



ROZDZIAŁ X.

SILNIKI ASYNCHRONICZNE JEDNOFAZOWE.

143. Zasada ustroju i działania.

Silnik asynchroniczny jednofazowy ma stojan z uzwojeniem jednofazowym, natomiast wirnik zwykle trójfazowy z pierścieniami lub też zwarty, zupełnie taki sam, jak w silnikach asynchronicznych trójfazowych.

Strumień magnetyczny, wywołany prądem stojana, jest tu nieruchomy w przestrzeni i zmienny w czasie. Przy zachowaniu oznaczeń, stosowanych w § 114-ym dla gęstości linii na obwodzie stojana będziemy mieli wyraz:

$$B_{tx} = \bar{B} \sin \omega t \cos \frac{\pi}{\tau} x$$

Wzór ten wyraża, że gęstość ta na obwodzie stojana jest cosinusoidalnie rozłożoną, i amplituda w czasie sinusoidalnie zmienną, położenie zaś amplitudy na obwodzie jest niezmiennie. Taki strumień magnetyczny może być rozłożony na dwa strumienie wirujące po obwodzie z synchroniczną szybkością w kierunkach przeciwnych.

Amplituda każdego z tych strumieni stanowi połowę amplitudy strumienia wypadkowego.

Wzory na gęstość linii takich wirujących strumieni w zależności od czasu i miejsca na obwodzie stojana, mają postać następującą:

$$B'_{tx} = \frac{1}{2} \bar{B} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x \right) \quad B''_{tx} = \frac{1}{2} \bar{B} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right)$$

Zapomocą trygonometrycznego przekształcenia łatwo przekonać się, że:

$$B_{tx} = B'_{tx} + B''_{tx}$$

Składowe strumienie wirujące wywołują w wirniku odpowiednie prądy indukowane.

Prądy te, powstające w uzwojeniach trójfazowych wirnika, dają strumienie magnetyczne, wirujące z taką samą szybkością w odpowiednich kierunkach. Stąd w szczelinie pomiędzy wirnikiem a stojanem mamy strumień wypadkowy podwójny, jeden wirujący w prawo, drugi w lewo.

Momenty obrotowe, wywołane przez oddziaływanie tych strumieni magnetycznych na prądy w nieruchomym wirniku, znoszą się, gdyż każdy ze strumieni stara się pociągnąć wirnik w kierunku swego ruchu.

Przeto moment rozruchowy silnika jednofazowego asynchronicznego równa się zeru; silnik sam z miejsca nie rusza. Gdy w jakikolwiek sposób wprowadzimy w ruch obrotowy w dowolną stronę wirnik silnika, to oddziaływanie pól wirujących na indukowane przez siebie prądy zmienia się. Moment obrotowy, wywołany oddziaływaniem strumienia magnetycznego, wirującego w tę samą stronę, co wirnik, wzrasta, natomiast moment obrotowy, wywołany oddziaływaniem strumienia magnetycznego, wirującego w stronę przeciwną względem kierunku wirowania wirnika, maleje. Stąd powstaje różnica, stanowiąca pewien moment obrotowy, działający w kierunku wirowania wirnika. Dokładniejsze zbadanie właściwości momentu obrotowego silnika jednofazowego asynchronicznego można przeprowadzić na podstawie wzorów na moment obrotowy dla obu strumieni, uwzględniając, że strumienie będą równe tylko przy rozruchu i, że poślizg wirnika względem strumienia magnetycznego, wirującego w odwrotną stronę, równa się sumie:

$$n_p + n_w = n_p + n_p - n_s = 2n_p - n_s$$

n_p — szybkość wirowania strumieni,

n_w — „ „ „ wirnika,

n_s — poślizg wirnika względem strumienia magnetycznego, wirującego w tę samą stronę.

