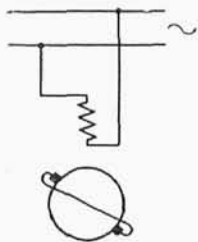


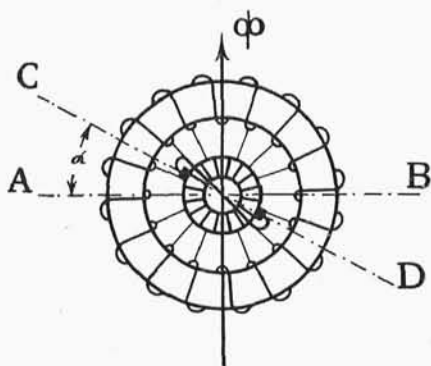
# 151. Silnik repulsyjny z jedną parą szczotek na jedną parę biegunów.

Silniki tak zwane repulsyjne mają zazwyczaj tylko uzwojenie na magneśnicy, zasilane prądem zmiennym, oraz wirnik z komutatorem, na którym leży zwykła liczba szczotek, odpowiednia do liczby biegunów magneśnicy, t. j. przy dwubiegunowej magneśnicy — dwie szczotki i t. d.

Wszystkie szczotki na komutatorze są zwarte między sobą przez łączniki o małym oporze. Wobec tego prąd z sieci do wirnika nie dopływa, a powstaje tam przez indukcję, rys. 285.



Rys. 285.



Rys. 286.

Położenie szczotek przy pracy takiego silnika, rys. 286, jest odmienne, niż w innych maszynach, a mianowicie linia  $CD$  szczotek jest nachylona pod pewnym kątem  $\alpha$  względem linii obojętnej  $AB$ , prostopadłej do strumienia magnetycznego stojana czyli magneśnicy.

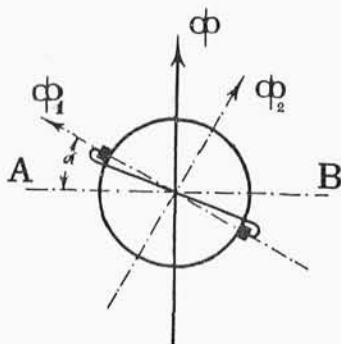
Dla rozważenia działania takiego silnika rozłożymy strumień magnetyczny magneśnicy  $\Phi$  na dwa strumienie:  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$ ;  $\Phi_1$  — skierowany wzdłuż linii szczotek i  $\Phi_2$  — prostopadły do linii szczotek, rys. 287.

Prąd w nieruchomym wirniku jest wzniecany tylko przez strumień  $\Phi_1$ , gdyż jak wiemy z § 147-go siły elektromotoryczne, wywoływane strumieniem  $\Phi_2$  prostopadłym do linii szczotek, znoszą się względem tych szczotek i w obwodzie, zwartym przez łączniki między szczotkami, prądu dać nie mogą.

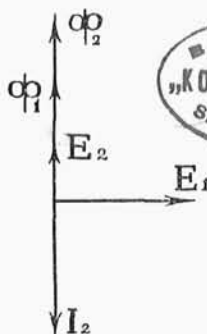
Natomiast, działanie strumienia  $\Phi_2$  na prądy twornika, wywołane strumieniem magnetycznym  $\Phi_1$ , daje moment obrotowy, gdyż strumień  $\Phi_2$  ma takie same położenie względem uzwojenia wirnika jak strumień magneśnicy w poprzednich silnikach prądu

stałego, fazę zaś jego względem prądu wirnikowego znajdziemy w przybliżeniu według następującego rozumowania.

Strumień  $\Phi_1$ , rys. 288, wznieca w uzwojeniu wirnika, jak we wtórnym uzwojeniu transformatora, siłę elektromotoryczną  $E_1$ , spóźniającą się w fazie o ćwierć okresu.



Rys. 287.



Rys. 288.

Ta siła elektromotoryczna wywołuje w zwartym uzwojeniu wirnika prąd  $I_2$ , spóźniający się w fazie względem niej niemal o ćwierć okresu z powodu znacznej samoindukcji obwodu wirnika i względnie małej oporności omowej.

Wobec tego  $I_2$  ma niemal przeciwną fazę względem  $\Phi_1$ , strumień zaś  $\Phi_2$  jest zgodny w fazie co do czasu z  $\Phi_1$ , gdyż są to składowe tego samego strumienia magnetycznego.

Stąd wynika, że prąd  $I_2$  ze strumieniem  $\Phi_2$  mogą dać znaczny średni moment obrotowy, gdyż iloczyny ich wartości chwilowych zawsze będą miały ten sam znak<sup>1)</sup>.

Podczas ruchu strumień magnetyczny  $\Phi_2$  wznieca w uzwojeniu wirnika siłę elektromotoryczną ruchu  $E_2$ , zgodną w fazie z tym strumieniem i przeciwną prądowi wirnika, jak w każdym silniku.

## 152. Moment obrotowy silnika repulsyjnego z jedną parą szczotek na jedną parę biegunów.

Z powyższych rozumowań wynika, że moment obrotowy takiego silnika jest proporcjonalny do strumienia magnetycznego  $\Phi_2$  i prądu w wirniku  $I_2$ , przeto możemy napisać<sup>2)</sup>;

$$M = K I_2 \Phi_2$$

<sup>1)</sup> W rzeczywistości różnica faz pomiędzy strumieniem  $\Phi_2$  i prądem  $I_2$  jest trochę mniejsza od  $180^\circ$  i moment obrotowy średni będzie nieco mniejszy od tego, który otrzymalibyśmy przy powyższym przypuszczeniu.

<sup>2)</sup> W przypuszczeniu, że różnica faz pomiędzy  $I_2$  i  $\Phi_2$  stanowi  $180^\circ$ .

$M$  — średni moment obrotowy,

$I_2$  — wartość skuteczna prądu w wirniku,

$\Phi_2$  — wartość skuteczna składowej strumienia magnetycznego magneśnicy, prostopadłej do linii szczotek.

