

Władysław Mizia, Aleksander Żywiec,
Janusz Książek

Zakład Maszyn Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

WŁASNOŚCI SILNIKA INDUKCYJNEGO PRZY ZASILANIU Z TYRYSTOROWEGO BEZPOŚREDNIEGO PRZEMIENNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań własności silnika indukcyjnego klatkowego przy zasilaniu z bezpośredniego przemiennika częstotliwości oraz z przetwornicy maszynowej dla częstotliwości 10 Hz podstawowej harmonicznej napięcia zasilania. Na podstawie porównania własności silnika dla obu typów zasilania podano podstawowe wytyczne konstrukcyjne budowy silników indukcyjnych klatkowych przystosowanych do zasilania z bezpośrednich przemienników częstotliwości.

1. Wstęp

Rozwój techniki półprzewodnikowej powoduje, że w napędzie wymagającym nastawiania prędkości obrotowej znajduje coraz szersze zastosowanie silnik indukcyjny klatkowy wyróżniający się prostotą konstrukcji, łatwością obsługi i niskim kosztem budowy. Zastosowanie tyrystorów pozwala bowiem na realizację źródeł zasilania o nastawialnej wartości napięcia i częstotliwości. Nastawianie prędkości obrotowej silników indukcyjnych realizuje się najczęściej przez zmianę częstotliwości napięcia zasilania, której zwykle towarzyszy zmiana napięcia. Zmiany napięcia przy zmianach częstotliwości są niezbędne dla ograniczenia nadmiernego powiększenia się prądu jałowego oraz zachowania wymaganych własności ruchowych silnika takich jak przeciążalność momentem, moment rozruchowy.

Zależności napięcia o kształcie sinusoidalnym od częstotliwości, przy których uzyskuje się wymagany moment rozruchowy lub przeciążalność momentem podano w pracy [1].

Źródłem zasilania silnika indukcyjnego pracującego w napędzie wymagającym nastawiania prędkości obrotowej są najczęściej tyrystorowe pośrednie lub bezpośrednie przemienniki częstotliwości. Bezpośrednie przemienniki częstotliwości znajdują zastosowanie, jeżeli silnik indukcyjny pracuje w napędzie wymagającym nastawiania prędkości obrotowej w zakresie małych prędkości obrotowych np. napęd samotoków hutniczych. Przemiennik taki pozwala na bezpośrednią zmianę napięcia sieci przemysłowej o częstotliwości 50 Hz na napięcie o częstotliwości nastawianej w zakresie od 0-25 Hz. Napięcie zasilania silnika jest wtedy odkształcone, przy czym stopień odkształce-

nia powiększa się w miarę powiększania częstotliwości. Z tego powodu przemienniki bezpośrednie stosuje się do zasilania silników indukcyjnych, gdy wymagana częstotliwość napięcia zasilania silników nie przekracza 15 Hz. Odkształcenie napięcia zasilania silnika wpływa na jego własności ruchowe i eksploatacyjne.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań i pomiarów silnika indukcyjnego klatkowego przy zasilaniu z bezpośredniego przemiennika częstotliwości oraz z przetwornicy maszynowej, którą traktuje się jako źródło napięcia sinusoidalnego. Porównanie dla obu typów zasilania pozwala na ocenę wpływu odkształconego napięcia zasilania na własności ruchowe i eksploatacyjne silnika, a tym samym na prawidłowy dobór silników w układach napędowych. Badany silnik klatkowy był silnikiem seryjnym przystosowanym do zasilania napięciem sinusoidalnym. Przeprowadzenie porównania własności silnika dla obu typów zasilania pozwala również na ustalenie podstawowych wytycznych konstrukcyjnych budowy silników indukcyjnych klatkowych przystosowanych do zasilania z tyrystorowych bezpośrednich przemienników częstotliwości.

