

Jerzy Hickiewicz*, Karol Wujec*, Andrzej Wieczorek**

*Politechnika Opolska, Opole

**F.S.E. "BESEL" S.A., Cantoni Group, Brzeg

DOPUSZCZALNY MOMENT OBCIĄŻENIA SILNIKA INDUKCYJNEGO PRZY ZMIANACH CZĘSTOTLIWOŚCI NAPIĘCIA ZASILAJĄCEGO

ADMISSIBLE LOAD TORQUE OF AN INDUCTION MOTOR WITH REFERENCE TO CHANGES OF A VOLTAGE SUPPLY FREQUENCY

Abstract: This article presents an issue of the squirrel-cage induction motor selection in order to work with extended range of voltage supply frequency. Furthermore simplified analysis of an influence of frequency on admissible electromagnetic torque depending on rotor angular velocity has been accomplished. Two types of the motor work have been distinguished, first with the constant relation between voltage and frequency, second with the constant supply voltage. The comparison has been made between construction of a standard motor and a motor adapted to work at extended range of frequency supply voltage. The frequency was extended to around 200Hz. Some of movement characteristics of both motors were presented. A slip measurement was proposed as an additional method of estimation of an admissible instant load torque. The assessment of economical efficiency during the work, both standard motor and motor adapted to work with increased frequency of supply voltage was carried out. The possible savings on energy consumption and costs utilization costs were demonstrated. Final conclusions have been formulated based on these investigations.

1. Wstęp

Celem niniejszego artykułu jest określenie dopuszczalnego momentu obciążenia silnika indukcyjnego klatkowego przy zmianach częstotliwości napięcia zasilania, oraz ocena jego własności eksploatacyjnych w tych warunkach. W tym celu wykonano na hamownicy porównawcze badanie silników zasilanych z przemiennika częstotliwości przy różnych warunkach chłodzenia i różnych danych nawojowych uzwojenia stojana. Porównano 3 konstrukcje silników:

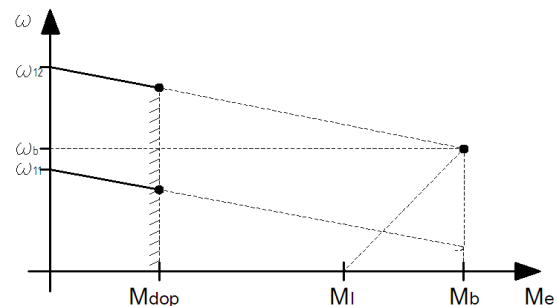
- silnik standardowy Sh 80-4B z chłodzeniem własnym;
- silnik standardowy Sh 80-4B z chłodzeniem obcym;
- silnik zaprojektowany na $f_N=100$ Hz z chłodzeniem obcym.

2. Analiza momentu elektromagnetycznego oraz zależności $\omega=f(M_e)$ przy zmianach częstotliwości napięcia zasilania

Zmiana częstotliwość napięcia zasilania umożliwia płynne lub skokowe nastawianie prędkości w zakresie od prędkości równej zero do prędkości maksymalnej, dopuszczalnej ze względów wytrzymałościowych. Racjonalnym sposobem nastawiania prędkości obrotowej jest

zasilanie silnika z przemiennika częstotliwości. We współpracy silnika z przemiennikiem można wyróżnić dwa przypadki zmiany częstotliwości: przy zachowaniu stałości U/f oraz drugi przy stałej wartości napięcia zasilania.

Przypadek pierwszy (rys. 1)



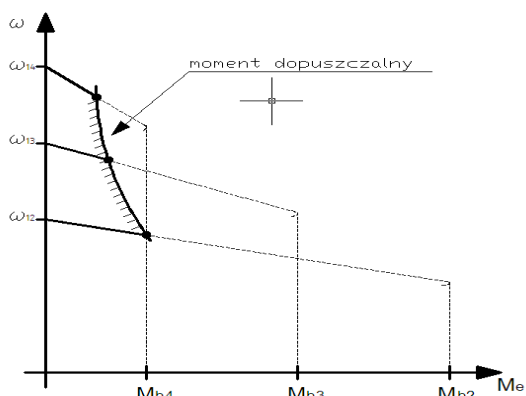
Rys. 1. Charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$ przy $U/f = \text{const}$

- Ze względu na stałą wartość strumienia głównego dopuszczalny moment elektromagnetyczny jest stały, w całym zakresie nastawiania częstotliwości.
- Moc mechaniczna wzrasta wprost proporcjonalnie do częstotliwości.
- Elektromagnetyczny moment krytyczny jest stały.