Prąd  $I_2$  powstaje przez indukcję od składowej strumienia magnetycznego  $\Phi_1$ , jest więc do tej składowej proporcjonalny. A zatem możemy napisać:

$$M = K' \Phi_1 \Phi_2$$

Składowe  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$  przy położeniu szczotek, wskazanem na rys. 287 możemy wyrazić przez strumień całkowity  $\Phi$ :

$$\Phi_1 = \Phi \sin \alpha \quad \Phi_2 = \Phi \cos \alpha$$

Wobec tego:

$$M = K' \Phi^2 \cos \alpha \sin \alpha$$

Z tego wzoru widzimy, że moment obrotowy takiego silnika zależy od kąta  $\alpha$ , pod którym postawione są szczotki względem linii obojętnej  $AB$ . Moment jest równy zeru przy  $\alpha = 0$ , ponieważ wtedy  $\sin \alpha = 0$ ; moment jest także równy zeru przy  $\alpha = 90^\circ$ , gdyż wtedy  $\cos \alpha = 0$ . Badaniem funkcji  $\cos \alpha \sin \alpha$  łatwo sprawdzić, że ma ona maksimum przy  $\alpha = 45^\circ$ .

Jednakże wobec tego, że  $\Phi$  magneśnicy nie jest stałe przy rozmaitych położeniach szczotek oraz wobec różnych uproszczeń, poczynionych przy powyższych wywodach, maksymalny moment w chwili ruszania otrzymujemy przy  $\alpha = 75^\circ$  do  $80^\circ$ .

Przy puszczeniu silnika w ruch, puszczamy prąd przy położeniu szczotek, odpowiadającym kątowi  $\alpha = 0$  i następnie stopniowo przesuwamy szczotki, powiększając kąt  $\alpha$ , aż moment obrotowy silnika będzie większy od momentu hamującego.

Wobec tego, że szczotki w położeniu odpowiadającym kątowi  $\alpha = 0$  zwierają zwojnice, obejmujące znaczne strumienie magnetyczne, mamy w tych zwojnicach duże prądy, wywołane indukowaną siłą elektromotoryczną transformacyjną. Skutkiem tego zwojnice te grzeją się i nie można trzymać pod prądem przez czas długi silnika nieruchomego.

Praca normalna odbywa się zwykle przy  $\alpha = 67^\circ$  do  $77^\circ$ .

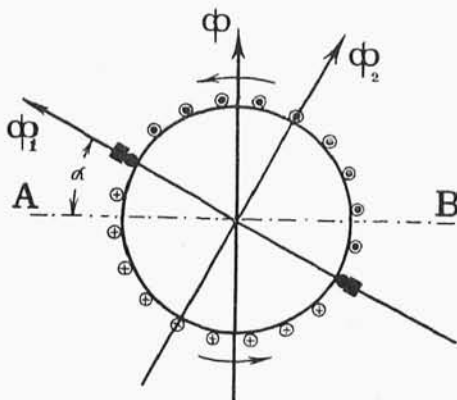
Zmianę szybkości biegu przy stałym momencie obrotowym osiąga się przez zmianę kąta położenia szczotek.

Tak np. przy przestawieniu położenia szczotek od  $45^\circ$  do  $72^\circ$  względem linii obojętnej, szybkość wirowania zmienia się od  $55\%$  do  $110\%$  szybkości normalnej.

Gdy obciążenie wzrasta przy stałym kącie  $\alpha$ , to szybkość biegu znacznie maleje według wykresu, podobnego do wykresu silnika szeregowego; jednocześnie zmniejsza się współczynnik mocy prądu zasilającego, t. j.  $\cos \varphi$ .

Na szczególną uwagę zasługuje jeszcze sprawa kierunku wirowania silnika.

Założmy, że szczotki zostały przesunięte od położenia na linii obojętnej w kierunku ruchu wskazówek zegarka o kąt  $\alpha$ , rys. 289.



Rys. 289.

Na obwodzie wirnika pokazane są w przecięciu druty, na których zaznaczono kierunek prądu w chwili, gdy strumienie magnetyczne mają kierunki podane na tymże rysunku. Kierunek prądu został wyznaczony na zasadzie poprzednich wywodów, z których wynika, że jest on indukowany strumieniem magnetycznym  $\Phi_1$  i ma względem zmienności tego strumienia fazę odwrotną, a przeto, gdy strumień ma kierunek wskazany na rysunku, to prąd w zwojach, obejmujących ten strumień, płynie w kierunku przeciwnym do obrotu śruby prawokrętniej, umieszczonej wzdłuż strumienia  $\Phi_1$ . Wynika to z prawa indukcji prądów przy którym wzór:

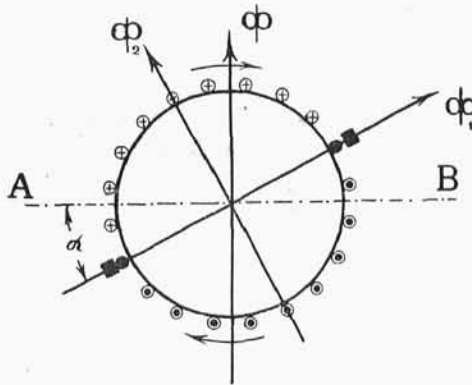
$$E = - \frac{d\Phi}{dt}$$

piszemy w założeniu, że dodatni kierunek siły elektromotorycznej jest zgodny z kierunkiem prądu, wywołującego strumień magnetyczny indukujący.

Jeżeli teraz według reguły Biot-Savart'a rozpatrzmy kierunek oddziaływania strumienia  $\Phi_2$  na prąd w wirniku, to łatwo spostrzeżemy, że kierunek tych sił będzie zwrócony u góry w lewo,

u dołu zaś w prawo, a więc moment obrotowy powstanie w kierunku odwrotnym do ruchu wskazówek zegara.

Jeżeli następnie przesuniemy szczotki w położenie odwrotne względem linii obojętnej  $AB$ , patrz rys. 290, to, wyznaczając w podobny sposób, jak poprzednio, kierunek działania strumienia magnetycznego  $\Phi_2$  na prąd w tworniku, powstający w tych nowych warunkach, łatwo przekonamy się, że teraz moment obrotowy będzie skierowany w kierunku ruchu wskazówek zegarka.

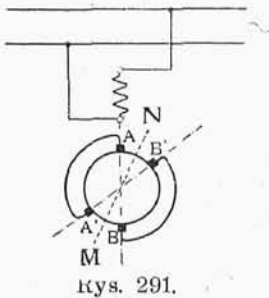


Rys. 290.

Z tych rozważań wynika, że w silnikach repulsyjnych kierunek wirowania wirnika zależy od kierunku przesunięcia szczotek względem linii obojętnej  $AB$ .