2. Układy zasilania silnika

Badania własności przeprowadzono przy zasilaniu silnika:

- napięciem sinusoidalnym, którego źródłem była prądnica synchroniczna wyposażona w niezależne nastawialne źródło wzbudzenia oraz w napęd pozwalający utrzymywać stałą częstotliwość napięcia wyjściowego,
- napięciem odkształconym, którego źródłem był bezpośredni przemiennik częstotliwości.

Zastosowanie bezpośrednich przemienników częstotliwości do zasilania silników indukcyjnych pozwala na realizację nowoczesnych napędów a znajomość własności samego przemiennika jest niezbędna dla oceny własności silnika. Z tego powodu zostanie przedstawione działanie przemienników oraz możliwości nastawiania częstotliwości i napięcia.

Bezpośrednia przemiana napięcia o częstotliwości f_s sieci energetycznej na napięcie o częstotliwości f_p przy spełnieniu warunku $f_p < f_s$ jest możliwa przy zastosowaniu prostowników sterowanych o układzie przeciwno ległym, w których kąt α opóźnienia zapłonu tyrystorów zmienia się periodycznie w czasie. Zmianom kąta opóźnienia zapłonu towarzyszą zmiany średniej wartości napięcia wyjściowego prostownika sterowanego. Częstotliwość f_p zmian wartości średniej napięcia wyjściowego przemiennika jest równa częstotliwości zmian kąta opóźnienia zapłonu tyrystorów i nie zależy od częstotliwości sieci zasilającej f_s . Częstotliwość f_p nie może być większa od częstotliwości f_s . Praktyczne zastosowanie znajdują przemienniki, w których $f_p < (0,3 \div 0,4) f_s$.

Przy sinusoidalnych zmianach wartości średniej napięcia wyjściowego można wypisać:

$$U_{p\acute{s}r}(t) = U_{pm} \sin \omega_p t$$

gdzie:

U_{pm} - amplituda wartości średniej napięcia,

$\omega_p = 2\pi f_p$ - pulsacja zmian wartości średniej napięcia.

Czasowy przebieg zmian kąta α opóźnienia zapłonu, przy którym średnia wartość napięcia wyjściowego zmienia się sinusoidalnie, jest określony wyrażeniem:

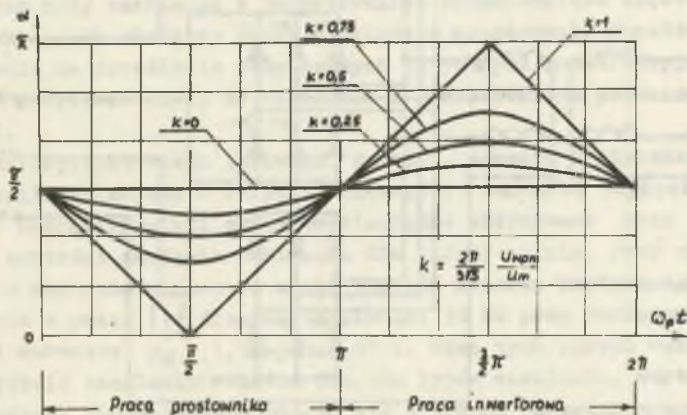
$$\alpha = f(t) = \arccos [k \sin \omega_p t]$$

gdzie:

$$k = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \frac{U_{pm}}{U_m}$$

U_m - amplituda napięcia sieci zasilającej,

jeżeli założyć, że sieć zasilająca jest źródłem napięciowym oraz, że reakcja odbioru jest wielokrotnie większa od rezystancji. Przebieg funkcji $\alpha = f(t)$ dla parametrycznych zmian wartości współczynnika k przedstawił no na rys. 1. Aby wyeliminować prądy wyrównawcze, przebiegi czasowe zmian kątów opóźnienia zapłonu składowych prostowników sterowanych stanowiących układ przeciwrównoległy powinny być przesunięte względem siebie o połowę okresu zmian wartości średniej napięcia wyjściowego.



Rys. 1. Czasowy przebieg zmian kąta opóźnienia zapłonu

Napięcie trójfazowe o nastawialnej częstotliwości otrzymuje się łącząc w układ trójfazowy trzy układy przeciwrównoległe, przy czym źródło zasilania może być wspólne dla wszystkich układów.

