

Władysław Mizia, Aleksander Żywlec,
Jan Kapinos

Zakład Maszyn Elektrycznych
Politechniki Śląskiej

WŁASNOŚCI SILNIKA INDUKCYJNEGO
PRZY ZASILANIU Z TYRYSTOROWEGO POŚREDNIEGO PRZEMIENNIKA
CZĘSTOTLIWOŚCI

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań własności silnika indukcyjnego klatkowego przy zasilaniu z pośredniego przemiennika częstotliwości. Własności silnika przy zasilaniu z pośredniego przemiennika częstotliwości porównano z własnościami przy zasilaniu z przetwornicy maszynowej i ustalono podstawowe wytyczne budowy silników przystosowanych do zasilania z pośrednich przemienników częstotliwości.

1. Wstęp

Zastosowanie tyrystorów pozwala na realizację statycznych źródeł zasilania o nastawialnej wartości napięcia i częstotliwości. Z tego powodu w napędzie wymagającym nastawiania prędkości obrotowej znajduje coraz szersze zastosowanie silnik indukcyjny klatkowy. Zmiany prędkości obrotowej silnika uzyskuje się zmieniając częstotliwość napięcia zasilania, której zwykle towarzyszy zmiana napięcia. Zmiany napięcia przy zmianach częstotliwości są niezbędne dla ograniczenia nadmiernego powiększania się prądu jałowego oraz zachowania wymaganych własności ruchowych silnika takich jak: przeciążalność momentem, moment rozruchowy.

Zwykle w układach napędowych z silnikiem indukcyjnym klatkowym o nastawialnej prędkości obrotowej górna granica wymaganego zakresu zmian prędkości obrotowej nie przekracza znamionowej prędkości obrotowej silnika. Z tego powodu źródło zasilania silnika powinno umożliwić nastawianie częstotliwości napięcia wyjściowego w zakresie do częstotliwości znamionowej silnika. Jeżeli wymagany zakres nastawiania prędkości obrotowej silnika odpowiada zmianom częstotliwości napięcia źródła zasilania w zakresie $(0,3-1)$ częstotliwości znamionowej, wówczas rolę źródła zasilania spełniają pośrednie przemienniki częstotliwości. Napięcie wyjściowe pośrednich przemienników częstotliwości jest odkształcone i powoduje pogorszenie się własności ruchowych i eksploatacyjnych silnika.

W niniejszym artykule przedstawione zostały wyniki badań i pomiarów silnika indukcyjnego klatkowego przy zasilaniu z pośredniego przemiennika częstotliwości oraz z przetwornicy maszynowej, którą traktuje się jako źródło

napięcia sinusoidalnego. Porównanie wyników 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 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 pośrednich przemienników częstotliwości.

2. Układy zasilania silnika

Badania własności silnika przeprowadzono przy zasilaniu:

- 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 pośredni przemiennik częstotliwości.

Dla obu typów zasilania przeprowadzono badania własności silnika przy częstotliwościach $f = 20, 30, 40, 50$ Hz podstawowej harmonicznej napięcia zasilania. Z uwagi na różnorodność rozwiązań pośrednich przemienników częstotliwości, zostaną przedstawione ogólne zasady budowy przemienników pośrednich oraz rozwiązanie przemiennika pośredniego użytego do badań własności silnika. Pozwoli to na właściwą ocenę wyników pomiarowych i ewentualne transponowanie ich na inne rozwiązania przemienników pośrednich.

W pośrednich przemiennikach częstotliwości następuje zmiana napięcia sieci zasilającej na napięcie stałe a następnie napięcia stałego na napięcie przemiennie o żądanej częstotliwości. Pośredni przemiennik częstotliwości można więc traktować jako kaskadowe połączenie prostownika i falownika przekształcającego napięcie stałe na napięcie przemiennie o wymaganej częstotliwości. Zwykle pomiędzy prostownikiem a falownikiem włącza się filtr wygładzający dolnoprzepustowy.

