

HENRYK WOSIŃSKI

Katedra Napędu Elektrycznego

WŁASNOŚCI EKSPLOATACYJNE KOMUTATOROWEGO SILNIKA
PRĄDU ZMIENNEGO TYPU SCHRAGE

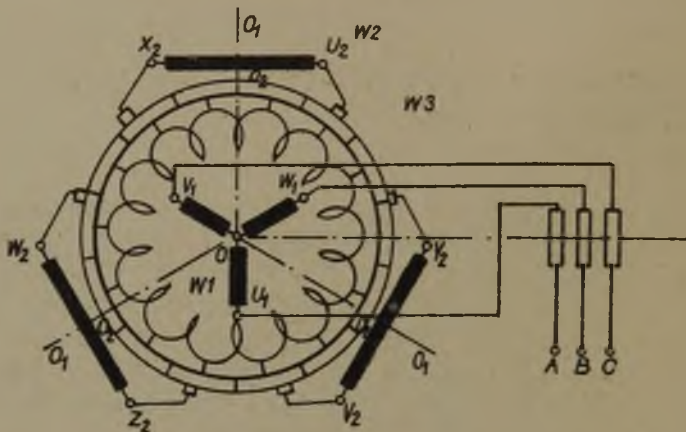
Streszczenie. W referacie omówiono charakterystyki mechaniczne silnika komutatorowego prądu zmiennego typu Schrage dla dużego zakresu regulacji prędkości obrotowej oraz podano jego charakterystyki sprawności i współczynnika mocy. Porównano silnik z innymi często używanymi układami napędowymi o regulowanej prędkości obrotowej.

1. W s t ę p

Zwiększenie zapotrzebowania na silniki małych i średnich mocy do układów napędowych z regulowaną prędkością obrotową zwróciło w ostatnich latach większą uwagę na silniki komutatorowe prądu zmiennego, pomimo szeregu wad jakimi są: duży ciężar, wysoka cena i konieczność zapewnienia starannej obsługi. Jednak poprawa jakości maszyn komutatorowych prądu zmiennego, zwiększenie ich pewności ruchu oraz zaleta, jaką jest ekonomiczna regulacja prędkości obrotowej, przyczyniły się do wzrostu ich produkcji i do ekspansji w dziedzinie napędów, w której do tej pory mało były stosowane. W niniejszej pracy rozpatrywane są własności eksploatacyjne trójfazowego komutatorowego silnika prądu zmiennego, bocznikowego, zasilanego od strony wirnika - zwanego często silnikiem Schrage (rys. 1).

Silnik posiada w wirniku dwa uzwojenia: W_1 - trójfazowe zasilane poprzez pierścienie ślizgowe napięciem sieci oraz W_3 - typu Gramma połączone z komutatorem. W żłobkach stojana umieszczone jest wielofazowe uzwojenie W_2 (ze względu na polepszoną komutację często liczba faz jest nieparzysta

i większa niż 3). Końcówki każdej fazy połączone są z odpowiednimi parami szczotek na komutatorze. Zasada działa-



Rys. 1

nia silnika typu Schrage oparta jest na pracy odwróconego trójfazowego silnika asynchronicznego, tzn. zasilanego od strony wirnika, do którego w obwód wtórny doprowadza się poprzez szczotki dodatkowe napięcie o częstotliwości poślizgu. Rolę przetwornicy częstotliwości spełnia komutator. Wartość doprowadzonego napięcia i jego przesunięcie fazowe względem SEM indukowanej w uzwojeniu stojana, można regulować poprzez zmianę kąta rozwarcia obu szczotek przyłączonych do końcówek jednej fazy uzwojenia W2 i zmianę osi symetrii szczotek $O-O_2$ względem osi symetrii uzwojenia W2: $O-O_1$ (rys. 1.). Doprowadzone dodatkowe napięcie wpływa na zmianę prędkości obrotowej silnika i jego współczynnik mocy.