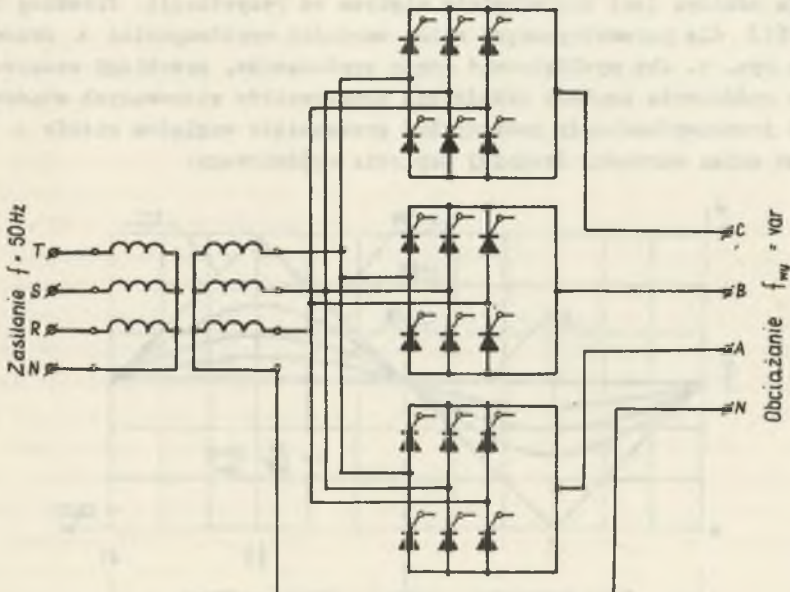
Symetryczny układ napięć wyjściowych otrzymuje się, jeżeli czasowe zmiany kątów opóźnienia zapłonu poszczególnych układów przeciwrównoległych są przesunięte względem siebie o $1/3$ okresu zmian napięcia wyjściowego.

Amplituda przebiegu wartości średniej napięcia wyjściowego może być nastawiana przez:

- zmianę zakresu zmian kąta opóźnienia zapłonu, jeżeli napięcie zasilania jest stałe,
- zmianę napięcia zasilania przy stałym zakresie zmian kąta opóźnienia zapłonu.

Stopień odkształcenia napięcia wyjściowego jest zależny od zakresu zmian kąta opóźnienia zapłonu. Aby zachować stopień odkształcenia napięcia wyjściowego, pomiary przeprowadzono przy stałym zakresie zmian kąta opóźnienia zapłonu a zmiany napięcia wyjściowego uzyskiwano zmieniając napięcie zasilania przemiennika.

Bezpośredni przemiennik częstotliwości użyty do zasilania silnika był zbudowany z trzech układów przeciwrównoległych prostowników sterowanych o układzie gwiazdowym bez prądów wyrównawczych (rys. 2). Przemiennik taki wybrano celowo, bowiem daje on większy stopień odkształcenia napięcia wyjściowego w porównaniu z przemiennikiem zbudowanym z układów mostkowych pro-



Rys. 2. Schemat ideowy bezpośredniego tyrystorowego przemiennika częstotliwości

stowników sterowanych. Własności silnika indukcyjnego przy zasilaniu z przemiennika zbudowanego z układów mostkowych będzie można ocenić, bowiem będą znajdować się w przedziale między zasilaniem napięciem sinusoidalnym oraz zasilaniem z zastosowanego przemiennika.