- Charakterystyki mechaniczne silnika mają ten sam „równoległy” kształt.
- Poślizg przy dopuszczalnym momencie jest odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości.

Przypadek drugi (rys. 2)

Jeśli ze względu na izolację uzwojeń stojana nie można zwiększyć napięcia, to zwiększanie częstotliwości dokonuje się przy stałej wartości napięcia. Powoduje to zmniejszenie głównego strumienia magnetycznego wraz ze wzrostem częstotliwości, w efekcie:



Rys. 2. Charakterystyki mechaniczne $\omega = f(M_e)$ przy $U = \text{const}$

- Dopuszczalny moment elektromagnetyczny zmniejsza się wraz ze wzrostem częstotliwości.
- Moc mechaniczna jest stała.
- Elektromagnetyczny moment krytyczny niekorzystnie zmniejsza się, ze wzrostem częstotliwości w kwadracie.
- Różnica prędkości kątowej synchronicznej i prędkości odpowiadającej momentowi krytycznemu, podobnie jak w poprzednim przypadku, jest stała, jednak ze względu na zmianę momentu krytycznego charakterystyki mechaniczne mają zmienne nachylenie.
- Poślizg przy dopuszczalnym momencie elektromagnetycznym ma wartość stałą, niezależnie od wartości częstotliwości.

W rozważaniach pominięto wpływ rezystancji obwodu stojana na moment elektromagnetyczny. Moment elektromagnetyczny różni się jednak od użytecznego momentu obciążenia silnika o moment strat mechanicznych (łożyska, wentylacja), który znacząco zależy od prędkości wirnika. Dopuszczalny moment obciążenia wynika z dopuszczalnego nagrzania uzwojeń stojana i wirnika. Niemierzalny prąd wirnika wynika z wartości prądu stojana oraz prądu magnesującego, który z kolei zależy od war-

tości głównego strumienia magnetycznego. Przy zmianach prędkości wirnika zmieniają się warunki chłodzenia i rezystancja obwodu wirnika nie jest stała. Z wielu zatem względów rozważania oparte o analizę momentu elektromagnetycznego mają tylko orientacyjny charakter.

3. Konstrukcja silników przeznaczonych do pracy przy zwiększonych częstotliwościach napięcia zasilającego

Zmiany konstrukcyjne silnika, przystosowanego do zasilania napięciem o częstotliwości 100 Hz, wynikają z potrzeby utrzymania stałego dopuszczalnego momentu obciążenia w jak najszerszym zakresie nastawiania prędkości obrotowej. Istotną różnicą pomiędzy silnikiem standardowym z uzwojeniem stojana przystosowanym do napięcia o częstotliwości $f = 50$ Hz, a drugim do częstotliwości $f = 100$ Hz, jest różna liczba zwojów i przekroju uzwojenia (silnik uzwojony na wyższą częstotliwość posiada dwukrotnie mniejszą liczbę zwojów uzwojenia stojana oraz dwukrotnie większy przekrój drutu). Przewojony w ten sposób silnik ma dwa razy większą moc znamionową (1,5 kW) niż silnik pierwotny (0,75 kW). Widoczną różnicą pomiędzy tymi dwoma silnikami jest zastosowanie w silnikach na $f = 100$ Hz chłodzenia obcego. Polega ono na wprowadzaniu czynnika chłodzącego (powietrza) za pomocą obcego wentylatora, nie związanego mechanicznie z wałem maszyny. Ponadto silniki przeznaczone do większej częstotliwości mają stosowane łożyska przeznaczone do dużych prędkości obrotowych (15000 obr/min). Silniki przeznaczone do większej częstotliwości napięcia zasilania produkcji FSE „BESEL”, posiadają izolację klasy F oraz tarcze aluminiowe z wtopioną tulejką stalową.

4. Badania silników

Badania porównawcze przeprowadzono w laboratorium elektrycznym FSE „BESEL”. Miały one na celu wyznaczenie zakresu regulacji częstotliwości jak i charakterystyk ruchowych silników:

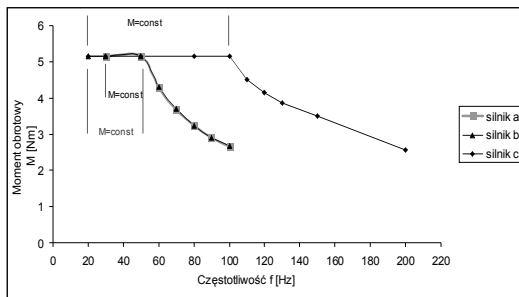
- a) Sh 80-4B uzwojonego na $f_N = 50$ Hz z chłodzeniem własnym,
- b) Sh 80-4B uzwojonego na $f_N = 50$ Hz z chłodzeniem obcym,
- c) Sh 80-4B przeprojektowanego na $f_N = 100$ Hz z chłodzeniem obcym.