Całkowity moment obrotowy silnika jednofazowego przy rozruchu, według wzoru (3) na str. 189, wypada:

$$M = K' \left[\frac{B^2 r n_s}{r^2 + (k n_s L)^2} - \frac{B^2 r (2 n_p - n_s)}{r^2 + [k (2 n_p - n_s) L]^2} \right]$$

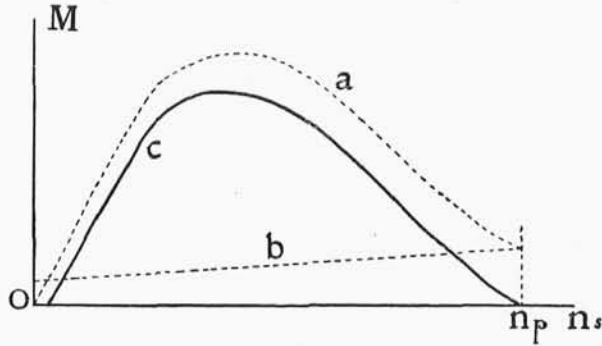
Przy rozruchu $n_s = n_p$, a więc $M = 0$.

Przy synchronizmie strumienie będą różne, ale $n_s = 0$ przeto

$$M = K' \left[- \frac{(B'')^2 r 2 n_p}{r^2 + (k 2 n_p L)^2} \right]$$

Moment wypada tu ujemny, a więc już przed dojściem wirnika do synchronizmu będzie równy zero.

Zależność M od n_s na wykresie wyraża się tak, jak pokazano na rys. 273-im.



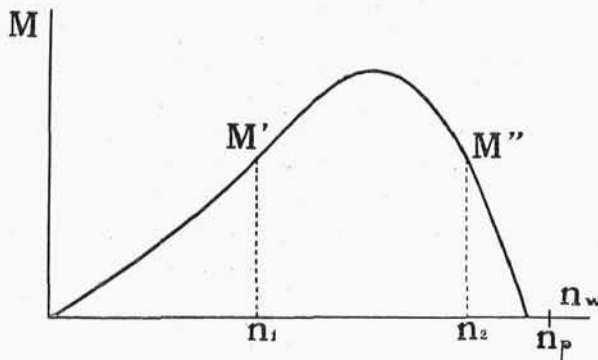
Rys. 273.

Linja a wyraża zależność od n_s większego składnika momentu, linja b — mniejszego składnika, a linja c — różnicę tych dwóch składników.

Jeżeli z tego wykresu wyznaczymy zależność:

$$M = f(n_w)$$

gdzie $n_w = n_p - n_s$ stanowi szybkość wirowania wirnika, to wykres tej zależności przedstawi się tak, jak podano na rys. 274-ym.



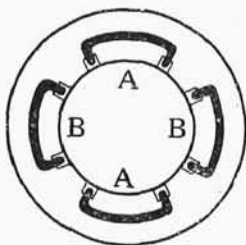
Rys. 274.

Z tego wykresu widzimy, że w miarę zwiększania się szybkości wirowania silnika, moment obrotowy rośnie do pewnego maksimum. Chcąc więc wprowadzić silnik w ruch, wystarczy nadać mu taką szybkość wirowania n_1 , aby moment obrotowy M' , powstający przy tej szybkości, był nieco większy od momentu, hamującego silnik.

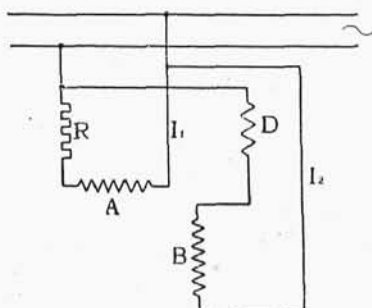
Wtedy szybkość obrotu będzie wzrastała dalej samoczynnie do pewnej wielkości n_2 , która odpowiada momentowi M'' równemu momentowi, hamującemu silnik.