2. Równania prądowe i napięciowe silnika

wypadkowy przepływ w szczelinie jest wywołany przez trzy uzwojenia silnika. Równanie przepływów dla przesuniętej osi szczotek przeciwnie do kierunku wirowania wirnika o kąt elektryczny α wyrazi się równaniem:

$$k_1 z_1 \hat{I}_0 = k_1 z_1 \hat{I}_1 - k_2 z_2 \hat{I}_2 + k_3 z_3 \hat{I}_2 e^{j\alpha} \quad (1)$$

gdzie:

- $k_{1,2,3}$ -- współczynniki uzwojeń,
- $z_{1,2,3}$ -- liczba zwojów poszczególnych uzwojeń przy czym z_3 oznacza liczbę zwojów uzwojenia w_3 objętych przez parę szczotek,
- \hat{I}_1 -- prąd w obwodzie pierwotnym (uzwojenie w_1),
- \hat{I}_2 -- prąd w obwodzie wtórnym (uzwojenia w_2 i w_3),
- \hat{I}_0 -- prąd biegu jałowego składający się z prądu magnesującego I_m oraz prądu strat w żelazie I_{Fe} .

Wprowadzając do wzoru (1) przekładnie zwojowe poszczególnych uzwojeń:

$$v'_{21} = \frac{k_2 z_2}{k_1 z_1} \quad v'_{31} = \frac{k_3 z_3}{k_1 z_1} \quad v' = \frac{k_3 z_3}{k_2 z_2}$$

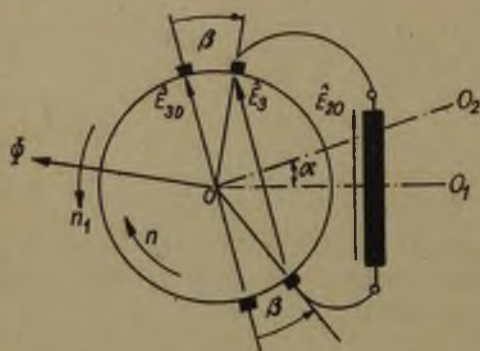
i sprowadzając prąd w obwodzie wtórnym na stronę pierwotną wg:

$$\hat{I}'_2 = v'_{21} \hat{I}_2$$

otrzymamy:

$$\hat{I}_0 = \hat{I}_1 - \hat{I}'_2 [1 - v'(\cos\alpha - j \sin\alpha)] \quad (2)$$

Dla oznaczenia zmiany przekładni \mathcal{V} wprowadzono parametr zmienny - kąt elektryczny regulacji: β (rys. 2) kąt przesunięcia szczotek od położenia diametralnego.



Rys. 2

Dla położenia diametralnego szczotek na komutatorze SEM \hat{E}_3 indukowana w uzwojeniu W_3 i zawarta między nimi wynosi \hat{E}_{3D} . Dla przesuniętych szczotek o kąt regulacji β przy sinusoidalnym rozkładzie indukcji w szczelinie wynosi ona:

$$\hat{E}_3 = \hat{E}_{3D} \cos \beta$$

Oznaczając przez $\mathcal{V}' = \frac{k_3 z_{3D}}{k_2 z_2}$ przekładnię \mathcal{V}' dla położenia diametralnego szczotek otrzymamy $\mathcal{V} = \mathcal{V}' \cos \beta$. Jako zmienne regulowane wpływające na pracę silnika określono

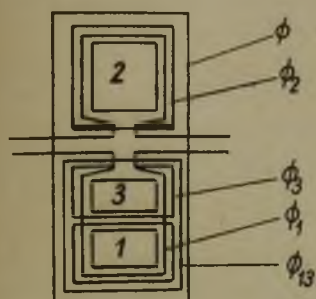
$$c = \mathcal{V}' \cos \alpha = \mathcal{V}' \cos \beta \cos \alpha \quad (3)$$

$$b = \mathcal{V}' \sin \alpha = \mathcal{V}' \cos \beta \sin \alpha$$

Powracając do wzoru (2) otrzymamy równanie prądów silnika:

$$\hat{I}_0 = \hat{I}_1 - \hat{I}_2' (1 - c + jb) \quad (4)$$

W schemacie zastępczym silnika prócz własnych strumieni rozproszenia poszczególnych uzwojeń, trzeba uwzględnić jeszcze strumień rozproszenia obejmujący uzwojenia W1 i W3: ϕ_{13} (rys. 3). Strumień rozproszenia obejmujący uzwojenia W2 i W3 pomijamy, ze względu na jego długą drogę w powietrzu.