Wirnik wiruje zawsze w stronę odwrotną do tej, w którą zostały przesunięte szczotki.

### 153. Silnik repulsyjny z dwiema parami szczotek na jedną parę biegunów.



Rys. 291.

Inny rodzaj silników repulsyjnych, rys. 291, ma na komutatorze dwie pary szczotek na jedną parę biegunów. Jedna para szczotek  $AB$ , ustawiona na osi strumienia magnetycznego magniesnicy, jest nieruchoma, druga para szczotek  $A'B'$  — ruchoma.

Szczotka  $A$  jest połączona przewodnikiem o małym oporze ze szczotką  $A'$ , a szczotka  $B$  ze szczotką  $B'$ .

W spoczynku szczotkę  $A'$  ustawia się obok szczotki  $A$ , a szczotkę  $B'$  obok szczotki  $B$ ; w biegu szczotki  $A'$  i  $B'$  są przesuwane jednocześnie o pewien kąt względem poprzedniego położenia. Kąt ten może się zmieniać od  $0^\circ$  do  $180^\circ$ . Powyższy silnik posiada takie same własności, jak poprzednio opisany silnik repulsyjny z wirnikiem zwartym, którego linia szczotek przechodzi wzdłuż prostej  $MN$  w środku pomiędzy szczotkami  $AB'$  i  $A'B$ .

Silnik repulsyjny z podwójną liczbą szczotek na biegun ma dwie zalety w porównaniu z poprzednim. Wobec większego zakresu przesuwania szczotek jest tu łatwiejsza i dokładniejsza regulacja szybkości biegu.

Przy rozruchu, szczotki stoją w pobliżu osi strumienia magnesnicy, skutkiem czego zwojnice zwarte przez szczotki, nie obejmują strumienia magnetycznego magnesnicy, a przez to transformacyjna siła elektromotoryczna nie powstaje i niema prądu zwarcia. Przy tem położeniu szczotek nieruchomy silnik może dowolny czas pozostawać pod prądem, co jest ważne przy silnikach, które potrzeba często puszczać w ruch.

Wszystkie silniki repulsyjne mają jedną wspólną zaletę, że, wobec niezależności uzwojenia wirnika od uzwojenia magnesnicy, napięcie prądu magnesnicy jest niemal dowolne, można więc przy maszynach dużej mocy stosować prąd wysokiego napięcia.

## 154. Boczniowy silnik komutatorowy jednofazowy.

Chcąc osiągnąć szybkość biegu komutatorowego silnika na prąd zmienny niemal niezależną od obciążenia, zbudowano boczniowy silnik komutatorowy o podwójnej liczbie nieruchomych szczotek na jedną parę biegunów, rys. 292.

Taki dość skomplikowany układ został zastosowany wobec tego, że zwykły układ boczniowy należycie działać nie może z powodów, które zaraz rozważymy.

Przyłączmy do tej samej sieci prądu zmiennego uzwojenie nieruchomej magnesnicy i ruchomego wirnika silnika komutatorowego, którego pole wirnikowe będzie skompensowane odpowiednim uzwojeniem pomocniczym na magnesnicy, w celu uniknięcia nadmiernie małego  $\cos \varphi$ .

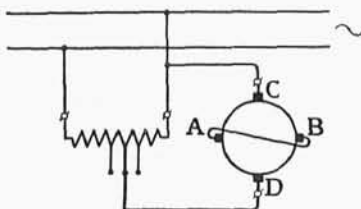
Wtedy, skutkiem znacznej samoindukcji cewek, prąd w magnesnicy i strumień magnetyczny wywołany tym prądem będą przesunięte w fazie o  $90^\circ$  względem napięcia sieci, prąd zaś w wirniku, którego pole jest skompensowane, będzie niemal zgodny

w fazie z napięciem sieci. Wobec tego pomiędzy strumieniem magnetycznym magneśnicy, a prądem twornika powstanie różnica faz, wynosząca niemal  $90^\circ$ .

Średni moment działania takiego strumienia magnetycznego na przewodniki z powyższym prądem da się wyrazić wzorem<sup>1)</sup>:

$$M = K\Phi I \cos 90^\circ$$

Taki moment oczywiście równa się zero.



Rys. 292.

W układzie podanym na rys. 292, uzwojenie stojana nie odgrywa tej podwójnej roli, jak w silniku repulsyjnym. Tutaj strumień magnetyczny tego uzwojenia tylko wznieca prądy indukowane w obwodzie wirnika, zwartym przez szczotki  $A B$ . Strumień zaś magnetyczny powołany do wytwarzania momentu obrotowego otrzymuje się wzdłuż linii  $CD$ , pod wpływem prądu płynącego w uzwojeniu wirnika przez szczotki  $C$  i  $D$ , połączone w odgałęzieniu od uzwojenia stojana, które odgrywa tu rolę autotransformatora. Można byłoby dla szczotek  $C$  i  $D$  ustawić niezależny transformator przyłączony wprost do sieci.

Rozważmy przesunięcie fazy prądu indukowanego w wirniku względem pola wytworzonego przez prąd wprowadzony do twornika przez szczotki  $C$  i  $D$ .

Uzwojenie stojana łącznie z uzwojeniem wirnika, zwartym przez szczotki  $A$  i  $B$  stanowi zwykły transformator, w którym w przybliżeniu prąd wtórny ma przeciwną fazę do napięcia na zaciskach uzwojenia pierwotnego<sup>2)</sup>.

<sup>1)</sup>  $\Phi$  i  $I$  skuteczne wartości strumienia magnetycznego i prądu. Średnia wartość iloczynów dwóch sinusoidalnie zmiennych wielkości równa się iloczynowi wartości skutecznych tych wielkości pomnożonemu przez cosinus kąta różnicy faz.

<sup>2)</sup> Patrz wykres rys. 150, na str. 110.

Strumień magnetyczny, wywołany prądem płynącym w tworniku przez szczotki  $C$  i  $D$  ma fazę zgodną z tym prądem. Prąd zaś jest w czasie ruchu niemal zgodny w fazie z napięciem na szczotkach  $CD$ <sup>1)</sup>. Napięcie zaś na szczotkach  $CD$  jest wtórnem napięciem transformatora, a więc niemal przeciwne w fazie napięciu pierwotnemu, przeto prąd indukowany w obwodzie  $AB$  twornika i strumień magnetyczny wywołany prądem, płynącym przez szczotki  $CD$  w tworniku są niemal w fazie. Skutkiem tego, przy współdziałaniu tego strumienia magnetycznego z powyższym prądem, powstaje znaczny moment obrotowy. W miarę zwiększania się obciążenia, maleje nieco szybkość wirowania wirnika, zmniejsza się siła elektromotoryczna ruchu wywołana strumieniem magnetycznym skierowanym wzdłuż linii  $CD$  i skutkiem tego prąd w zwartym obwodzie szczotek  $AB$  rośnie. Natomiast niemal nie ulega zmianie prąd, płynący przez szczotki  $CD$  i strumień magnetyczny wywołany tym prądem niemal pozostaje stały.