Silniki jednofazowe, przy tych samych wymiarach żelaza, mają mniejszą moc, większy poślizg i mniejszy $\cos \varphi$, niż trójfazowe. Do samoczynnego rozruchu stosuje się pomocnicze uzwojenie na stojanie przesunięte względem głównego o pół podziałki biegunowej. Na rys. 275-ym widzimy położenie uzwojenia głównego i pomocniczego w układzie dwubiegunowym. A, A — cewki uzwojenia głównego, B, B — cewki uzwojenia pomocniczego.

W chwili rozruchu oba uzwojenia łączone są z siecią równolegle, rys. 276.



Rys. 275.



Rys. 276.

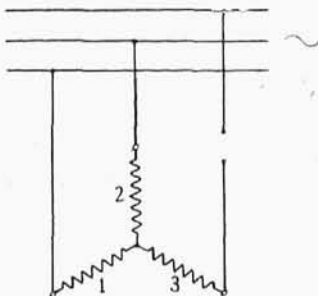
Przytem w obwodzie uzwojenia głównego dodajemy opornik bezindukcyjny R , a w obwodzie uzwojenia pomocniczego dławik D , stanowiący cewkę, nawiniętą na żelazie i posiadającą znaczną indukcyjność. Prądy I_1 i I_2 mają różnicę faz, gdyż I_2 więcej spóźnia się względem napięcia sieci niż I_1 . Z tego powodu i strumień magnetyczny, wywołany temi prądami, mają różnicę faz, a strumień magnetyczny wypadkowy będzie wirujący o zmiennej amplitudzie. Strumień ten wystarcza do wywołania niewielkiego momentu obrotowego, potrzebnego do rozruchu silnika luzem, czy też przy niewielkim momencie obciążenia.

Po skutecznieniu rozruchu można, zapomocą odpowiedniego przełącznika, wyłączyć fazę pomocniczą i zewrzeć opornik.

Cheąc zmienić kierunek obrotu silnika, należy zmienić kierunek wirowania pola rozruchowego. W tym celu wymieniamy miejsca zamocowania przewodów doprowadzających prąd do jednego z uzwojeń, czy to do uzwojenia głównego czy też pomocniczego.

144. Silnik trójfazowy asynchroniczny z przerwaniem dopływem prądu w jednej fazie.

Gdy z jakiegokolwiek powodu przerwie się połączenie stojana silnika trójfazowego z jednym z przewodów sieci trójfazowej, to w uzwojeniach stojana będziemy mieli prąd jednofazowy, odpowiadający napięciu pomiędzy przyłączonymi przewodami sieci, rys. 277. Wtedy, np., przy połączeniu w gwiazdę, gdy uzwojenie trzeciej fazy jest nieczynne, a pierwsza i druga faza są połączone w szereg na napięcie międzyprzewodowe, to na każde uzwojenie fazowe przypada tylko połowa napięcia międzyprzewodowego zamiast $\frac{1}{\sqrt{3}}$, jak to było przy połączeniu silnika z trzema przewodami sieci.



Rys. 277.

Jeżeli silnik stoi, to oczywiście nie ruszy; jeżeli natomiast jest w ruchu, to w dalszym ciągu będzie biegł, ale z większym poślizgiem. Przytem silnik będzie brał z sieci większy prąd niż normalnie, jest zatem obawa, że czynne uzwojenia mogą być uszkodzone¹⁾. Nie należy więc używać silników trójfazowych, jako jednofazowych, przy normalnej pracy.

Cechą charakterystyczną silnika trójfazowego z przerwaną fazą jest znacznie silniejszy brzęk blach żelaznych w porównaniu do stanu pracy na trzech fazach.

¹⁾ Silnik często grzeje się nadmiernie.

ROZDZIAŁ XI.

SILNIKI KOMUTATOROWE PRĄDU ZMIENNEGO.