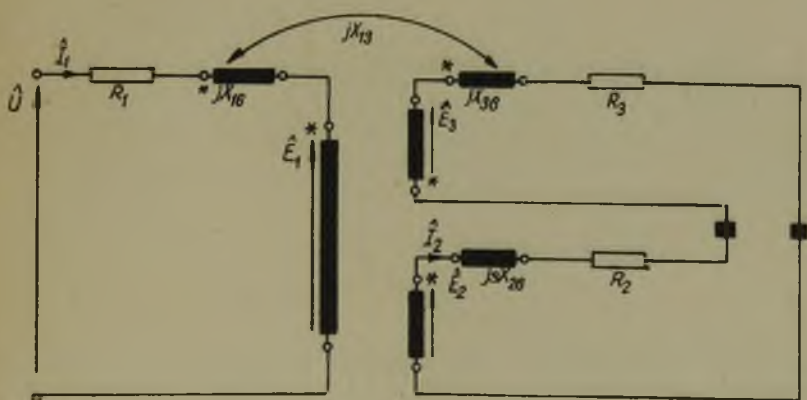


Rys. 3

Schemat zastępczy silnika dla jednej fazy przedstawiono na rysunku 4.

Równanie napięciowe obwodu pierwotnego:

$$\hat{U} = \hat{E}_1 + \hat{I}_1(R_1 + jX_{16}) + jX_{13}\hat{I}_2 e^{j\alpha}$$



Rys. 4

gdzie:

\hat{E}_1 - SEM indukowana w uzwojeniu W1 przez strumień główny $\hat{E}_1 = j X_{\mu} \hat{I}_{\mu}$,

X_{μ} - reaktancja strumienia głównego liczona po stronie pierwotnej,

X_{16} - reaktancja rozproszenia uzwojenia W1,

R_1 - oporność czynna uzwojenia W1,

X_{13} - reaktancja rozproszenia uzwojeń W1 i W3 przy pokrywaniu się osi tych uzwojeń.

Gdy uzwojenie W3 (przez które przepływa prąd \hat{I}_2) ma os przesuniętą o kąt α w kierunku wirowania strumienia głównego, to wytworzony przez niego strumień rozproszenia, który można rozpatrywać jako wirujący, nabiega uzwojenie W1 o kąt α wcześniej niż uzwojenie W3. Spadek napięcia na reaktancji X_{13} w obwodzie pierwotnym, będzie więc wyprzedzał spadek napięcia na reaktancji X_{16} o kąt α .

Sprowadzając reaktancję X_{13} oraz prąd \hat{I}_2 na stronę pierwotną:

$$\hat{U} = \hat{I}_1 (R_1 + j X_{16}) + \hat{E}_1 + j \hat{I}_2' X_{13}' (c + jb) \quad (5)$$

gdzie:

$$X_{13}' = \frac{X_{13}}{v^{2\alpha}}$$

Równanie napięciowe dla obwodu wtórnego rozważając jak poprzednio:

$$\hat{E}_1 (s - c + jb) = j \hat{I}_1 X_{13}' (c - jb) + \hat{I}_2' [R_2^2 + v^2 R_3^2 + j (s X_{26}' + v^2 X_{36}')] \quad (6)$$

gdzie:

R_2, R_3 - oporności czynne uzwojeń w_3 i w_2 sprowadzone na stronę pierwotną,

X_{26}, X_{36} - reaktancje rozproszenia uzwojeń w_2 i w_3 sprowadzone na stronę pierwotną.

W dalszych rozważaniach dla uproszczenia założono:

- uzwojenia w_1 i w_3 leżą blisko siebie, w tych samych żłobkach, wtedy zachodzi:

$$X_{36} \approx X_{13} \approx X_{16}$$

- niezależność prądu biegu jałowego od obciążenia, pominięto straty w żelazie; silnik zasilany jest napięciem:

$$\hat{U}_E = \hat{U} - I_a (R_1 + j X_{16}).$$

3. Wykresy kołowe silnika

Wykresy kołowe silnika Schrage ze względu na zmienne parametry α i β określające położenie szczotek na komutatorze stanowią rodzinę kół. Każde koło określone jest dla pewnego stałego położenia szczotek na komutatorze i określa go zależność:

$$\hat{f}_1 = \hat{f}_a + \hat{U}_E \frac{\hat{A} + s\hat{B}}{\hat{C} + s\hat{D}} \quad (7)$$

gdzie:

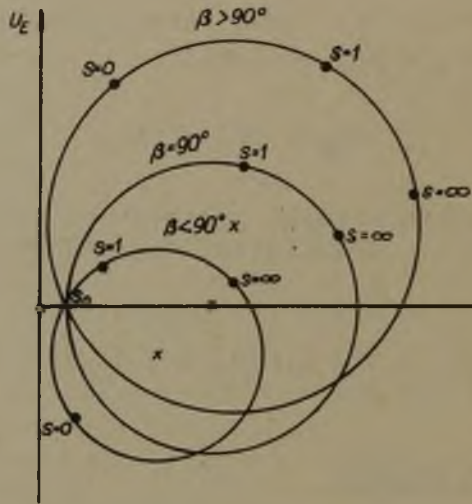
$$\hat{A} = (1 - c + jb)(-c + jb)$$

$$\hat{B} = 1 - c + jb$$

$$\hat{C} = R_2 + v^2 R_3 + R_1(1 - c + jb)(-c + jb)$$

$$\hat{D} = R_1(1 - c + jb) + j(X_{16} + X_{26})$$

Rysunek 5 przedstawia wykresy kołowe silnika Schrage dla trzech położzeń szczotek na komutatorze odpowiadające $\beta > 90^\circ$ (praca z prędkością nadsynchroniczną), $\beta < 90^\circ$ (praca z prędkością podsynchroniczną) $\beta = 90^\circ$ (praca asynchroniczna).



Rys. 5

Korzystanie z wykresu kołowego jest identyczne jak przy silniku asynchronicznym.

4. Moment elektromagnetyczny rozwijany przez silnik

Najbardziej interesującą charakterystyką silnika ze względu na napędowe jest jego charakterystyka mechaniczna: $M = f(s)$.

Moment elektromagnetyczny rozwijany przez silnik można określić wg równania:

$$M = k_M E_1 I_2^* \cos \psi \quad (8)$$

gdzie:

k_M - współczynnik stały,

ψ - kąt fazowy między prądem w obwodzie wtórnym \hat{I}_2 a indukowanym napięciem w tym obwodzie \hat{E}_{20} .

Według założonych uproszczeń i wzorów (4), (5), (6) i (8) otrzymano wzór na moment rozwijany przez silnik Schrage w zależności od jego parametrów, poślizgu i zmiennych regulowanych przesunięciem szczotek:

$$M = k_M U^2 E \frac{(s-c)(R_2 + v^2 R_3) + sb(X_{16} + X_{26}')}{[R_2 + v^2 R_3 + R_1((1-c)(s-c) + b^2)]^2 + [R_1 b(1-s) + s(X_{16} + X_{26}')]^2} \quad (9)$$

Wpływ składowych napięcia dodatkowego doprowadzonego do obwodu wtórnego na przebieg charakterystyk mechanicznych silnika:

a) przy kącie regulacji $\beta = 90^\circ$ wg (3) $b = 0$ $c = 0$ $v = 0$ silnik pracuje jak zwarty silnik asynchroniczny. Nachylenie charakterystyki mechanicznej jest powiększone w stosunku do nachylenia charakterystyki silnika asynchronicznego zwartego metalicznie, ponieważ uzwojenie W_2 zwarte jest przez szczotki (dodatkowy nieliniowy opór w obwodzie wtórnym).

Z równania (9) podstawiając $\beta = 90^\circ$ otrzymamy wzór określający przebieg charakterystyki mechanicznej silnika asynchronicznego dla wyprowadzonej gałęzi poprzecznej na zaciski silnika.

b) przy kącie kompensacji $\alpha = 0$ wg (3) $b = 0$ $c = v = v^h \cos \beta$. Napięcie doprowadzone do obwodu wtórnego jest w fazie ($\beta < 90^\circ$) lub w przeciwfazie ($\beta > 90^\circ$) z SEM E_2 indukowaną w tym obwodzie.

Zmieniając kąt regulacji β otrzymuje się rodzinę charakterystyk mechanicznych, których punkty charakterystyczne przyjmują wartości:

- poślizg biegu jałowego $s_0 = v^h$,
- poślizg krytyczny

$$s_k = v + \sqrt{v^2 + \frac{(R_2' + v^2 R_3')^2 - v^2 R_1^2 (1 - v)^2}{[R_1(1 - v)]^2 + (X_{16}' + X_{26}')^2}}$$

- moment krytyczny

$$M_k = \frac{M_{k_0}}{\frac{1}{R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{16}' + X_{26}')^2}} \left[R_1(1 - v) + \frac{R_2' \sqrt{R_1^2 + (X_{16}' + X_{26}')^2} s_k}{R_2' + v^2 R_3' - v R_1(1 - v)} \frac{s_k}{s_{k_0}} \right]}$$

gdzie:

M_{k_0} oraz s_{k_0} - moment i poślizg krytyczny dla $\beta = 90^\circ$

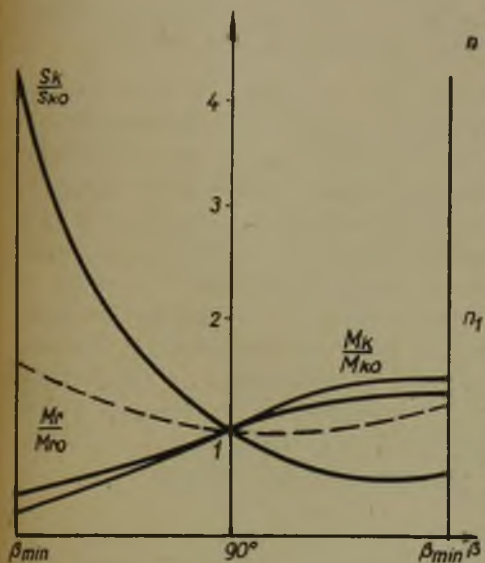
- moment rozruchowy

$$M_r = k_M U_E^2 \frac{(1 - v)(R_2' + v^2 R_3')}{[R_2' + v^2 R_3' + R_1(1 - v)^2]^2 + (X_{16}' + X_{26}')^2}$$

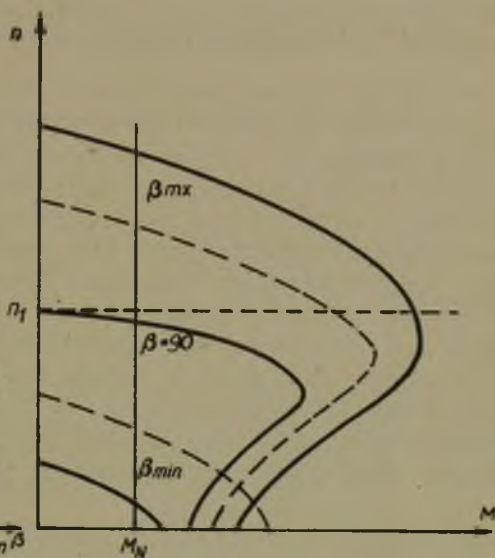
Przebieg wartości poszczególnych punktów charakterystycznych w odniesieniu do ich wartości przy zwartym obwodzie wtórnym przedstawiono na rys. 6. Rodzinę charakterystyk mechanicznych silnika przedstawia rys. 7.

Na obu rysunkach naniesiono charakterystyki odnoszące się do silnika małej mocy i dużym zakresie regulacji (linia ciągła) oraz silnika średniej mocy o mniejszym zakresie regulacji (linia przerywana). Najbardziej sztywny przebieg posiada charakterystyka przy zwartym obwodzie wtórnym. Przy regulacji prędkości obrotowej w dół od synchronicznej wyraźnie zmniejsza się moment krytyczny, co stanowi główną wadę regulacji prędkości obrotowej przez wprowadzenie dodatkowego napięcia do obwodu wtórnego silnika asynchronicznego. Wprowadzając w obwód wtórny dodatkową o-

oporność czynną zwiększa się nachylenie prostoliniowej części charakterystyki mechanicznej (podobnie jak w silniku asynchronicznym).



Rys. 6



Rys. 7

Przy regulacji prędkości obrotowej w górę uzyskuje się mały wzrost wartości momentu krytycznego.

Przy zwiększeniu kąta regulacji od β_{min} do β_{max} uzyskuje się nieznaczny wzrost wartości momentu rozruchowego (przy silnikach większych nawet częściowe zmniejszenie), natomiast znacznie wzrasta prąd: od półtorakrotnej przy β_{min} do sześciokrotnej wartości prądu znamionowego silnika przy β_{max} . Z tego względu rozruch odbywa się przy położeniu szczotek odpowiadającemu najmniejszej prędkości obrotowej silnika. Chcąc przeprowadzić rozruch przy położeniu szczotek odpowiadającemu większej prędkości obrotowej niż minimalna, wprowadza się w obwód wtórny dodatkową oporność czynną, która przy odpowiednim dobraniu pozwala na rozwinięcie przez silnik większych wartości momentu rozruchowego.

