 25% prądu normalnego. Spółczynnik mocy —  $\cos \varphi$  — tego prądu jest mały i wynosi około 0,15 do 0,2.

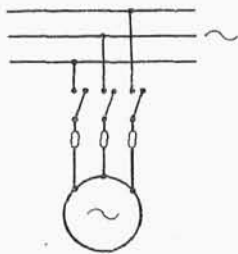
## 122. Rozruch silnika asynchronicznego o zwartym wirniku zapomocą trójbiegunowego wyłącznika.

Najprostsze urządzenie do puszczenia w ruch silnika asynchronicznego polega na zastosowaniu zwykłego wyłącznika trójbiegunowego w układzie połączeń wskazanym na rys. 253.

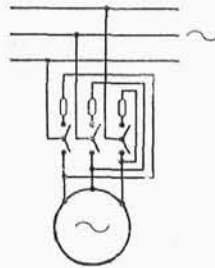
<sup>1)</sup> Pomijając spadek napięcia omowy, oraz indukcyjny od strumieni rozproszonych.



Przy rozruchu, wobec znacznych prądów, indukowanych w zwartym wirniku, duży prąd dopływa do stojana, gdyż prądy wirnika w wysokim stopniu osłabiają siłę elektromotoryczną samoindukcji w stojanie. Zależnie od wielkości silnika prąd rozruchowy przewyższa prąd normalny 4 do 6,5 razy. Tak silne chwilowe wzmożenie się prądu w sieci powoduje znaczny spadek napięcia, zmniejszający moment rozruchowy silnika, a zarazem sprawia przyciemnianie się lamp, włączonych na te same przewody. Wobec tego elektrownie zwykle przepisują graniczną moc silników o zwartym wirniku, które mogą być włączane zwykłym wyłącznikiem do sieci. Jeden z przepisów ogranicza np. do 2 KM.



Rys. 253.



Rys. 254.

Normalne silniki katalogowe ze zwartym wirnikiem pospolicie bywają budowane do 5 KM.

Jeżeli silnik z rozruchem zapomocą wyłącznika zaopatrzyć w bezpieczniki normalne t. j. na prąd normalnego pełnego obciążenia, to przy rozruchu takie bezpieczniki będą się topiły i z tego względu wypada wtedy stosować bezpieczniki na prąd, co najmniej 2,5 razy większy od prądu normalnego.

Stosując jednak tak silne bezpieczniki, pozbawiamy silnik w znacznej mierze tej ochrony, jaką one dać powinny silnikowi.

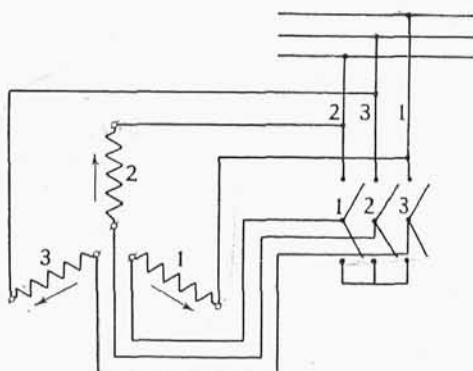
Niektórzy uważają, że ochrona zapomocą bezpieczników, jest potrzebna tylko przy normalnym biegu i stosują przełącznik, rys. 254, który przy rozruchu włącza stojan na sieć bez bezpieczników, a dopiero, gdy silnik nabierze odpowiedniej szybkości, przestawia się przełącznik na następne kontakty, gdzie są włączone normalne bezpieczniki. Radykalnie jednak tę sprawę rozwiązują odpowiednie nadmiarowe przerywacze samoczynne, które wyłączają prąd przy nadmiernym długotrwałym prądzie.

Moment rozruchowy silników o zwartym wirniku, przy puszczeniu w ruch zapomocą wyłącznika, wynosi od 2,5 do 0,5 momentu normalnego, zależnie od wielkości silnika. Liczba pierwsza stosuje

się do silników najmniejszych, a druga do największych, pospolicie stosowanych. Naogół silniki z takim rozruchem używają się wtedy, gdy rozruch jest lekki, np., gdy wymaga momentu obrotowego około  $\frac{1}{3}$  momentu normalnego.

### 123. Rozruch silnika asynchronicznego przy pomocy przełącznika gwiazda — trójkąt.

W celu zmniejszenia prądu rozruchowego niewielkich silników, często stosuje się przełącznik gwiazda — trójkąt, rys. 255, który pozwala skutecznie rozruch silnika przy napięciu  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  razy mniejszym od napięcia normalnego, przewidzianego dla biegu silnika pod normalnym obciążeniem.

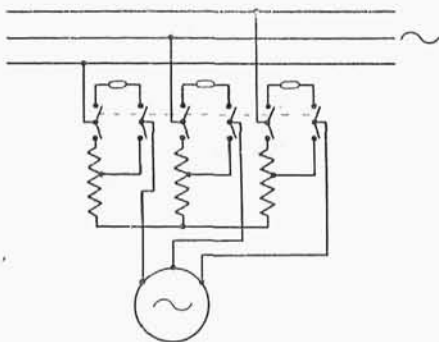


Rys. 255.