W tych warunkach silnik rozważany zachowuje się podobnie jak silnik bocznikowy zasilany prądem stałym.

Przy rozruchu jednak silnik bocznikowy komutatorowy na prąd zmienny, w układzie podanym na rys. 292, wywiązuje bardzo słaby moment obrotowy, ponieważ w obwodzie twornika pomiędzy szczotkami  $C$  i  $D$  niema siły elektromotorycznej ruchu i napięcie na szczotkach równoważy się niemal tylko z całą siłą elektromotoryczną samoindukcji, skutkiem tego prąd w obwodzie  $CD$  otrzymuje się znacznie słabszy i faza jego jest nieodpowiednia.

Z tego powodu taki silnik puszcza się w ruch w zmienionym układzie połączeń, np. jako zwykły komutatorowy silnik szeregowy, i dopiero gdy nabierze odpowiedniej szybkości wirowania, przełączamy go na układ bocznikowy.

Regulacja takich silników jest możliwa przez zmianę napięcia na szczotkach  $A$  i  $B$ , które wtedy rozłączamy i za pomocą transformatora wprowadzamy odpowiednie napięcie dodatkowe. Również można zmieniać strumień magnetyczny, powstający wzdłuż  $CD$  przez zastosowanie pomocniczego uzwojenia na stojanie z zaczepekami, włączonego w obwód prądu, płynącego przez szczotki  $C$  i  $D$ .

Naogół widzimy, że budowa silników komutatorowych bocznikowych łącznie z pomocniczymi urządzeniami jest dość skomplikowana, a przez to i zastosowanie ich ograniczone.

---

<sup>1)</sup> Dowód patrz na końcu tego paragrafu.



Należy jeszcze udowodnić, że prąd, płynący przez szczotki  $C$  i  $D$  do wirnika, jest w czasie ruchu niemal w fazie z napięciem na tych szczotkach.

Przedewszystkiem trzeba zwrócić uwagę na to, że w czasie ruchu w obwodzie szczotek  $CD$  w uzwojeniu wirnika powstaje siła elektromotoryczna ruchu pod wpływem strumienia magnetycznego skierowanego wzdłuż linii  $AB$ , wywołanego amperozwojami stojana i wirnika w jego zwartym obwodzie. Strumień ten opóźnia się w fazie względem napięcia na zaciskach uzwojenia stojana niemal o  $90^\circ$ <sup>1)</sup>, a siła elektromotoryczna ruchu jest zgodna w fazie z indukującym strumieniem magnet. Przeto siła elektromotoryczna ruchu opóźnia się w fazie względem napięcia stojana niemal o  $90^\circ$ .

Pozatem w obwodzie szczotek  $CD$  mamy w uzwojeniu wirnika siłę elektromotoryczną samoindukcji, która względem prądu w tym obwodzie opóźnia się o  $90^\circ$ , prąd zaś ten jest wtórnym prądem autotransformatora, więc ta siła elektromotoryczna wyprzedza w fazie napięcie na zaciskach stojana niemal o  $90^\circ$ .

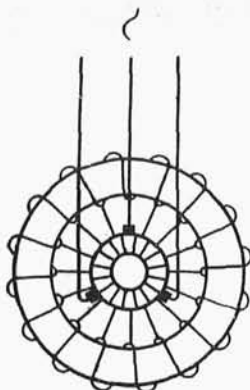
Wypada więc, że siła elektromotoryczna ruchu jest przeciwna sile elektromotorycznej samoindukcji. W tych warunkach napięcie na szczotkach  $CD$  równa się geometrycznej sumie omowego spadku napięcia i różnicy powyższych sił elektromotorycznych z odwrotnym znakiem.

Różnica ta wypada mała i przeto napięcie  $V_{CD}$  ma do pokonania niemal tylko spadek napięcia omowy, a wtedy, jak wiadomo, prąd jest w fazie z napięciem.

### 155. Wirnik z komutatorem, zasilany prądem trójfazowym.

Oprócz komutatorowych silników jednofazowych bywają budowane jeszcze silniki, zasilane prądem trójfazowym.

W tych silnikach ma zastosowanie zwykły wirnik z komutatorem, posiadającym jednak nie dwie, ale trzy szczotki na jedną parę biegunów, rys. 293.



Rys. 293.

Szczotki te są rozstawione na komutatorze symetrycznie w ten sposób, że przy dwubiegunowym układzie znajdują się pod kątem  $120^\circ$ .

<sup>1)</sup> Patrz wykres transformatora.

Jeżeli przez te szczotki puścimy do nieruchomego wirnika prąd trójfazowy, to uzwojenie wirnika z komutatorem zachowywać się będzie jak zwykle uzwojenie czy to pierścieniowe, czy też bębnowe w układzie trójkątnym.

W drutach uzwojenia popłyną prądy, stanowiące  $\frac{1}{\sqrt{3}}$  prądów, płynących w przewodach, łączących źródło prądu ze szczotkami.

Prąd trójfazowy, płynący w takim uzwojeniu podobnie jak w stojanie trójfazowego silnika asynchronicznego, wytworzy strumień magnetyczny, wirujący z szybkością:

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

Gdy wirnik powyższy znajdzie się w ruchu wirowym, to nie się nie zmieni, bo układ uzwojenia jest zupełnie symetryczny, i o ile prądy dopływowe pozostaną te same, to prądy w drutach uzwojenia nie ulegną zmianie i pole magnetyczne względem szczotek będzie wirowało z tą samą szybkością.