Tyrystorowy pośredni przemiennik częstotliwości służący do zasilania silników indukcyjnych powinien umożliwiać nastawianie częstotliwości oraz wartości napięcia wyjściowego. Zakres zmian częstotliwości wynika wtedy z wymaganego zakresu nastawiania prędkości obrotowej silnika, natomiast zakres zmian napięcia jest związany z zakresem zmian częstotliwości i wynika z konieczności zachowania niezbędnych własności ruchowych silnika takich jak: przeciążalność momentem, moment rozruchowy.

Nastawianie częstotliwości napięcia wyjściowego przemiennika pośredniego realizuje się przez odpowiednie sterowanie czasem pracy tyrystorów falownika w stanie przewodzenia i w stanie zaporowym. Załączenie tyrystora spolaryzowanego w kierunku przewodzenia następuje z chwilą podania impulsu

su zapłonu, natomiast wyłączenie następuje w wyniku działania zapłonu wyłączającego zbudowanego zwykle z elementów biernych L,C, którego chwila wyzwalania jest również nastawiana np. przez chwilę zapłonu innego tyrystora. W ten sposób częstotliwość napięcia wyjściowego może być zadawana poprzez zmiany czasu pomiędzy kolejnymi impulsami zapłonowymi.

Nastawianie napięcia wyjściowego pośredniego przemiennika częstotliwości uzyskuje się przez:

- nastawianie napięcia stałego zasilającego falownik,
- odpowiednie sterowanie czasem przewodzenia tyrystorów falownika (tzw. przewodzenie pulsowe wielokrotne) przy stałej wartości napięcia stałego zasilającego falownik,

Pośrednie przemienniki częstotliwości pracujące przy stałej wartości napięcia stałego zasilającego falownik posiadają bardzo rozbudowany układ sterowania chwilą zapłonu oraz chwilą wyłączenia tyrystorów falownika. Znacznie prostszy układ sterowania tyrystorów falownika posiadają przemienniki pośrednie przy nastawianej wartości napięcia stałego zasilającego falownik i z tego powodu znajdują szersze zastosowanie.

Napięcie stałe zasilające falownik można nastawiać przez:

- zastosowanie prostownika sterowanego przy zasilaniu z sieci o stałej wartości napięcia i częstotliwości,
- zastosowanie autotransformatora i prostownika diodowego.

Przy nastawianiu napięcia stałego przez zmianę napięcia zasilania za pomocą autotransformatora, zawartość wyższych harmonicznych w napięciu wyjściowym prostownika jest stała i zależy od rodzaju sieci zasilającej i układu prostownika. Najczęściej stosuje się sieć zasilającą trójfazową oraz mostkowy układ prostownika, aby obniżyć parametry elementów filtra wygładzającego.

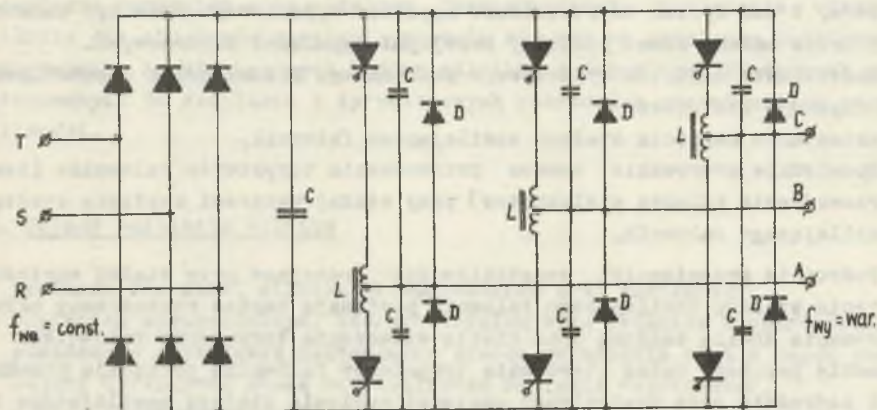
Zastosowanie prostownika sterowanego do nastawiania napięcia stałego wymaga lepszego filtra, ponieważ zawartość wyższych harmonicznych narasta w miarę obniżania poziomu napięcia wyjściowego prostownika.