145. Wirnik z komutatorem w zmiennym polu magnetycznym.

Oprócz silników indukcyjnych, poprzednio rozważonych, znajdują zastosowanie jeszcze silniki na prąd zmienny z wirnikami, zbudowanymi zupełnie tak samo, jak tworniki maszyn prądu stałego z komutatorami. Magneśnica tych silników, mająca oczywiście rdzeń z blach żelaznych, bywa czasem uzwojona podobnie, jak na prąd stały, cewkami o zwojach skupionych, przeważnie jednak uznaje się cewkami rozłożonymi na kilka żłobków. Prąd tak w magneśnicy, jak i w tworniku jest tu zmienny. Dla łatwiejszego zorientowania się w działaniu tych silników rozważymy siły elektromotoryczne, jakie powstają w wirniku z komutatorem, gdy on się znajduje w zmiennym polu magneśnicy.

Dla ułatwienia wyobraźni będziemy mieli na myśli zwykłe uzwojenie pierścieniowe, pamiętając, że to samo się stosuje do każdego uzwojenia bębnowego.

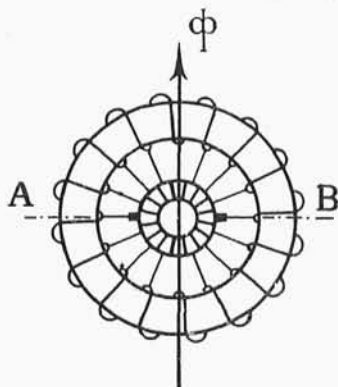
Zastanawiając się nad działaniem zmiennego strumienia magneśnicy na uzwojenie wirnika, łatwo spostrzeżemy, że mamy tu zjawisko podwójnej indukcji.

Gdy wirnik, znajdujący się w okresowo zmiennym polu magnetycznym, jest w ruchu, to mamy zwykłe indukowanie siły elektromotorycznej skutkiem ruchu przewodników względem linii magnetycznych magneśnicy, a oprócz tego wzniesienie siły elektromotorycznej w uzwojeniach wirnika jako we wtórnych zwojach transformatora, skutkiem zmienności strumienia magnetycznego w czasie.

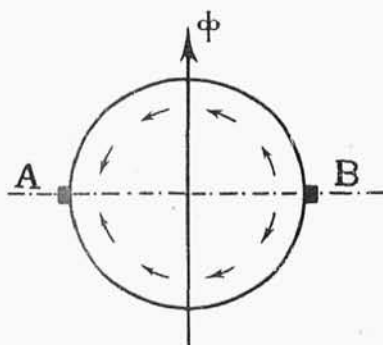
Rozpatrzmy obie te siły elektromotoryczne osobno.

146. Siła elektromotoryczna ruchu.

Gdy wirnik wiruje w zmiennym strumieniu magnetycznym, rys. 278, to układ sił elektromotorycznych w poszczególnych zwojach mamy taki sam, jak przy prądzie stałym, rys. 279. Siły te



Rys. 278.



Rys. 279.

układają się w dwóch równoległych gałęziach, dając napięcie na szczotkach, umieszczonych wzdłuż linii AB , prostopadłej do osi strumienia magnetycznego. Wynika to stąd, że te siły elektromotoryczne powstają przez przecinanie strumienia magnetycznego przez druty twornika w ruchu.

Te siły elektromotoryczne różnią się jednak od sił elektromotorycznych przy strumieniu magnetycznym stałym tem, że są zmienne w czasie; liczba okresów zmienności jest równa częstotliwości zmian strumienia magnetycznego, a więc i prądu, magnesującego tę magnesnicę. Faza zmienności tych sił elektromotorycznych wirnika jest zgodna z fazą zmienności strumienia magnetycznego, gdyż chwilowa siła elektromotoryczna, powstająca przy ruchu przewodnika w polu magnetycznym, jest proporcjonalna do chwilowej gęstości linii magnetycznych. A zatem, gdy ta gęstość jest największa, to i siła elektromotoryczna wypadnie największa.

Skuteczna wartość siły elektromotorycznej ruchu, powstającej w uzwojeniu wirnika w polu $2p$ — biegunowem przy $2a$ — równoległych gałęziach w uzwojeniu, będzie:

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \Phi_m z \frac{n}{60} \frac{p}{a} 10^{-8}$$

Φ_m jest to maksymalna wartość strumienia magnetycznego, wychodzącego z jednego bieguna,

z — liczba drutów na obwodzie wirnika,

n — liczba obrotów na minutę.