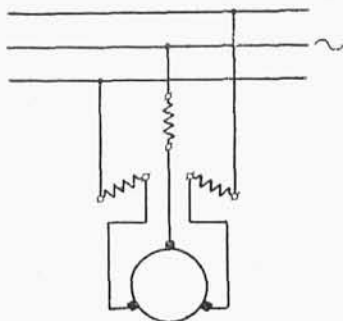
Szybkość wirowania wirnika ma wpływ na wielkość sił elektromotorycznych, indukowanych polem wirującym w drutach uzwojenia wirnikowego oraz na częstotliwość tych sił elektromotorycznych, odpowiadającą różnicy szybkości wirowania pola i wirnika, a więc tylko względem drutów, w których one powstają, natomiast napięcie na szczotkach, wywołane temi siłami elektromotorycznymi, ma względem szczotek zawsze częstotliwość normalną prądu zasilającego. Tu siły elektromotoryczne wirnika można wyobrazić sobie, jako nieruchome w przestrzeni, a więc zachowujące swe położenie względem szczotek, pomimo że ich chwilowe podłoże — druty — wirują.

## 156. Zasada ustroju trójfazowego silnika komutatorowego szeregowego.

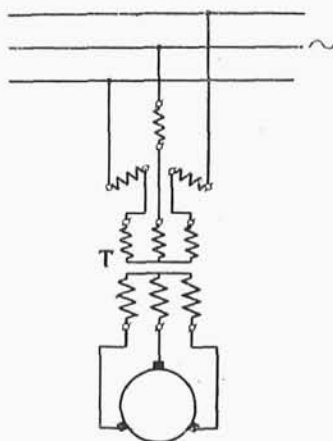
Trójfazowy silnik komutatorowy składa się ze stojana, zbudowanego tak samo, jak stojan zwykłych silników trójfazowych asynchronicznych; wirnik zaś jest wykonany, jak twornik prądnic prądu stałego z komutatorem, rys. 294.

Początki uzwojenia stojana łączą się z siecią, a końce ze szczotkami, umieszczonemi na komutatorze. Uzwojenie wirnika jest więc połączone w szereg z uzwojeniem stojana.

W tych przypadkach, gdy zależy na zmniejszeniu napięcia na szczotkach, pomiędzy stojan a wirnik włączamy transformator trójfazowy  $T$ , rys. 295 <sup>1)</sup>.



Rys. 294.



Rys. 295.

Transformator ten nie zmienia głównych własności i zasady działania silnika, tak że przy dalszych wywodach mieć będziemy na myśli układ połączeń według rys. 294.

Prąd, płynący w uzwojeniach stojana i wirnika, wytwarza dwa strumienie magnetyczne wirujące z tą samą szybkością w tę samą stronę.

Jeżeli liczba okresów prądu na sekundę jest  $f$ , a liczba par biegunów uzwojeń stojana i wirnika  $p$ , to pola wirują z szybkością:

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

względem stojana, niezależnie od tego, czy wirnik jest nieruchomy czy też wiruje.

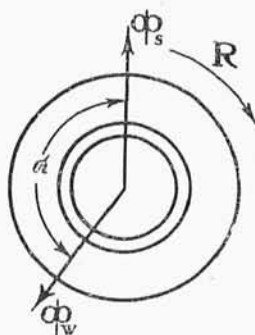
Dwa te strumienie magnetyczne kojarzą się razem w jeden strumień magnetyczny wypadkowy, którego oddziaływanie na prądy wirnika daje moment obrotowy, wprawiający wirnik w ruch.

Wielkość strumienia magnetycznego wypadkowego zależy od wielkości i względnego położenia strumieni składowych.

<sup>1)</sup> Przy napięciach używanych zwykle w sieciach prądu trójfazowego zawsze stosuje się transformator w celu odpowiedniego obniżenia napięcia pomiędzy sąsiednimi wycinkami komutatora.

Względne położenie strumieni stojana i wirnika zależy od położenia szczotek na komutatorze, gdyż szczotki dzielą uzwojenie wirnika na trzy fazy, których położenie względem stojana zmienia się przy przesuwaniu szczotek, a względne położenie strumieni wirujących zależy wyłącznie od względnego położenia uzwojeń poszczególnych faz stojana i wirnika.

Jeżeli szczotki na komutatorze ustawione są w ten sposób, że kierunki strumieni stojana i wirnika są zgodne, to momentu obrotowego, działającego na wirnik, niema na tej samej zasadzie, według której w zwykłym silniku prądu stałego strumień magnetyczny magneśnicy, skierowany wzdłuż linii szczotek, momentu obrotowego nie daje.



Rys. 296.



Rys. 297.

Jeżeli natomiast szczotki na komutatorze przesuniemy o kąt  $\alpha$  od tego położenia, przy którym kierunki strumieni stojana i wirnika są zgodne, to strumienie utworzą kąt  $\alpha$ , rys. 296, wtedy siły elektromagnetyczne, podobnie jak w silniku repulsyjnym, wprowadzą w ruch wirnik w kierunku strzałki  $R$ , a więc odwrotnie do kierunku przesunięcia szczotek.

Szczegóły działania tych silników są podane w następnych paragrafach z zastrzeżeniem, że wszystkie rozumowania zostały przeprowadzone w przypuszczeniu, że strumienie magnetyczne są proporcjonalne do amperozwojów.

## 157. Siły elektromotoryczne i napięcia indukowane w uzwojeniach stojana i wirnika.

Strumień magnetyczny wypadkowy  $\Phi$ , rys. 297<sup>1)</sup>, wirujący w szczelinie wznica w uzwojeniach stojana i wirnika siły elektromotoryczne  $E_s$  i  $E_w$ .

<sup>1)</sup> Rysunek wyraża przestrzenne położenie strumieni i jest narysowany w przypuszczeniu, że amperozwoje stojana i wirnika są równe.

Wielkość siły elektromotorycznej  $E_s$ , jest proporcjonalna do szybkości wirowania pola względem stojana  $n_p$ .

Wielkość siły elektromotorycznej  $E_w$  jest proporcjonalna do szybkości wirowania pola względem wirnika, a więc proporcjonalna do  $n_p - n_w$ .

Wobec tego:

$$\frac{E_w}{E_s} = \frac{n_p - n_w}{n_p} = s$$

$s$  — poślizg względny.

Co do fazy siły elektromotorycznej  $E_w$  względem  $E_s$ , to należy zauważyć, że  $E_w$  wyprzedza  $E_s$  w fazie o kąt  $\alpha$ , gdyż wirujący wypadkowy strumień magnetyczny, rys. 297, wcześniej przecina zwoje pewnej fazy wirnika niż stojana, wobec ustawienia szczotek, odpowiadającego względnemu  $\angle \alpha$  pomiędzy kierunkami pól, podanemu na rysunku.