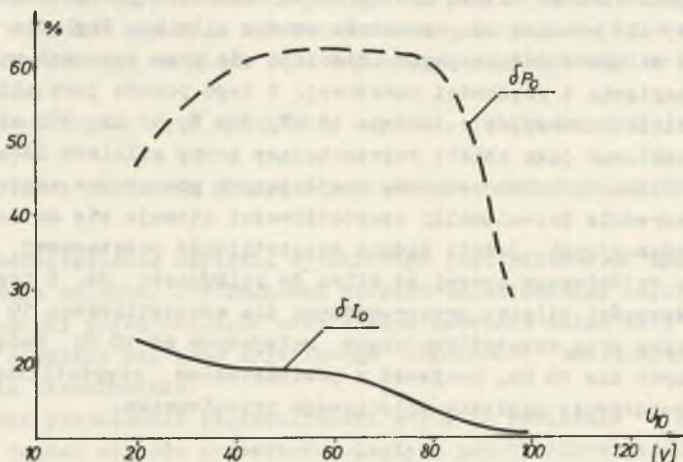
Własności silnika indukcyjnego przy zasilaniu z bezpośredniego przemiennika częstotliwości zależą nie tylko od własności przemiennika i sieci zasilającej ale również od parametrów samego silnika. Względne wartości parametrów silników indukcyjnych zmieniają się przy zmianach mocy, znamionowego napięcia i prędkości obrotowej. Z tego powodu jako obiekt badań wybrano silnik indukcyjny o danych: 11 kW, 380 V, 50 Hz, 960 obr/min, który można traktować jako obiekt reprezentujący grupę silników indukcyjnych o mocach od kilku do kilkunastu kW, znajdujących powszechne zastosowanie.

Bezpośrednie przemienniki częstotliwości stosuje się do zasilania silników indukcyjnych, jeżeli żądana częstotliwość podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego wynosi od kilku do kilkunastu Hz. Z tego powodu badanie własności silnika przeprowadzono dla częstotliwości 10 Hz. Własności silnika przy częstotliwościach mniejszych od 10 Hz będą lepsze od zmierzonych dla 10 Hz, ponieważ z powiększaniem częstotliwości zwiększa się odkształcenie napięcia wyjściowego przemiennika.

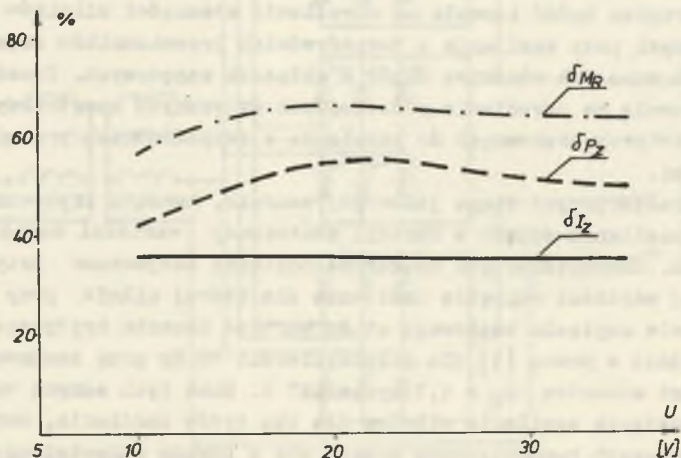
3. Porównanie własności silnika przy zasilaniu z bezpośredniego przemiennika częstotliwości oraz z przetwornicy maszynowej

Badania własności silnika indukcyjnego dla obu typów zasilania przeprowadzono zdejmując charakterystyki biegu jałowego, zwarcia, momentu krytycznego, elektromechaniczne oraz przeprowadzając próby nagrzewania się przy wentylacji własnej i wymuszonej (wentylator napędzany niezależnym silnikiem indukcyjnym o liczbie par biegunów takiej samej jak badanego silnika). Taki program badań pozwala na określenie własności silników obecnie produkowanych przy zasilaniu z bezpośrednich przemienników częstotliwości, a tym samym na ich właściwy dobór w układach napędowych. Ponadto wyniki badań pozwolą na określenie podstawowych wytycznych konstrukcyjnych budowy silników przystosowanych do zasilania z bezpośrednich przemienników częstotliwości.