147. Siła elektromotoryczna transformacji.

Czy wirnik stoi, czy wiruje w zmiennem polu magnetycznem, zawsze w jego uzwojeniu, jak we wtórnem uzwojeniu transformatora, powstaje siła elektromotoryczna, niezależna zupełnie od szybkości wirowania, natomiast proporcjonalna do częstotliwości zmian strumienia magnetycznego.

Ogólny wyraz tej siły elektromotorycznej będzie:

$$E = k z f \Phi_m 10^{-8}$$

k — współczynnik, zależny od rozkładu gęstości linii magnetycznych na obwodzie wirnika,

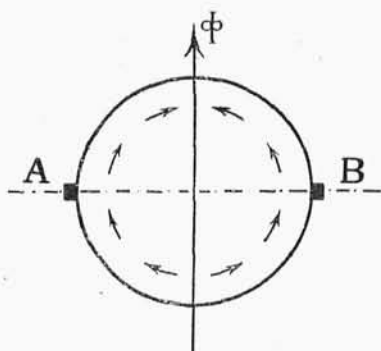
z — liczba drutów na wirniku,

f — częstotliwość zmian strumienia,

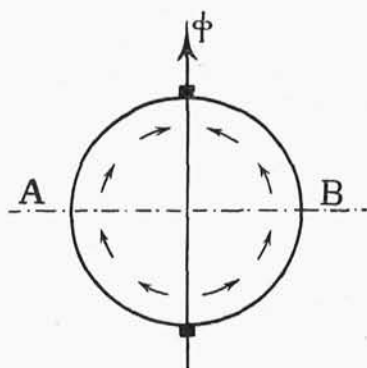
Φ_m — maksymalna wartość strumienia magnetycznego magnesnicy.

Pomiędzy strumieniem magnetycznym i tą siłą elektromotoryczną jest różnica faz, równa ćwierci okresu, gdyż siła elektromotoryczna, indukowana zmiennym strumieniem magnetycznym, zawsze opóźnia się względem indukującego strumienia o 90° .

Rozkład sił elektromotorycznych w poszczególnych zwojach widzimy na rys. 280-ym.



Rys. 280.



Rys. 281.

Na szczotkach, umieszczonych wzdłuż osi AB , te siły elektromotoryczne nie dają napięcia, gdyż ich działanie w poszczególnych gałęziach uzwojenia twornikowego znosi się.

Natomiast otrzymamy napięcie pomiędzy szczotkami, ustawionymi wzdłuż osi strumienia magnetycznego, prostopadłe do kierunku $A - B$, rys. 281.

148. Szeregowy silnik komutatorowy na prąd zmienny.

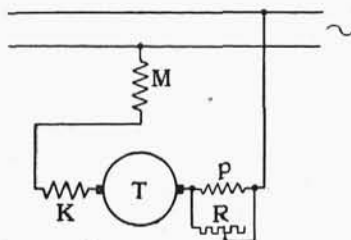
Jeżeli doprowadzimy prąd zmienny do zwykłego silnika szeregowego, zbudowanego na prąd stały, to otrzymamy również pewien moment obrotowy, gdyż przy zmianie kierunku prądu w magneśnicy zmienia się także kierunek prądu w tworniku, a przez to kierunek siły oddziaływania magneśnicy na twornik pozostaje bez zmiany. Wielkość momentu będzie okresowo zmienna, odpowiednio do zmiany natężenia prądu.

Zwykły jednak silnik, zbudowany na prąd stały, nie może pracować przy prądzie zmiennym przede wszystkim dlatego, że pełne rdzenie elektromagnesów i jarzmo, będą siedliskiem silnych prądów wirowych, wywołujących znaczne osłabienie strumienia magnetycznego magneśnicy, a przez to i momentu obrotowego, oraz sprawiających wielkie straty energii.