Siły elektromotoryczne z odwrotnymi znakami wyrażają napięcia prądu na stojanie i na wirniku przy pominięciu małych spadków napięcia omowych i indukcyjnych.

Napięcie sieci równa się oczywiście geometrycznej sumie napięć w uzwojeniach stojana i wirnika, które tu są połączone szeregowo, rys. 294. Jeżeli więc oznaczenia nasze będą wyrażały, np., napięcia gwiazdowe uzwojeń, to:

$$\hat{V} = \hat{V}_s + \hat{V}_w \quad V_s = -E_s \quad V_w = -E_w$$

Na rys. 298-ym mamy pokazane względne położenie wektorów napięć i sił elektromotorycznych, a na rys. 299-ym wynik geometrycznego dodawania, gdzie  $AC$  wyraża napięcie prądu zasilającego silnik.

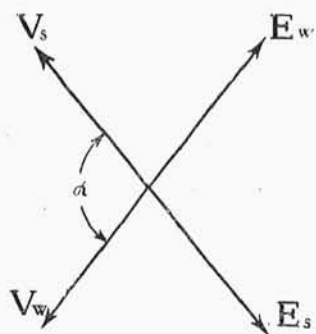
Przy zmiennej szybkości wirowania silnika, trójkąt  $ABC$  zachowuje oczywiście stałą długość podstawy  $AC$ , która wyraża stałe napięcie sieci zasilającej; kąt  $ABC = 180^\circ - \alpha$ , przy stałym położeniu szczotek, jest również niezmienny, zmieniają się tylko boki  $V_w$  i  $V_s$ , których stosunek, według poprzednich wywodów, wypada:

$$\frac{V_w}{V_s} = s$$

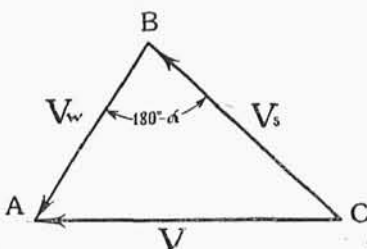
Wobec tego, wierzchołek  $B$  przesuwa się po okręgu koła, opisanego na  $AC$ , rys. 300. Są cztery charakterystyczne położenia wierzchołka  $B$ .

Gdy wirnik stoi, to  $n_w = 0$ ,  $s = 1$ , a więc  $V_s = V_w$ , wtedy wierzchołek trójkąta będzie w  $B_1$ .

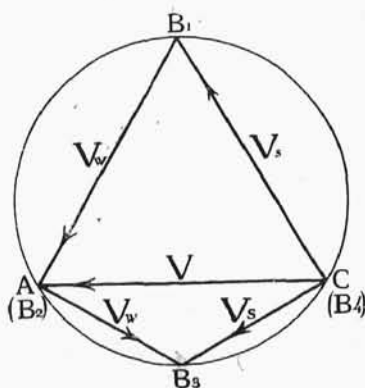
Gdy wirnik biegnie synchronicznie z polem, to  $n_w = n_p$ ,  $s = 0$ ,  $V_w = 0$ , a  $V_s = V$ , — wierzchołek trójkąta  $B_2$  upadnie na  $A$ .



Rys. 298.



Rys. 299.



Rys. 300.

Przy szybkości wirnika przewyższającej synchronizm, siła elektromotoryczna w wirniku odwraca się, w porównaniu do jej kierunku przy biegu poniżej synchronizmu, różnica faz jednak pomiędzy napięciami stojana i wirnika pozostaje niezmienna  $\alpha$ . A więc np. przy szybkości wirnika dwa razy większej od szybkości synchronicznej:

$$n_w = 2n_p \quad s = -1 \quad V_w = V_s$$

wierzchołek trójkąta będzie w  $B_3$ , gdyż teraz  $\hat{V} = \hat{V}_s - \hat{V}_w$ .

Przy dalszem zwiększaniu się szybkości, napięcie na wirniku rośnie, a więc na stojanie maleje. Przy szybkości nieskończenie wielkiej:

$$V_w = V \quad V_s = 0$$

i wtedy wierzchołek trójkąta znajdzie się w  $B_1$ .

### 158. Prąd w powyższym silniku.

Na szczególną uwagę zasługuje sprawa przesunięcia fazy prądu, zasilającego silnik, względem napięcia sieci.

Rozważmy jedną z faz uzwojenia stojana i uprzytomnijmy sobie, że, gdy prąd w tej fazie jest maksymalny, to amplituda strumienia wirującego stojana przechodzi przez środek cewek tej fazy. Strumień zaś wypadkowy będzie miał swą amplitudę w tym miejscu później, odpowiednio do różnicy faz pomiędzy  $\Phi_s$  i  $\Phi$ , rys. 297, która wynosi  $\frac{\alpha}{2}$ <sup>1)</sup>.

Siła elektromotoryczna, indukowana w tych cewkach strumieniem wypadkowym, opóźnia się w fazie o ćwierć okresu ( $90^\circ$ ) względem zmienności strumienia wewnątrz cewek, przeto względem prądu w stojanie ta siła elektromotoryczna będzie opóźniona o  $90^\circ + \frac{\alpha}{2}$ , a napięcie stojana, które jest przeciwne sile elektromotorycznej będzie wyprzedzało prąd o kąt:

$$180^\circ - \left(90^\circ + \frac{\alpha}{2}\right) = 90^\circ - \frac{\alpha}{2}$$

Znając więc fazę napięcia stojana względem napięcia sieci możemy wyznaczyć fazę prądu względem napięcia sieci. Fazę napięcia stojana względem napięcia sieci wyznaczamy z rys. 300.

Na rys. 301-ym wskazane są trzy charakterystyczne położenia wektora prądu i wektora napięcia stojana  $V_s$  względem wektora napięcia sieci  $V$ , zachowując pomiędzy  $V_s$  i  $I$  zawsze tę samą różnicę faz  $90^\circ - \frac{\alpha}{2}$ .

$V_s'$  i  $I'$  odpowiadają silnikowi nieruchomemu, w tym przypadku różnica faz pomiędzy  $I'$  i  $V$ , które zawsze jest skierowane wzdłuż  $AC$ , wynosi  $90^\circ$ , w tych warunkach silnik nie wykonywa pracy mechanicznej i z sieci energii nie pobiera<sup>2)</sup>.