Silnik typu Schrage może pracować także jako prądnica lub hamulec ze zwrotem energii do sieci w całym zakresie regulacji. Przejście na pracę hamulcową ze zwrotem energii do sieci można uzyskać w dwojaki sposób: przez nadanie prędkości większej niż ta, jaka przy danym położeniu szczotek występuje przy idealnym biegu jałowym lub (przy danej prędkości obrotowej) przez zmianę położenia szczotek.

c) przy kącie kompensacji $\alpha > 0$ pojawia się w napięciu dodatkowym składowa przesunięta o 90° względem SEM E_2 która poprawia współczynnik mocy silnika przy prędkościach podsynchronicznych. Pod wpływem składowej kompensacyjnej w obwodzie wtórnym silnika płynie prąd bierny, który jest tym większy im większy jest kąt kompensacji α i im większa jest ilość działek objętych przez parę szczotek. Prąd w obwodzie wtórnym nie powinien przekroczyć dopuszczalnej wartości, dlatego kąt kompensacji jest ograniczony, szczególnie dla silników o dużym zakresie regulacji prędkości obrotowej (nie przekracza 10°). W związku z tym wpływ składowej kompensacyjnej na charakterystykę mechaniczną w zakresie obciążenia znamionowym momentem jest mały.

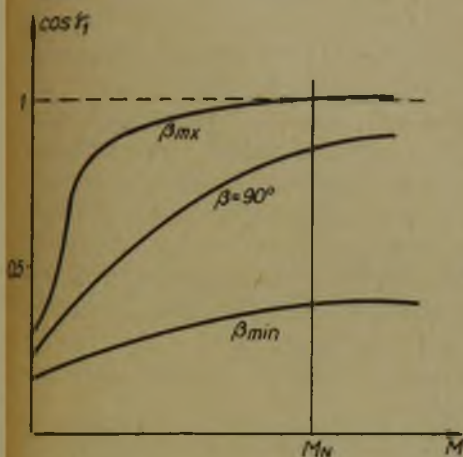
5. Współczynnik mocy i sprawność silnika

Charakterystyki współczynnika mocy dla silnika Schrage w zależności od kąta regulacji i obciążenia przedstawiono na rys. 8. Przy znamionowym obciążeniu współczynnik ten waha się w granicach od 0,4 przy β_{\min} do 0,98 przy β_{\max} . Poprawę współczynnika mocy można uzyskać wprowadzając w obwód wtórny składową kompensacyjną napięcia dodatkowego przez zmianę osi symetrii szczotek względem osi symetrii uzwojenia stojana.

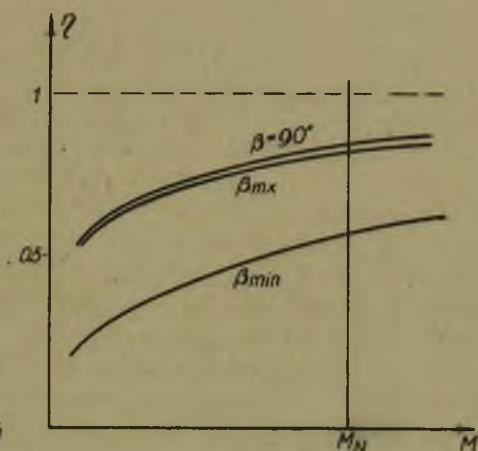
Dla tak skonstruowanego napędu szczotek, że zmianę położenia tych osi można przeprowadzić jedynie przy zatrzymanym silniku, a prędkość posuwu szczotek przynależnych do jednej fazy jest jednakowa, można wykazać [1], że nie jest możliwe przy zadanym kierunku wirowania uzyskanie kompensacji równocześnie przy prędkościach pod i nadsynchronicznych. Ponieważ jednak silnik wykazuje mały współczynnik mocy przy prędkościach podsynchronicznych, zwykle dla danego kierunku wirowania kompensuje się silnik dla tej prędk-

kości. W tym celu należy szczotki przesunąć w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania silnika.

Stosowany jest też specjalny napęd szczotek z niesymetrycznymi prędkościami obu szczotek jednej fazy na komutatorze, który umożliwia kompensowanie silnika dla prędkości obrotowych nad i podsynchronicznych [1]



Rys. 8



Rys. 9

Przebieg krzywych sprawności w zależności od ustawienia szczotek i momentu obciążenia przedstawia rys. 9. Sprawność przy znamionowym obciążeniu waha się w granicach od 0,6 przy prędkościach minimalnych do 0,83 przy zwartym uzwojeniu wtórnym.