Dobór rozwiązania tyrystorowego pośredniego przemiennika częstotliwości służącego do zasilania badanego silnika indukcyjnego klatkowego przeprowadzono kierując się możliwościami przemysłowego stosowania, przewidywanym programem badań, łatwością obsługi, pewnością działania, kosztem.

Schemat ideowy przemiennika pośredniego użytego do zasilania silnika przedstawiono na rys. 1. W przedstawionym przemienniku pośrednim:

- nastawianie napięcia wyjściowego wymaga nastawiania napięcia zasilania przemiennika przy użyciu autotransformatora,
- zastosowano falownik o wyjściu trójfazowym z fazowym układem wyłączania tyrystorów, w którym częstotliwość zmiany stanu pracy tyrystorów jest równa częstotliwości wyjściowego napięcia przemiennego,
- rolę filtra wygładzającego napięcie zasilania falownika spełnia bateria kondensatorów włączona równolegle do zacisków wyjściowych prostownika,

- prostownikiem jest trójfazowy prostownik niesterowany o mostkowym układzie połączenia diod.



Rys. 1. Schemat ideowy tyrystorowego pośredniego przemiennika częstotliwości

Napięcie wyjściowe przemiennika pośredniego jest odkształcone. Z tego powodu własności silnika indukcyjnego klatkowego zasilanego z pośredniego przemiennika częstotliwości pogorszą się w porównaniu z zasilaniem napięciem sinusoidalnym, jeżeli założyć, że wartości skuteczne napięć zasilania silnika są takie same. Równość wartości skutecznych napięć zasilania silnika dla obu typów zasilania oznacza bowiem, że wartości skuteczne pierwszych harmonicznych napięcia różnią się na skutek odkształconego przebiegu napięcia wyjściowego przemiennika pośredniego.

Własności silnika indukcyjnego klatkowego przy zasilaniu z pośredniego przemiennika częstotliwości zależą nie tylko od własności przemiennika, 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 klatkowy 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.

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

Badania własności silnika indukcyjnego klatkowego przy zasilaniu z tyrystorowego pośredniego przemiennika częstotliwości przeprowadzono dla częstotliwości: $f = 20, 30, 40, 50$ Hz podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego. Przy tych samych częstotliwościach badano również własności silnika przy zasilaniu z przetwornicy maszynowej. Porównanie własności silnika przy obu typach zasilania pozwala na ustalenie wpływu odkształcenia napięcia wyjściowego przemiennika pośredniego na własności silnika.

Dla obu typów zasilania zdjęto pomiarowo charakterystyki biegu jałowego, zwarcia, momentu krytycznego, elektromechaniczne oraz przeprowadzono próby nagrzewania się wentylacji własnej i wymuszonej (wentylator napędzany niezależnym silnikiem indukcyjnym o takiej samej liczbie par biegunów jak silnik badany). Taki program badań pozwala na określenie własności silników obecnie produkowanych przy zasilaniu z pośrednich przemienników częstotliwości oraz na ustalenie podstawowych wytycznych konstrukcyjnych budowy silników przystosowanych do zasilania z pośrednich 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 którego silnik przy sinusoidalnym kształcie napięcia zachowuje stałą wartość momentu krytycznego. Napięcia te dla badanego silnika wg pracy [1] przy zachowaniu przeciążalności momentem $p_M = 1,7$ wynoszą:

- dla 20 Hz - 149 V,
- dla 30 Hz - 211 V,
- dla 40 Hz - 276 V,
- dla 50 Hz - 338 V.