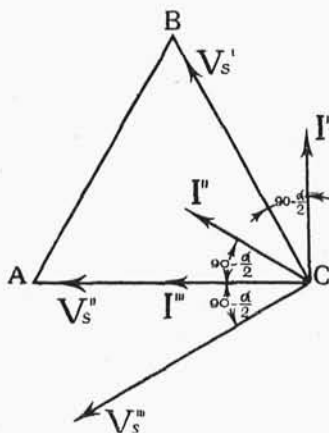
<sup>1)</sup> Przyjmując, że  $\Phi_m = \Phi_s$ .

<sup>2)</sup> Straty tu pominięto.

W biegu synchronicznym wektory prądu i napięcia na stojanie przybierają położenie  $V_s''$  i  $I''$ , różnica faz pomiędzy  $I''$  i  $V$  wynosi  $90^\circ - \frac{\alpha}{2}$ . Jeżeli np.  $\alpha = 150^\circ$ , to  $90^\circ - \frac{\alpha}{2} = 15^\circ$  i współczynnik mocy prądu będzie:

$$\cos 15^\circ = 0,97$$

Przy szybkości dwa razy większej od synchronicznej, wektory rozważane przyjmują położenie  $V_s'''$  i  $I'''$ . Prąd i napięcie sieci są teraz w fazie.



Rys. 301.

### 159. Moment obrotowy trójfazowego szeregowego silnika komutatorowego.

Moment obrotowy obliczymy, uwzględniając oddziaływanie wypadkowego strumienia magnetycznego  $\Phi$  na prądy w wirniku.

Wobec tego, że prąd wirnikowy wytwarza strumień magnetyczny stały  $\Phi_w$  nieruchomy względem strumienia  $\Phi$ , to możemy sobie wystawić na wirniku zastępcze uzwojenie z prądem stałym, którego oś będzie zgodna z kierunkiem  $\Phi_w$ , wytwarzające ten strumień, rys. 297-my str. 241. Oddziaływanie strumienia magnetycznego  $\Phi$  na to uzwojenie, według wzorów na moment obrotowy silników prądu stałego, będzie proporcjonalne do składowej



strumienia  $\Phi$ , prostopadłej do kierunku osi uzwojenia<sup>1)</sup>, oraz do natężenia prądu w tym uzwojeniu, a więc do strumienia magnetycznego  $\Phi_w$ .

Wprowadzając stały czynnik  $K$ , będziemy mieli wzór:

$$M = K \Phi \sin \frac{\alpha}{2} \Phi_w$$

Z rys. 297 na str. 241 widzimy, że:

$$\Phi_w = \frac{1}{2} \Phi \frac{1}{\cos \frac{\alpha}{2}}$$

Więc:

$$M = K' \Phi^2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

W tym wzorze możemy strumień magnetyczny wypadkowy  $\Phi$  zastąpić napięciem prądu, zasilającego silnik, na zasadzie następujących przesłanek.

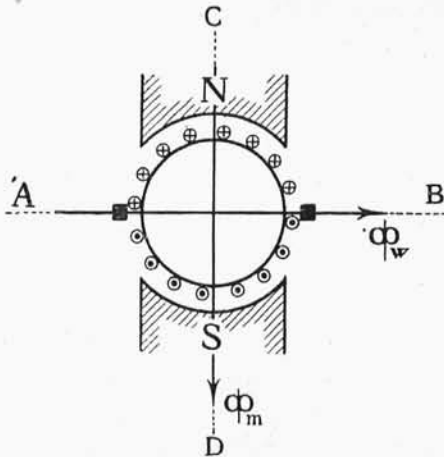
Napięcie na stojanie  $V_s$  jest proporcjonalne do strumienia  $\Phi$  i może być wyrażone wzorem:

$$V_s = K^{III} \Phi$$

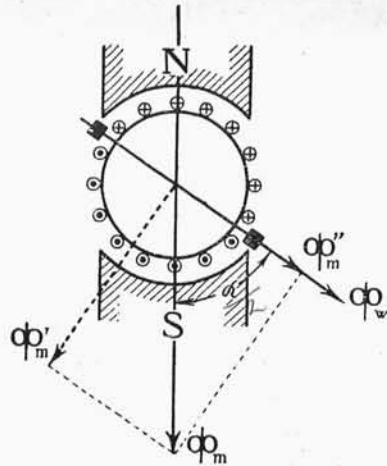
Wobec tego

$$M = K^{IV} V_s^2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}$$

<sup>1)</sup>



Rys. 302.



Rys. 303.

Na rys. 302-im cały strumień  $\Phi_m$  daje moment obrotowy, a na rys. 303-im moment obrotowy daje tylko składowa  $\Phi'_m$ .

Z trójkąta na rys. 299.

$$V^2 = V_s^2 + V_w^2 + 2 V_s V_w \cos \alpha$$

$$\frac{V_w}{V_s} = s$$

stąd: 
$$\frac{V^2}{V_s^2} = 1 + s^2 + 2s \cos \alpha$$

Więc:

$$V_s^2 = \frac{V^2}{1 + s^2 + 2s \cos \alpha}$$

Przeto:

$$M = K^{IV} \frac{V^2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}{1 + s^2 + 2s \cos \alpha}$$

Wzór ten wskazuje, że moment jest proporcjonalny do drugiej potęgi napięcia sieci. Pozatem wyraża zależność momentu  $M$  od kąta pomiędzy strumieniami magnetycznymi stojana i wirnika, oraz zależność  $M$  od szybkości wirowania wirnika  $n_w$ , gdyż:

$$s = \frac{n_p - n_w}{n_p}$$

Kąt  $\alpha$  zwykle bywa większy od  $90^\circ$ , przeto  $\cos \alpha < 0$ , w tych warunkach funkcja  $M$  od  $s$  ma maksimum. Wtedy w trójfazowym szeregowym silniku komutatorowym, podobnie jak w zwykłym silniku trójfazowym indukcyjnym asynchronicznym, moment obrotowy przy pewnych szybkościach przechodzi przez maksimum i przy dalszem zmniejszaniu się szybkości maleje w miarę zwalniania biegu, co sprawia, że bieg silnika jest tu chwiejny.

Można jednak łatwo tej chwiejności uniknąć, przesuując odpowiednio punkt  $B_1$  na obwodzie koła, rys. 300, przez odpowiednie powiększenie liczby zwojów stojana tak, aby w spoczynku wypadło  $V_s > V_w$  <sup>1)</sup>.