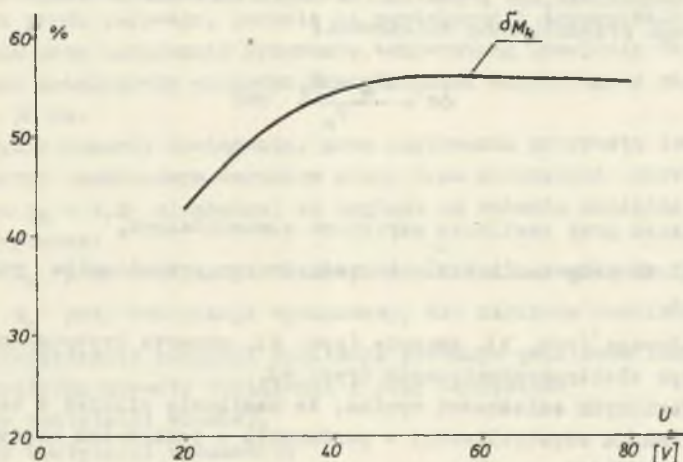
Charakterystyki biegu jałowego, zwarcia, momentu krytycznego dla obu typów zasilania zdjęto w funkcji skutecznej wartości napięcia zasilania silnika. Charakterystyki elektromechaniczne zdejmowano przy takiej skutecznej wartości napięcia zasilania dla której silnik przy sinusoidalnym kształcie napięcia zachowuje stałą wartość momentu krytycznego. Napięcie to zgodnie z pracą [1] dla częstotliwości 10 Hz przy zachowaniu przeciążalności momentem $P_M = 1,7$ wynosi 87 V. Mimo tych samych wartości skutecznych napięcia zasilania silnika dla obu typów zasilania, wartości skuteczne pierwszych harmonicznych różnią się z powodu odkształconego przebiegu



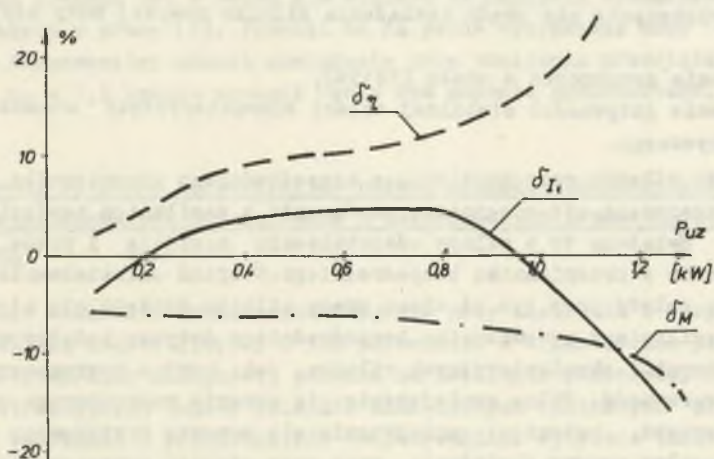
Rys. 3. Procentowa odchyłka prądu i mocy przy biegu jałowym



Rys. 4. Procentowa odchyłka prądu, mocy i momentu w stanie zwarcia



Rys. 5. Procentowa odchyłka momentu krytycznego



Rys. 6. Procentowa odchyłka prądu, sprawności i momentu przy obciążeniu

napięcia wyjściowego przemiennika. Wynika stąd, że własności silnika przy zasilaniu z bezpośredniego przemiennika częstotliwości pogorszą się w porównaniu z zasilaniem z przetwornicy maszynowej. Dla zilustrowania wpływu zasilania z bezpośredniego przemiennika częstotliwości na własności silnika indukcyjnego przedstawiono zależności:

$$\delta W = \frac{W_s - W_p}{W_s} 100$$

przy czym:

W_s - wielkość przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym,

W_p - wielkość przy zasilaniu z bezpośredniego przemiennika częstotliwości,

dla biegu jałowego (rys. 3), zwarcia (rys. 4), momentu krytycznego (rys. 5), charakterystyk elektromechanicznych (rys. 6).