Dla umożliwienia stosowania takiego przełącznika uzwojenie silnika musi być tak wykonane, aby bieg normalny odbywał się przy połączeniu w trójkąt. Prąd rozruchowy pobrany z sieci jest tu w przybliżeniu 3 razy mniejszy od prądu, któryby popłynął do silnika, jeżelibyśmy od razu włączyli pełne napięcie sieci na uzwojenie stojana, połączone w trójkąt. Włączając jednak na sieć uzwojenie stojana połączone w gwiazdę i mając z tego powodu na uzwojeniu poszczególnej fazy mniejsze napięcie, będziemy mieli również mniejszy strumień magnetyczny, a to znacznie obniży moment rozruchowy, który w tych warunkach przeciętnie wynosi około 0,56 normalnego momentu obrotowego. Wobec tego przełącznik gwiazda — trójkąt może być stosowany tylko przy rozruchu lekkim.

## 124. Rozruch silnika zapomocą stopniowego transformatora.

Dla zmniejszenia prądu rozruchowego dużych silników, przy lekkim rozruchu, często są stosowane autotransformatory stopniowe, pozwalające skokami podnosić napięcie prądu, zasilającego silnik.

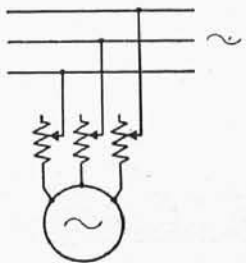


Rys. 256.

Na rys. 256-ym widzimy taki mały autotransformator dwustopniowy z przełącznikami i bezpiecznikami, włączanymi dopiero przy biegu normalnym.

## 125. Rozruch silnika zapomocą opornika w obwodzie stojana.

Taki rozruch stosuje się bardzo rzadko, jeżeli zależy na bardzo powolnym, stopniowym wzroście prądu rozruchowego, i to tylko przy silnikach małych do nader lekkiego rozruchu, rys. 257. Ujemną cechą powyższego rozruchu jest bardzo znaczne obniżenie momentu rozruchowego silników, gdyż napięcie na zaciskach silnika początkowo wypada tu bardzo małe. Tak, np., zredukowawszy opornikiem prąd rozruchowy do wartości prądu przy biegu normalnym, otrzymamy moment rozruchowy, wynoszący zaledwie kilka procentów momentu normalnego.



Rys. 257.

## 126. Rozruch silnika przez stopniowe powiększanie częstotliwości prądu zasilającego stojan.

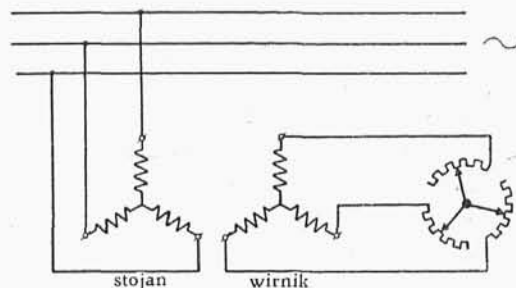
Gdy prądnica prądu trójfazowego zasila jeden duży silnik, lub kilka mniejszych, ale biegnących zawsze razem, to niema potrzeby przerywać obwodu, łączącego prądnicę z silnikiem. Gdy chcemy puścić silnik w ruch, wystarczy puścić w bieg i stopniowo wzbudzić prądnicę, za prądnicą podąży i silnik.

Strumień magnetyczny silnika jest wprost proporcjonalny do napięcia prądu zasilającego i odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości. Gdy więc na początku rozruchu mamy wprowadzić małe napięcie, ale również niewielką częstotliwość prądu, to strumień magnetyczny może wypaść równie wielki, jak przy normalnem obciążeniu, przez co moment obrotowy również będzie mógł być normalny.

## 127. Rozruch zapomocą opornika w obwodzie wirnika.

Nieruchomy silnik asynchroniczny jest właściwie transformatorem o wielkiej szczelinie powietrznej.

Im większy włączymy opór do obwodu wirnika, stanowiącego wtórne uzwojenie, tem mniejszy prąd płynąć będzie do stojana, rys. 258.



Rys. 258.

Dla silników małych do 5 kW często stosuje się opornik rozruchowy jednostopniowy, który ogranicza prąd rozruchu do trzykrotnej wartości prądu normalnego. Jeżeli opornik ten zostawić w obwodzie wirnika przy pracy silnika, to sprawność silnika odpowiednio się zmniejszy, a spadek szybkości biegu przy wzroście obciążenia się zwiększy.

Przeważnie jednak stosowane są oporniki rozruchowe regulowane, obliczone w taki sposób, że przy rozruchu silnik, np.,

pobiera 1,3 prądu normalnego, który wywołuje moment rozruchowy, w przybliżeniu równy momentowi normalnego biegu.