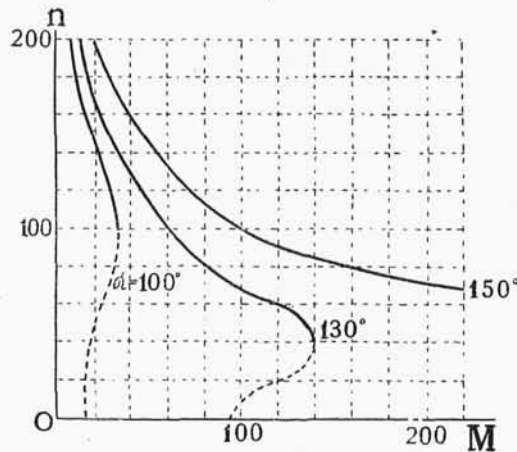
Wynika to z rozważenia wykresu na rys. 300, uwzględniając, że przy stałym  $\alpha$  moment obrotowy jest proporcjonalny do  $V_s^2$ .

Na rys. 304-y mamy trzy charakterystyczne wykresy, wyrażające zmienność szybkości wirowania silnika w zależności od momentu obrotowego przy różnych kątach  $\alpha$ . Liczby na osiach rzędnych i odciętych wyrażają w odsetkach od normalnej szyb-

<sup>1)</sup> W praktyce, dla osiągnięcia większego  $\cos \alpha$  przy biegu synchronicznym, rezygnujemy z tego i robimy liczbę amperozwojów wirnika o 10 — 15% większą od amperozwojów stojana.

kości i normalnego momentu <sup>1)</sup> odpowiednie wartości  $n$  i  $M$ . Kropkowane części linii odpowiadają zakresom biegu chwiejnego.

Najbardziej charakterystyczną zależnością dla tego silnika jest wpływ kąta  $\alpha$  na wielkość momentu obrotowego. Ze wzoru na str. 247 wynika, że przy  $\alpha=0$ , mamy  $M=0$ ; to znaczy, że gdy szczotki na komutatorze są postawione w ten sposób, iż pola stojana i wirnika się pokrywają, to momentu obrotowego nie ma i silnik nie ruszy.



Rys. 304.

Przy przesuwaniu szczotek z tego położenia, tak zwanego zerowego, powstaje moment obrotowy, znak którego zależy od kierunku przesunięcia szczotek, jak to wynika ze wzoru na str. 247, gdy uczynimy raz  $\alpha > 0$ , a drugi raz  $\alpha < 0$ .

Strumień magnetyczny stojana stara się przyciągnąć do siebie strumień wirnika, przez co wirnik wiruje zawsze w kierunku odwrotnym do kierunku przesuwania szczotek, rys. 305 i 306.

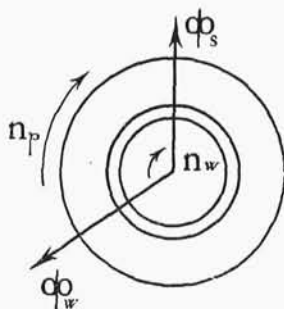
Natomiast kierunek wirowania pól jest zawsze taki sam. Wobec tego, np., na rys. 306-ym wirnik wiruje odwrotnie do kierunku wirowania pól.

Wtedy powstają znaczne straty w żelazie wirnika i znaczna siła elektromotoryczna w zwojach zwartych pod szczotkami. Dla uniknięcia tego, takie silniki biegają normalnie w kierunku wirowania pól.

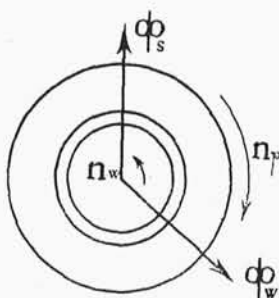
<sup>1)</sup> Normalna szybkość i normalny moment  $100\%$  wzięte są przy  $\alpha = 150^\circ$

Chcąc zmienić kierunek biegu silnika, należy nie tylko przesunąć szczotki w przeciwną stronę od położenia zerowego, ale trzeba jeszcze zmienić kierunek wirowania pól przez przełączenie dwóch faz.

Szybkość biegu silnika przy stałym momencie obrotowym reguluje się zapomocą przesuwania szczotek na komutatorze.



Rys. 305.



Rys. 306.

## 160. Wpływ transformatora pomiędzy stojanem i wirnikiem na bieg silnika.

Jeżeli transformator ma rdzenie słabo nasyczone, to nie ma on wpływu żadnego na bieg silnika.

Przy dużym nasyceniu prąd magnesujący jest znaczny i prąd w stojanie oprócz prądu równoważnego wtórnemu prądowi zawiera jako składową ten prąd magnesujący transformatora.

Z tego powodu stosunek pomiędzy strumieniami stojana i wirnika ulega zmianie. Wykresy na rys. 304 stają się bardziej płaskie.

Wielkość transformatora musi być przystosowana tylko do mocy elektrycznej prądu w wirniku.

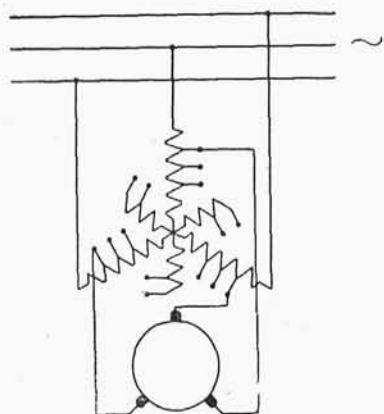
## 161. Trójfazowy silnik komutatorowy bocznikowy.

Stojan takiego silnika posiada układ uzwojeń w gwiazdę i jest bezpośrednio połączony z siecią, a szczotki wirnika mają połączenie ze stojanem w odgałęzieniu, rys. 307.

Przy takim układzie połączeń uzwojenie stojana odgrywa względem wirnika rolę autotransformatora.

Łącząc szczotki wirnika z różnymi miejscami uzwojenia stojana, można zmieniać wielkość i fazę napięcia na szczotkach.

Silnik tego rodzaju ma charakterystykę zależności szybkości biegu od obciążenia podobną do tej, którą mają silniki boczniowe prądu stałego.



Rys. 307.

Szybkość biegu tych silników, przy stałym momencie obrotowym, reguluje się, zmieniając skokami napięcie na wirniku, przez przyłączanie szczotek do różnych odgałęzień uzwojenia stojana.