Budowa komutatorowych silników szeregowych na prąd zmienny różni się od budowy silników na prąd stały przede wszystkim konstrukcją magneśnicy.

W silnikach prądu zmiennego magneśnica buduje się w postaci pierścienia z blach żelaznych, ujętego w lanym kadłubie, tak samo, jak w stojanie silników asynchronicznych. Na wewnętrznej powierzchni tego pierścienia są żłobki, w których umieszcza się odpowiednie uzwojenie magneśnicy.

Twornik silników komutatorowych na prąd zmienny buduje się w zasadzie tak samo, jak na prąd stały, tylko z nieco większą liczbą wycinków komutatora w celu zmniejszenia liczby zwojów, a więc i indukcyjności zwojnic pomiędzy dwoma wycinkami. Wymagają tego warunki dobrej komutacji przy zwarcu zwojnic przez szczotki.



Rys. 282.

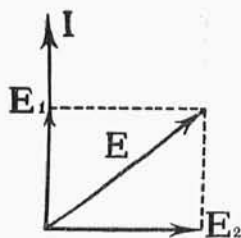
Dla zmniejszenia indukcyjności obwodu elektrycznego silniki tego rodzaju, za wyjątkiem małych, zaopatruje się w dodatkowe uzwojenie na magneśnicy, tak zwane kompensacyjne, które daje pole magnetyczne odwrotne do pola twornika.

Całkowity układ połączeń silnika szeregowego komutatorowego na prąd zmienny pokazany jest na rys. 282-im. T —twornik z komutatorem, M —uzwojenie magneśnicy główne, K —uzwojenie kompensacyjne, umieszczone również na magneśnicy, P —uzwojenie biegunów pomocniczych, R —opornik bezindukcyjny, włączony równolegle do powyższego uzwojenia.

149. Komutacja w szeregowym silniku komutatorowym.

Szczególnie trudnem w silnikach tego rodzaju jest uniknięcie iskier pod szczotkami. W zwojnicy, zwartej przez szczotkę, powstają tu dwie siły elektromotoryczne: jedna skutkiem zmiany kierunku prądu w zwojnicy przy przejściu z jednej strony szczotki na drugą tak samo, jak to bywa w maszynach prądu stałego i druga siła elektromotoryczna, wywołana zmiennością strumienia magneśnicy objętego przez tę zwojnicę. Pierwsza siła elektromotoryczna jest zależna od szybkości wirowania twornika: gdy twornik stoi, równa się ona zeru; gdy biegnie, jest proporcjonalna do szybkości wirowania. Natomiast siła elektromotoryczna druga ma wielkość, niezależną od szybkości wirowania.

Dla zorientowania się w jaki sposób można zrównoważyć te dwie siły elektromotoryczne, aby uniknąć znacznych prądów przy zwarcu zwojnicy przez szczotkę, należy zdać sobie sprawę z fazy powyższych sił elektromotorycznych względem nierozgałęzionego prądu, płynącego przez twornik i magneśnicę, rys. 283. Pierwsza siła elektromotoryczna czyli siła elektromotoryczna komutacyjna E_1 jest wprost proporcjonalna do wielkości prądu, zmieniającego kierunek wskutek przejścia zwojnicy pod szczotką; przeto, gdy mamy do czynienia z prądem zmiennym, jest zgodna w fazie z jego zmiennością.

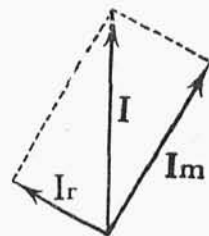


Rys. 283.

Natomiast druga siła elektromotoryczna, tak zwana transformacyjna, E_2 jest przesunięta w fazie względem indukującego prądu o ćwierć okresu wstecz. Suma geometryczna tych sił elektromotorycznych E stanowi całkowitą siłę elektromotoryczną w zwartej zwojnicy.