W ten sposób, zapomocą opornika w wirniku, można, ograniczając prąd przy rozruchu, jednocześnie zwiększyć moment rozruchowy w porównaniu do tego momentu, który mielibyśmy, włączając na sieć stojan przy zwartem uzwojeniu wirnika. Wynika to wyraźnie ze wzoru na moment rozruchowy, podanego na str. 192.

W celu zmniejszenia zużycia szczotek i pierścieni, obecnie zawsze wirniki z pierścieniami, przeznaczonemi tylko do rozruchu, zaopatruje się w zwieracze pierścieni, podnoszące jednocześnie szczotki.

## 128. Rozruch zapomocą oporników wbudowanych do wirnika.

Przy małej liczbie stopni opornikowych dla uproszczenia obsługi, można opory umieścić na wale wirnika i zwierać je stopniowo zapomocą zwieracza, działającego zapomocą sił odśrodkowych, zależnych od szybkości wirowania.

Takie urządzenie działa automatycznie i zwierca odpowiednie opory po osiągnięciu przez wirnik silnika określonej szybkości wirowania.

## 129. Rozruch silników z podwójnem uzwojeniem wirnika.

Wirnik zaopatruje się w dwa uzwojenia: jedno rozruchowe o znacznym oporze omowym, stale zwarte; drugie o małym oporze omowym, przy rozruchu otwarte.

To drugie uzwojenie automatycznie zwierca się po osiągnięciu przez silnik odpowiedniej szybkości biegu.

Podobne rozwiązanie zagadnienia rozruchu stanowią wirniki dwukłatkowe zwarte, w których uzwojenie kłatkowe o większym oporze znajduje się w pobliżu powierzchni wirnika, a o małym oporze głębiej.

W chwili rozruchu mamy znacznie większą częstotliwość zmian pola magnetycznego w wirniku, niż później w normalnym biegu. Skutkiem tego klatka zewnętrzna w znacznym stopniu zasłania klatkę wewnętrzną od indukcyjnego działania stojana, ale tylko przy rozruchu. Podobną własność mają również uzwojenia kłatkowe pojedyncze z prętami o prostokątnym przekroju, którego wysokość jest kilka razy większa od szerokości<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Siemens Zeitschrift 1928 r. Zeszyt 4.

Pręty te umieszcza się w głębokich wąskich żłobkach na obwodzie wirnika.

W chwili rozruchu, gdy prąd w wirniku ma dużą częstotliwość, pozorna oporność poszczególnych warstw pręta, na jakie można go w myśli podzielić, równoległe do osi wirnika, jest nierówna, gdyż głębsze warstwy będą miały większą indukcyjność.

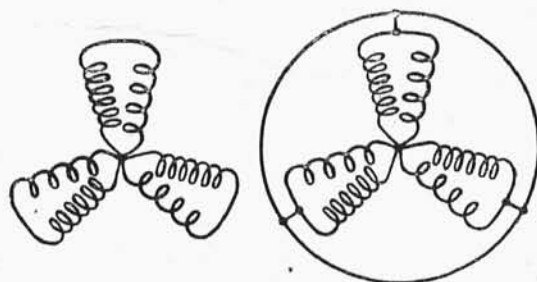
Skutkiem tego prąd w wirniku płynie wtedy głównie w warstwach górnych prętów i oporność omowa prętów jest znacznie większa od obliczonej dla prądów stałych.

W biegu normalnym częstotliwość prądu w wirniku — niewielka, indukcyjność wtedy ma wpływ mały i prąd na całym przekroju prętów rozkłada się niemal równomiernie, więc omowa oporność prętów wypada teraz znacznie mniejsza. Przy włączeniu od razu na pełne napięcie, moment rozruchowy takich silników przewyższa 1,2 do 1,5 raza moment normalny, prąd zaś rozruchowy jest 3,8 do 4,8 razy większy od prądu normalnego.

### 130. Rozruch silnika z wirnikiem o uzwojeniach przeciwsobnych.

Wirnik ma tu uzwojenie trójfazowe podwójne o różnej liczbie zwojów na fazę.

W chwili rozruchu uzwojenia te łączą się w szereg przeciw sobie i tworzą zamknięte obwody, w których siły elektromotoryczne są skierowane w przeciwnych kierunkach względem obiegu kołowego obwodu, tak że czynna jest tu różnica sił elektromotorycznych, powstających w poszczególnych uzwojeniach, rys. 259.



Rozruch.

Rys. 259.

Bieg.

Gdy silnik osiągnie odpowiednią szybkość, oba uzwojenia zostają zwarte, zapomocą mechanizmu, działającego pod wpływem sił odśrodkowych.

Prąd stojana w chwili włączania i przełączania osiąga tu w przybliżeniu potrójną wartość prądu normalnego.