Dla zilustrowania wpływu zasilania z tyrystorowego pośredniego przemiennika częstotliwości na własności silnika indukcyjnego klatkowego przedstawiono zależności:

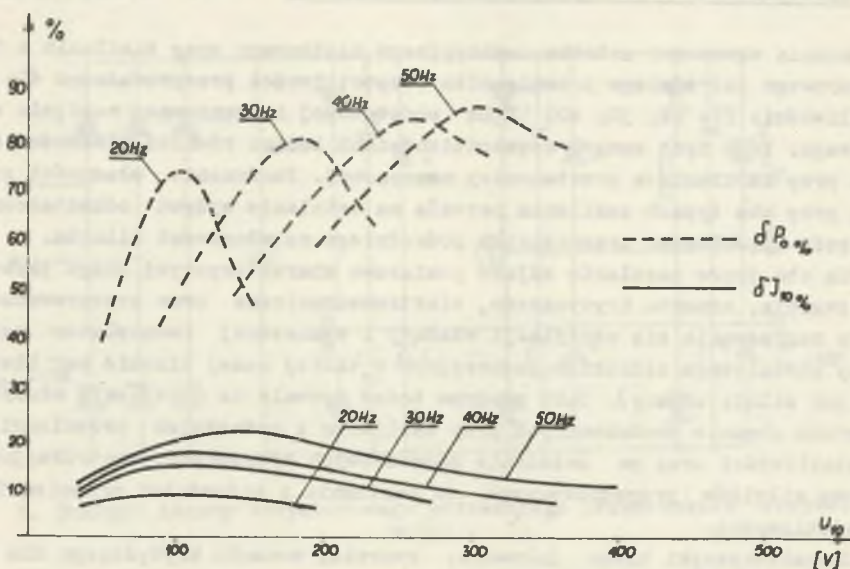
$$\delta W = \frac{W_s - W_p}{W_s} 100$$

przy czym:

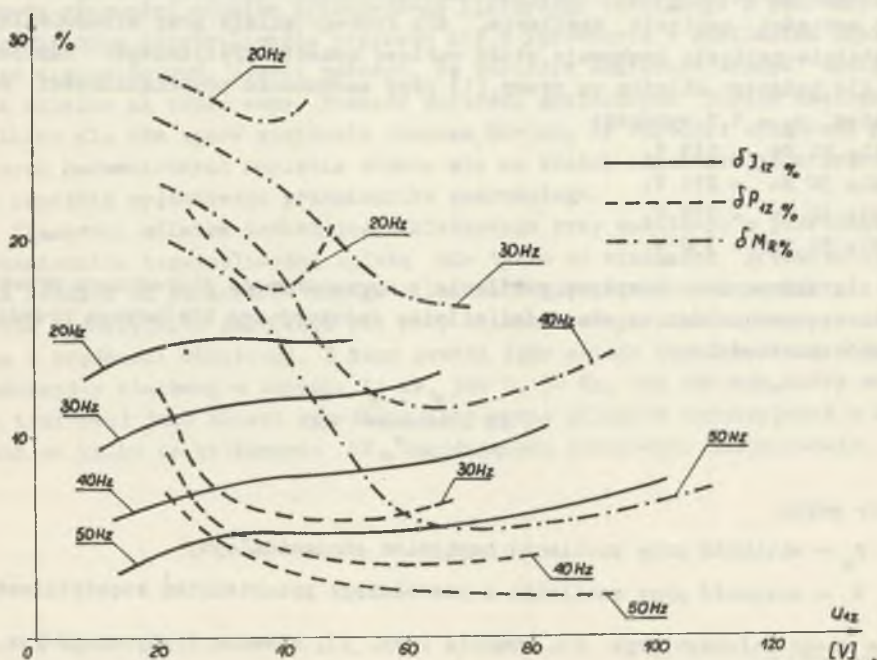
W_s - wielkość przy zasilaniu napięciem sinusoidalnym,