W silniku Schrage moc poślizgu jest w części tracona na oporze czynnym obwodu wtórnego (proporcjonalnie do różnicy poślizgu silnika i poślizgu idealnego biegu jałowego $P_w(s-s_0)$) reszta natomiast (proporcjonalna do poślizgu idealnego biegu jałowego $P_w s_0$) wydawana jest do uzwojenia dodatkowego przy regulacji prędkości obrotowej w dół od synchronicznej i zwrócona wskutek transformacji do sieci. Przy pominięciu strat w żelazie, mechanicznych i w obwodzie pierwotnym silnik pobiera więc z sieci moc proporcjo-

nalną do iloczynu momentu na wale i prędkości obrotowej idealnego biegu jałowego:

$$P_1 = kM(1 - s_0)n_1$$

Przy regulacji prędkości obrotowej w górę od synchronicznej obwód wtórny jest zasilany dodatkowo przez uzwojenie regulacyjne ($s_0 < 0$).

Regulacja prędkości obrotowej przez zastosowanie silnika Schrage w porównaniu ze sposobem regulacji silnika asynchronicznego przez wprowadzenie do obwodu wtórnego dodatkowych oporności ma wiele zalet: nieznaczne zmniejszenie sztywności charakterystyki mechanicznej, regulacja płynna, regulacja w dół i w górę od prędkości synchronicznej, wysoki współczynnik mocy, wysoka sprawność. Straty mocy silnika Schrage w porównaniu ze stratami silnika asynchronicznego są mniejsze nie tylko przy regulacji prędkości obrotowej przy stałym momencie, ale także przy regulacji prędkości obrotowej obciążenia, gdzie moment jest zależny w kwadracie od prędkości obrotowej.

Omówione silniki komutatorowe ze względu na trudności w opanowaniu komutacji buduje się na moce nie przekraczające kilkuset kilowatów (najczęściej silniki o mocach małych). Stosowane liczby biegunów 4 do 8, a zakresy regulacji 1:3, 1:5 (w silnikach małej mocy dochodzi się do wartości 1:25). Ponieważ napięcie doprowadzone jest do uzwojenia wirnika poprzez pierścienie ślizgowe silniki typu Schrage nie nadają się do bezpośredniego zasilania przy napięciach wyższych od 500 V.

W porównaniu z układami regulacyjnymi Leonarda małych i średnich mocy (na które budowane są silniki komutatorowe) silniki Schrage są lżejsze, tańsze, o większej sprawności i współczynniku mocy. Wadą silników Schrage są duże wymiary gabarytowe.

Regulacja położenia szczotek może odbywać się ręcznie lub przy pomocy małego serwowatoru. Silniki Schrage często wyposażone są w tachoprądnice, która umożliwia regulację zdalną lub automatyczną poprzez serwowator.

LITERATURA

- [1] Richter R.: Elektrische Maschinen Bd.5, J. Springer, Berlin 1950 r.
- [2] Kostienko M., Gniedin L.: Teoria i rozcziet triechfaznych kollektornych maszin i kaskadnych sistem. "Nauka", Moskwa-Leningrad, 1964 r.
- [3] Kuczewski Z.: Charakterystyki mechaniczne silnika a-synchronicznego trójfazowego przy regulacji prędkości obrotowej poprzez wprowadzenie dodatkowego napięcia do obwodu wirnika, ZN Politechniki Śl. "Elektryka", nr 17 1964 r.

ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОММУТАТОРНОГО
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ТИПА ШРАГЕ

Резюме

В докладе были рассмотрены механические характеристики коммутаторного электродвигателя переменного тока типа Шраге для большого диапазона регулировки вращательной скорости, а также приведены его характеристики к.п.д. и коэффициента мощности. Сопоставлено двигатель с другими, часто применяемыми системами привода с регулируемой скоростью вращения.

EXPLOITATION PROPERTIES OF THE A.C. COMMUTATOR MOTOR
OF THE SCHRAGE'S TYPE

Summary

Description of the mechanical characteristics of the commutator motor of the a.c. current of the Schrage type for the large range of the rotation speed control and its efficiency and power factor characteristics. Comparision of the motor with other often used drive systems with controlled speed.