Do zrównoważenia tej siły elektromotorycznej używamy biegunów pomocniczych, wzbudzanych prądem twornika, jednakże nie całym, lecz odgałęzionym od równoległe włączonego oporu

omowego, rys. 282, gdyż tylko wtedy prąd biegunów pomocniczych będzie miał właściwą fazę. Na rys. 284-ym widzimy układ wektorów prądów przy rozgałęzieniu. I — prąd przed rozgałęzieniem, I_r — prąd w oporze bezindukcyjnym, I_m — prąd, wzbudzający magnesy pomocnicze, których uzwojenie ma oporność omową bardzo małą.



Rys. 284.

Prąd I_m wytwarza strumień magnetyczny komutacyjny w fazie z własną zmiennością, a więc opóźniony względem całkowitego prądu I . Ten strumień komutacyjny wywołuje siłę elektromotoryczną, indukowaną skutkiem ruchu twornika, mając zatem wartość maksymalną w chwili, gdy prąd magnesujący I_m jest największy, a przeto zgodną w fazie z prądem I_m i opóźnioną w fazie względem całkowitego prądu I . Taka siła elektromotoryczna, przy zastosowaniu odpowiedniego oporu R oraz przy nadaniu strumieniowi komutacyjnemu odpowiedniego kierunku, będzie miała fazę przeciwną do fazy poprzedniej wypadkowej siły elektromotorycznej w zwartej zwojnicy, rys. 283, i przeto zrównoważy jej działanie. Wzbudzenie biegunów pomocniczych i wielkość oporu R , dobrane dla pewnej szybkości biegu silnika i pewnego obciążenia, będą dobre i dla innego obciążenia, lecz przy zachowaniu tej samej szybkości biegu, gdyż wszystkie rozważane siły elektromotoryczne wzrastają proporcjonalnie do natężenia prądu; natomiast przy zmianie szybkości wirowania równowaga sił elektromotorycznych będzie naruszona, gdyż jedna z nich zupełnie nie zależy od szybkości ruchu wirnika. Najgorsze warunki będziemy mieli w chwili rozruchu, gdyż wtedy magnesia będzie wzbudzała w nieruchomej zwartej zwojnicy siłę elektromotoryczną transformacyjną, bieguny zaś pomocnicze w nieruchomej zwartej zwojnicy siły elektromotorycznej nie wzniciąją.

Dla zmniejszenia do możliwych granic prądów zwarcia, wywołanych siłą elektromotoryczną transformacyjną przy rozruchu, w silnikach komutatorowych, uzwojenie twornika bywa dzielone na wielką liczbę zwojnic, z których każda ma niewielką indukcyjność. Stąd wynika wielka liczba wycinków komutatora ¹⁾. Poza tem, dla zmniejszenia prądów zwarcia, bywają niekiedy włączane niewielkie opory pomiędzy zwojnice twornika, a wycinki komutatora.

Z tego samego względu, t. j. w celu zmniejszenia powyższej siły elektromotorycznej, do dużych silników komutatorowych,

¹⁾ Siła elektromotoryczna transformacji, wywołana przez strumień magnetyczny magnesia wynosi zazwyczaj około 3 woltów w jednej zwojnicy.

np. kolejowych, bywa stosowany prąd zmienny o niskiej częstotliwości $16\frac{2}{3}$ lub 25 okresów na sekundę; wiadomo bowiem, że siła elektromotoryczna, indukowana w cewce zmiennym strumieniem magnetycznym, wyraża się wzorem:

$$E = 4,44 f z \Phi_m 10^{-8}$$

f — częstotliwość zmian strumienia magnetycznego,

Φ_m — maksymalna wartość strumienia magnetycznego, obiegającego przez każdy zwój cewki.

z — liczba zwojów cewki.

A więc, im mniejsze będzie f , tem mniejsze wypadnie E .

Aby zmniejszyć strumień indukujący powyższą siłę elektromotoryczną, bierzemy w rozważanych silnikach moc maszyny, obliczoną na jeden biegun, mniejszą, niż w innych maszynach.