Z przedstawionych zależności wynika, że zasilanie silnika z bezpośredniego przemiennika częstotliwości w porównaniu z zasilaniem napięciem sinusoidalnym powoduje:

- zwiększenie prądu jałowego o (10÷20%), przy czym w miarę powiększania napięcia odchyłka maleje,
- zwiększenie strat jałowych o (50÷65%), przy czym w miarę powiększania napięcia odchyłka maleje,
- zmniejszenie prądu zwarcia o około 36%,
- zmniejszenie mocy zwarcia o około 55%,
- zmniejszenie momentu rozruchowego o około 66%,
- zmniejszenie momentu krytycznego o około 55%,
- silne powiększanie się prądu obciążenia silnika powyżej mocy użytecznej 1 kW,
- zmniejszenie sprawności o około (5÷15%),
- zmniejszenie sztywności stabilnej części charakterystyki momentu elektromagnetycznego.

Własności silnika przy zasilaniu z bezpośredniego przemiennika częstotliwości pogarszają się znacznie w porównaniu z zasilaniem napięciem sinusoidalnym. Świadczy to o silnym odkształceniu napięcia i prądu silnika przy zasilaniu z przemiennika bezpośredniego. Stopień odkształcenia napięcia i prądu zależy przy tym od stanu pracy silnika. Szczególnie niekorzystny wpływ zasilania z przemiennika bezpośredniego dotyczy podstawowych własności ruchowych i eksploatacyjnych silnika, jak: moment rozruchowy, moment krytyczny, sprawność. Silne zmniejszenie się momentu rozruchowego utrudnia warunki rozruchu, natomiast zmniejszenie się momentu krytycznego ogranicza dopuszczalny moment obciążenia, przy czym stopień ograniczenia zależy od wymaganej przeciążalności momentem. Poprawę własności rozruchowych oraz powiększenie dopuszczalnego momentu obciążenia można uzyskać przez za-

silanie silnika napięciem większym od 87 V. Próby nagrzewania się silnika wykazały bowiem, że powiększanie napięcia zasilania silnika w zakresie:

- do 105 V przy wentylacji własnej,
- do 109 V przy wentylacji wymuszonej,

mimo wzrostu prądu jałowego, pozwala na powiększenie dopuszczalnego momentu obciążenia przy zachowaniu przyrostu temperatury uzwojenia stojana odpowiadającego znamionowym warunkom pracy silnika zasilanego z sieci o częstotliwości 50 Hz.

Dopuszczalne momenty obciążenia, przy zachowaniu przyrostu temperatury odpowiadającego znamionowym warunkom pracy oraz minimalnej przeciążalności momentem $p_M = 1,2$ niezbędnej ze względu na wahania napięcia sieci zasilającej, wynoszą:

- $M_d = 0,85 M_n$ przy wentylacji własnej dla napięcia zasilania 105 V,
- $M_d = 0,87 M_n$ przy wentylacji wymuszonej, dla napięcia zasilania 109 V.

Dalsze powiększanie napięcia zasilania powoduje gwałtowne zmniejszanie się dopuszczalnego momentu obciążenia i przy napięciach

- 117 V przy wentylacji własnej,
- 125 V przy wentylacji wymuszonej

silnik osiąga znamionowy przyrost temperatury uzwojenia stojana pracując na biegu jałowym.

Przy budowie bezpośredniego przemiennika częstotliwości na określoną częstotliwość f_p napięcia wyjściowego należy więc przewidzieć możliwość zwiększenia napięcia wyjściowego w stosunku do napięcia wynikającego ze stałości stosunku napięcia do częstotliwości. Stopień powiększenia napięcia zależeć będzie od częstotliwości f_p i parametrów silnika. W przybliżeniu można przyjąć, że napięcie wyjściowe przemiennika dla określonej częstotliwości powinno być o około 25% większe od napięcia wyznaczonego z wyrażeń podanych w pracy [1]. Pozwoli to na pełne wyzyskanie mocy silnika, przy czym dopuszczalny moment obciążenia przy obniżeniu przeciążalności do wartości $p_M = 1,2$ będzie wynosił około 85% momentu znamionowego.