W_p - wielkość przy zasilaniu z pośredniego przemiennika częstotliwości,

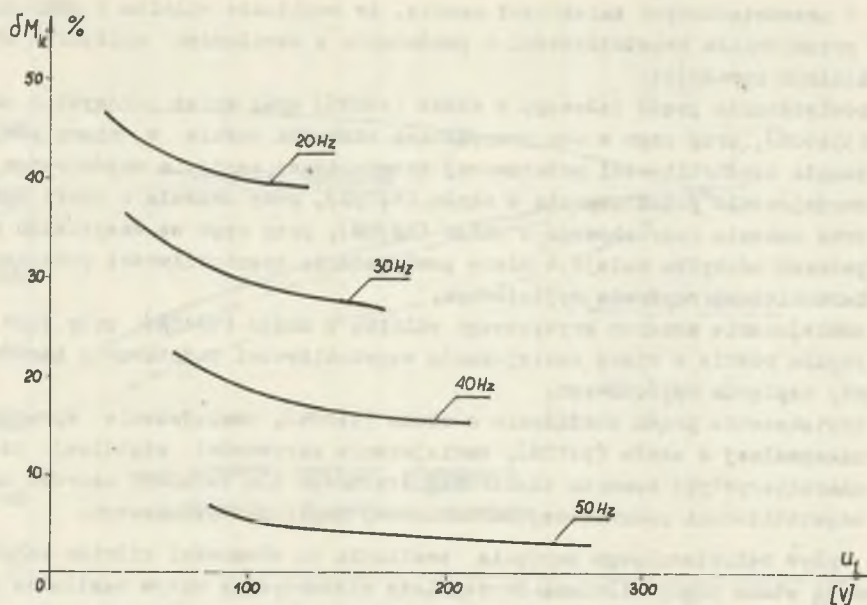
dla biegu jałowego (rys. 2), zwarcia (rys. 3), momentu krytycznego (rys. 4), charakterystyk elektromechanicznych (rys. 5).



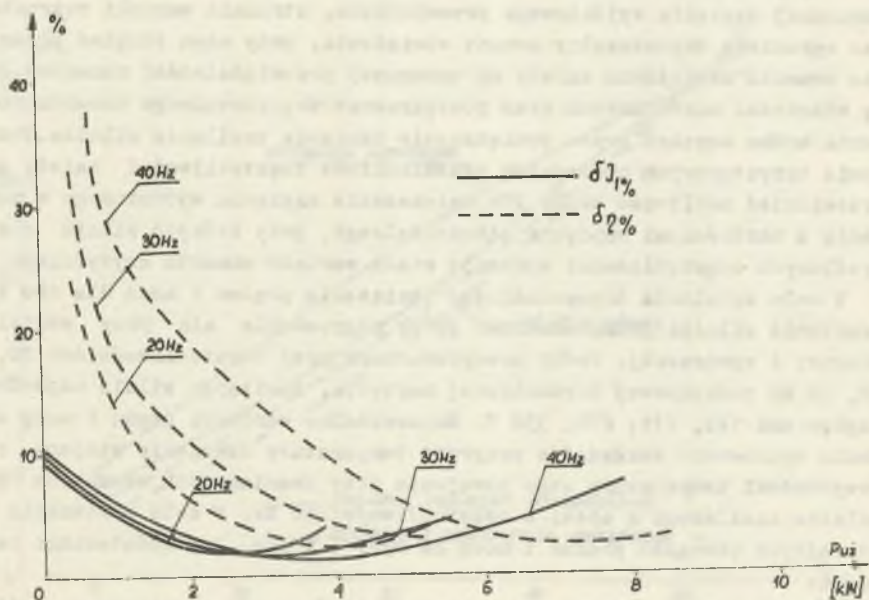
Rys. 2. Procentowa odchyłka prądu i mocy przy biegu jałowym