Ze względu na ograniczenie liczby zwojów w jednej zwojnicy twornika, tworniki silników komutatorowych buduje się zazwyczaj przy $f = 16\frac{2}{3}$, najwyżej na napięcie do 500 woltów, przy $f = 25$ — do 300 woltów i przy $f = 50$ — do 100 woltów.

Szczotki są używane twarde, mające znaczną oporność w styku z komutatorem.

150. Moment obrotowy i współczynnik mocy, szeregowego silnika komutatorowego.

Moment obrotowy średni takiego silnika da się oczywiście wyrazić wzorem:

$$M = K \Phi I$$

Tu K — stały czynnik zależny od budowy silnika, Φ — skuteczna wartość strumienia magnetycznego magnesnicy, I — skuteczna wartość natężenia prądu w tworniku, przytem należy pamiętać, że Φ i I są niemal w fazie.

Φ jest tu niemal proporcjonalne do prądu I , a napięcie sieci niemal równoważy siłę elektromotoryczną w tworniku, która jest proporcjonalna do szybkości wirowania, podobnie jak w silniku na prąd stały, więc zależność szybkości wirowania silnika komutatorowego od obciążenia wyraża się takim samym wykresem jak dla zwykłego silnika szeregowego prądu stałego.

Regulacja szybkości biegu komutatorowych silników szeregowych odbywa się zazwyczaj zapomocą zmiany napięcia prądu, zasilającego silnik, przez włączenie pomiędzy sieć a silnik trans-

formatora stopniowego. Straty przytem są małe, tak że regulacja jest oszczędna. Ze względu na osiągnięcie dobrej komutacji, granice regulacji szybkości znajdują się zwykle pomiędzy 20% i 150% szybkości normalnej przy pełnem obciążeniu.

Dla osiągnięcia normalnego momentu przy rozruchu wystarcza napięcie wynoszące 45 do 50% napięcia normalnego.

Rozważając siły elektromotoryczne, powstające w tworniku szeregowego silnika komutatorowego, łatwo spostrzec, że napięcia na szczotkach mogą wytworzyć tylko siły elektromotoryczne, powstające skutkiem ruchu twornika w polu magnesnicy; natomiast siły elektromotoryczne, indukowane zmiennością pola magnesnicy, równoważą się względem szczotek i nie mają wpływu na napięcie na szczotkach.

W tych warunkach napięcie sieci równa się sumie geometrycznej omowych i indukcyjnych spadków napięć oraz siły elektromotorycznej w tworniku z odwrotnym znakiem.

Spadek omowy jest zgodny w fazie z prądem, spadek indukcyjny wyprzedza prąd w fazie o ćwierć okresu, a siła elektromotoryczna ruchu w tworniku co do fazy jest przeciwna prądowi¹⁾.

Wobec tego:

$$V = \sqrt{(Ir + E)^2 + (Ix)^2}$$

Ir — spadek napięcia omowy,

Ix — „ „ indukcyjny,

E — siła elektromotoryczna w tworniku.

W tych warunkach współczynnik mocy prądu w takim silniku będzie:

$$\cos \varphi = \frac{Ir + E}{V} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{Ix}{Ir + E}$$

Gdy, przy stałym napięciu na sieci, będziemy silnik stopniowo obciążać coraz więcej, to szybkość biegu maleje, skutkiem tego E maleje, a I rośnie, wtedy, jak widać ze wzoru na $\operatorname{tg} \varphi$, kąt φ rośnie, a więc $\cos \varphi$ maleje, przeto współczynnik mocy przy zwiększaniu obciążenia maleje. Tak np. w pewnym silniku, przy zwiększeniu obciążenia od 50% do 160% obciążenia normalnego, przy stałym normalnem napięciu sieci zasilającej, $\cos \varphi$ zmniejszył się od 0,92 do 0,8. Przy napięciu obniżonem spadek $\cos \varphi$ wypada jeszcze większy.

¹⁾ Różnica faz prądu i siły elektromotorycznej wynosi 180°.