4. Podstawowe wytyczne konstrukcyjne budowy silników indukcyjnych klatkowych przystosowanych do zasilania z bezpośrednich przemienników częstotliwości

Ustalenie własności silnika indukcyjnego przy zasilaniu z bezpośrednio przemiennika częstotliwości i ich porównanie z własnościami przy zasilaniu z przetwornicy maszynowej pozwala na ustalenie podstawowych wytycznych konstrukcyjnych budowy silników indukcyjnych klatkowych przystosowanych do zasilania z przemienników bezpośrednich. Wytyczne takie ustala się na podstawie przeprowadzonych porównań oraz znajomości wpływu własności materiałowych, technologii i rozwiązań konstrukcyjnych na własności ruchowe i eksploatacyjne silników zasilanych napięciem sinusoidalnym.

Na podstawie przeprowadzonych badań ustala się następujące podstawowe wytyczne konstrukcyjne budowy silników indukcyjnych przystosowanych do zasilania z bezpośrednich prądów przemienników częstotliwości:

- obwód magnetyczny silników powinien być wykonywany z blach cieńszych o większej stromości charakterystyki magnesowania i mniejszej stratności od blach obecnie stosowanych,
- lakier izolujący blachy powinien dawać małe przyrosty grubości izolacji, by przy cieńszej blasze nie zmniejszać nadmiernie współczynnikaapełnienia blach,
- wymiary żłobków stojana i wirnika powinny być tak dobierane, by reakcje rozproszenia uzwojenia stojana i klatki wirnika były możliwie małe (głównie przez zmniejszenie stosunku wysokości do szerokości żłobka),
- gęstość prądu w klatce wirnika powinna być mniejsza od obecnie stosowanej, przy czym stopień zmniejszenia należy uzależnić od poprawy własności magnetycznych blachy ze względu na konieczność zmniejszenia szerokości zębów wirnika,
- liczba żłobków wirnika powinna być dobierana zgodnie z zasadami doboru dla sinusoidalnego kształtu napięcia zasilania.

LITERATURA

- [1] Kubek J., Mizia W., Żywiec A.: Własności silnika indukcyjnego przy częstotliwościowej regulacji prędkości obrotowej. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka" Nr 38, 1973.
- [2] Bułgakow A.A.: Czastotnoje uprawlenije asinchronnymi dwigatieliami. Izd. "Nauka", 1966.
- [3] Hamudhanow M.E., Usmanow S.Z. i inni: Czastotnoje regulirowanije skorsti elektropriwodow pieriemiennogo toka. Izd. FAN Uzbeckoj SSR.
- [4] Looke G.: Probleme der Spannungsanpassung beim Betrieb von Asynchronmotoren mit variabler Frequenz. AEG-Mitteilungen Nr 1/2, 1963.
- [5] Tunia H., Winiarski B.: Układy elektroniczne w automatyce napędowej. WNT, Warszawa, 1969.

Przyjęto do druku w czerwcu 1974 r.

СВОЙСТВА АСИНХРОННОГО КОРОТКОЗАМКНУТОГО ДВИГАТЕЛЯ,
ПИТАЕМОГО ОТ ТИРИСТОРНОГО ЦИКЛОКОНВЕРТЕРА

Р е з ю м е

Изложены результаты исследований свойств асинхронного короткозамкнутого двигателя, питаемого от тиристорного циклоконвертера и машинного преобразователя частоты 10 гц.

Для этих типов питания сравнены свойства двигателя и даны рекомендации по вопросам конструирования короткозамкнутых асинхронных двигателей, приспособленных для питания от циклоконвертеров.

PROPERTIES OF THE INDUCTION MOTOR SUPPLIED
FROM CYCLOCONVERTER

S u m m a r y

Investigation results of the induction squirrel-cage motor supplied from a cycloconverter and a machine converter for 10Hz basic harmonic frequency of the supplying voltage are described. Some practical outlines for the designing of the squirrel-cage induction motors adapted to be feedet from cycloconverter are given.