Rys. 3. Procentowa odchyłka prądu, mocy i momentu w stanie zwarcia



Rys. 4. Procentowa odchyłka momentu krytycznego



Rys. 5. Procentowa odchyłka prądu i sprawności przy obciążeniu

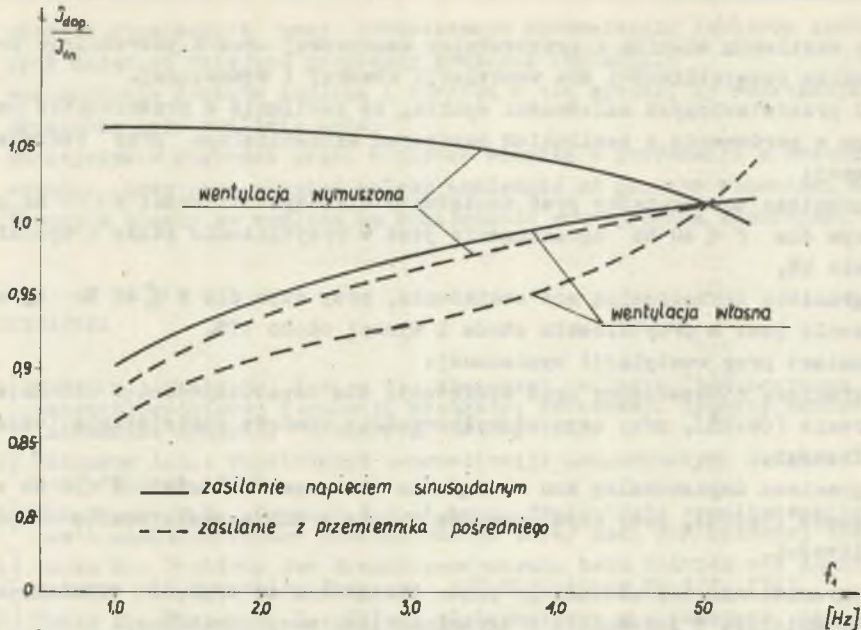
Z przedstawionych zależności wynika, że zasilanie silnika z pośredniego przemiennika częstotliwości w porównaniu z zasilaniem napięciem sinusoidalnym powoduje:

- powiększenie prądu jałowego o około ($4 \pm 20\%$) oraz strat jałowych o około ($35 \pm 90\%$), przy czym w obu przypadkach odchyłka rośnie w miarę powiększania częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego,
- zmniejszenie prądu zwarcia o około ($6 \pm 15\%$), mocy zwarcia o około ($2 \pm 24\%$) oraz momentu rozruchowego o około ($8 \pm 30\%$), przy czym we wszystkich przypadkach odchyłka maleje w miarę powiększania częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego,
- zmniejszenie momentu krytycznego silnika o około ($5 \pm 45\%$), przy czym odchyłka rośnie w miarę zmniejszania częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego,
- powiększenie prądu obciążenia o około ($5 \pm 10\%$), zmniejszenie sprawności maksymalnej o około ($5 \pm 12\%$), zmniejszenie sztywności stabilnej części charakterystyki momentu elektromagnetycznego dla badanego zakresu zmian częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego.

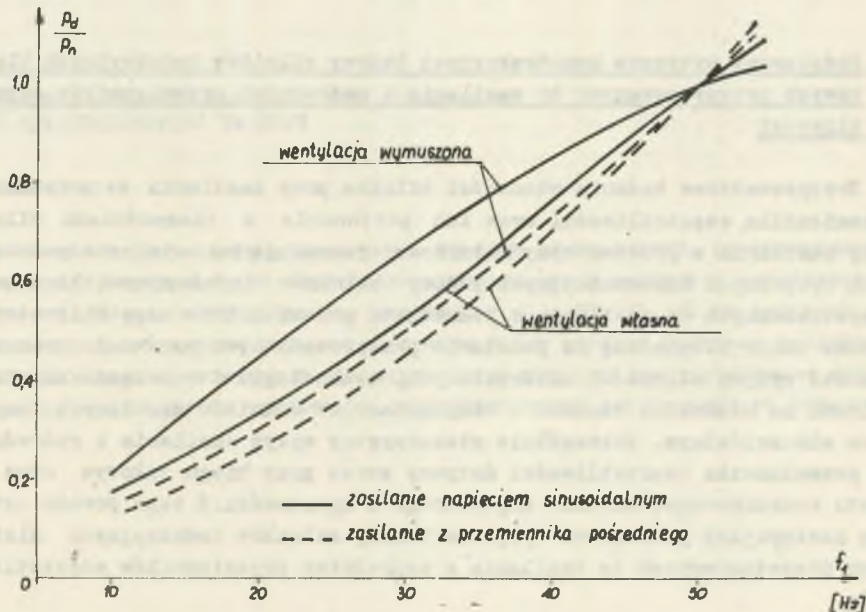
Wpływ odkształconego napięcia zasilania na własności silnika zależy zatem od stanu pracy silnika. Szczególnie niekorzystny wpływ zasilania z pośredniego przemiennika częstotliwości dotyczy strat przy biegu jałowym oraz własności ruchowych i eksploatacyjnych silnika - momentu rozruchowego, momentu krytycznego, sprawności. Zmniejszenie się momentu rozruchowego oraz krytycznego, szczególnie przy małych częstotliwościach podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego przemiennika, utrudnia warunki rozruchu oraz ogranicza dopuszczalny moment obciążenia, przy czym stopień ograniczenia momentu obciążenia zależy od wymaganej przeciążalności momentem. Poprawę własności rozruchowych oraz powiększenie dopuszczalnego momentu obciążenia można uzyskać przez powiększenie napięcia zasilania silnika. Przy budowie tyrystorowych pośrednich przemienników częstotliwości należy zatem przewidzieć możliwość około 20% zwiększenia napięcia wyjściowego w porównaniu z wartościami napięcia sinusoidalnego, przy których silnik dla określonych częstotliwości wykazuje stałą wartość momentu krytycznego.

W celu ustalenia dopuszczalnego obciążenia prądem i mocą dla obu typów zasilania silnika przeprowadzono próby nagrzewania się przy wentylacji własnej i wymuszonej. Próby przeprowadzono przy częstotliwościach 20, 30, 40, 50 Hz podstawowej harmonicznej napięcia, zasilając silnik odpowiednio napięciami 149, 211, 276, 338 V. Dopuszczalne wartości prądu i mocy obciążenia wyznaczono zakładając przyrost temperatury uzwojenia stojana równy przyrostowi temperatury tego uzwojenia przy znamionowych warunkach pracy silnika zasilanego z sieci o częstotliwości 50 Hz. W celu porównania dopuszczalnych obciążeń prądem i mocą na rys. 6 i rys. 7 przedstawiono zależności:

- stosunku dopuszczalnego prądu obciążenia do prądu znamionowego silnika w funkcji częstotliwości,
- stosunku dopuszczalnej mocy do mocy znamionowej w funkcji częstotliwości



Rys. 6. Stosunek dopuszczalnego prądu obciążenia do prądu znamionowego silnika w funkcji częstotliwości dla wentylacji własnej i wymuszonej



Rys. 7. Stosunek dopuszczalnej mocy do mocy znamionowej w funkcji częstotliwości dla wentylacji własnej i wymuszonej

przy zasilaniu silnika z przetwornicy maszynowej oraz z pośredniego prze-
miennika częstotliwości dla wentylacji własnej i wymuszonej.

Z przedstawionych zależności wynika, że zasilanie z przeziennika pośred-
niego w porównaniu z zasilaniem napięciem sinusoidalnym przy wentylacji
własnej:

- ogranicza dopuszczalny prąd obciążenia dla częstotliwości $f < 50$ Hz, przy
czym dla $f < 40$ Hz ograniczenie jest w przybliżeniu stałe i wynosi o-
koło 5%,
- ogranicza dopuszczalną moc obciążenia, przy czym dla $f \leq 40$ Hz ograni-
czenie jest w przybliżeniu stałe i wynosi około 17%,
natomiast przy wentylacji wymuszonej:
- ogranicza dopuszczalny prąd obciążenia dla częstotliwości $f < 50$ Hz w za-
kresie (0÷15%), przy czym odchyłka rośnie w miarę zmniejszania często-
tliwości,
- ogranicza dopuszczalną moc obciążenia dla częstotliwości $f < 50$ Hz w za-
kresie (5÷26%), przy czym odchyłka rośnie w miarę zmniejszania często-
tliwości.

Ograniczenia dopuszczalnego prądu obciążenia ze względów termicznych są
zatem mniejsze w porównaniu z ograniczeniami mocy użytecznej.

W miarę zmniejszania się częstotliwości rośnie bowiem stosunek strat
w uzwojeniach do mocy użytecznej, przez co zmiany prądu obciążenia powodur-
ją znaczne zmiany mocy użytecznej.

4. Podstawowe wytyczne konstrukcyjnej budowy silników indukcyjnych klat- kowych przystosowanych do zasilania z pośrednich przezienników często- tliwości

Przeprowadzone badania własności silnika przy zasilaniu z pośredniego
przeziennika częstotliwości oraz ich porównanie z własnościami silnika
przy zasilaniu z przetwornicy maszynowej pozwalają na ustalenie podstawo-
wych wytycznych konstrukcyjnych budowy silników indukcyjnych klatkowych
przystosowanych do zasilania z pośrednich przezienników częstotliwości. Wy-
tyczne takie ustala się na podstawie przeprowadzonych porównań oraz zna-
jomości wpływu własności materiałowych, technologii i rozwiązań konstruk-
cyjnych na własności ruchowe i eksploatacyjne silników zasilanych napię-
ciem sinusoidalnym. Szczególnie niekorzystny wpływ zasilania z pośrednie-
go przeziennika częstotliwości dotyczy strat przy biegu jałowym oraz mo-
mentu rozruchowego, momentu krytycznego i sprawności. Z tego powodu ustala
się następujące podstawowe wytyczne budowy silników indukcyjnych klatko-
wych przystosowanych do zasilania z pośrednich przezienników częstotliwo-
ści:

- stosowanie w budowie obwodu magnetycznego cieńszych blach o większej
stromości charakterystyki magnesowania i mniejszej stratności od blach

obecnie stosowanych przy równoczesnym wprowadzaniu lakierów izolacyjnych dających mniejsze przyrosty grubości izolacji,

- wymiarowanie żłobków stojana i wirnika w ten sposób, by reakcja rozproszenia była możliwie mała,
- zmniejszenie gęstości prądu w klatce wirnika w porównaniu z obecnie stosowaną, przy czym stopień należy uzależnić od poprawy własności magnetycznych blachy ze względu na konieczność zmniejszenia szerokości zęba.

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 usprawlieniye asinchronnymi dwigatieliami. Izd. "Nauka", 1966.
- [3] Hamudhanov M.W., Usmanov S.Z. i inni: Czastotnoje regulirovaniye skorsti elektropriwodow pieriemennogo toka. Izd. FAN Uzbeckoj SSR.
- [4] Looke G.: Probleme der Spannungsanpassung beim Betrieb von Asynchronmotoren mit variabler Frequenz. AEG-Mitteilung 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 ДВИГАТЕЛЯ, ПИТАЕМОГО ОТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Р е з ю м е

Изложены результаты исследований свойств асинхронного короткозамкнутого двигателя, питаемого от тиристорного инвертора и машинного преобразователя частоты. Исследования поведены для частот $f = 20, 30, 40$ гц основной гармонической напряжения питания. Для этих типов питания сравнены свойства двигателя и даны практические рекомендации по вопросам конструирования асинхронных короткозамкнутых двигателей, приспособленных для питания от инверторов.

PROPERTIES OF THE INDUCTION MOTOR SUPPLIED
FROM THYRISTOR FREQUENCY CONVERTER

S u m m a r y

Investigation results of properties of the induction squirrel-cage motor supplied from frequency converter are presented and compared with properties of the motor supplied from a machine converter.

Some practical outlines are given for designing of motors adapted to be supplied from frequency converters.