Przy wyznaczaniu charakterystyk ruchowych każdy silnik przebadano przy swojej częstotliwości znamionowej.

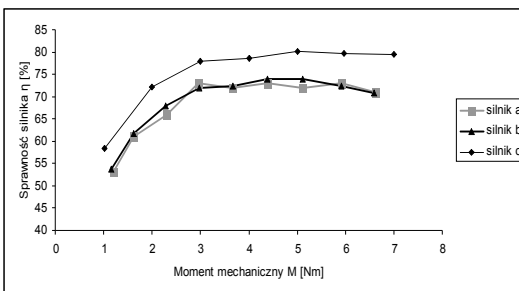
Dopuszczalne graniczne momenty obciążenia określono na podstawie średniego przyrostu temperatury uzwojeń stojana wyznaczanego metodą rezystancyjną (rys. 3), przy czym przerwa od chwili odłączenia napięcia do chwili pomiaru była mniejsza od 30 s. Na rysunkach 4, 5, 6 porównano charakterystyki ruchowe silników.

Na podstawie pomiarów prędkości wirnika, przy granicznym dopuszczalnym momencie obciążenia, wyznaczono poślizg silnika. Na rysunku 7 przedstawiono zależność poślizgu od częstotliwości napięcia silników a, b, c.

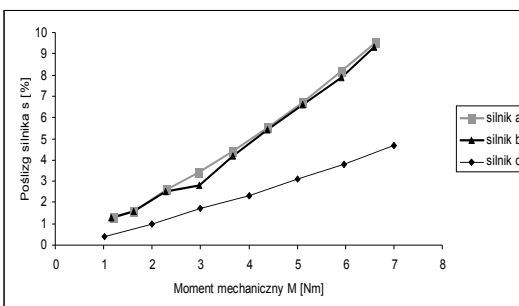
Na rysunku 8 porównano przebiegi sprawności przy dopuszczalnym momencie obciążenia silników a, b, c w funkcji częstotliwości.



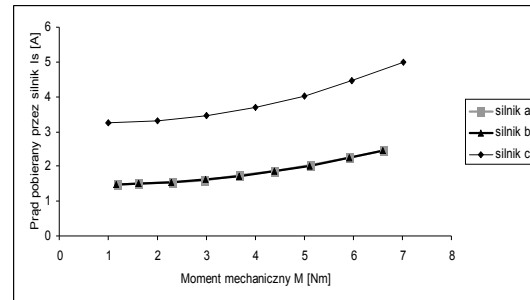
Rys. 3. Dopuszczalne momenty obciążenia i zakresy regulacji częstotliwościowość silników a, b, c



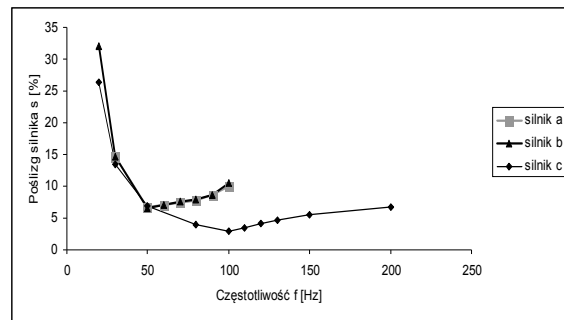
Rys. 4. Porównanie charakterystyki $\eta = f(M)$ silników a, b, c



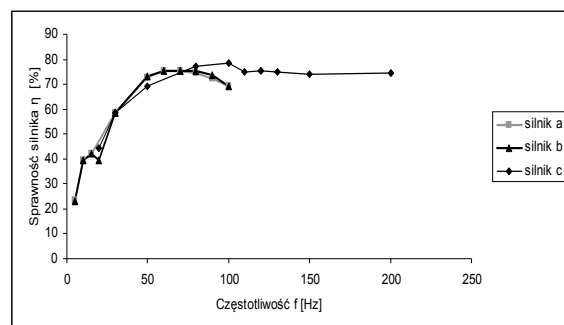
Rys. 5. Porównanie charakterystyki $s = f(M)$ silników a, b, c



Rys. 6. Porównanie charakterystyki $I_s = f(M)$ silników a, b, c



Rys. 7. Zależność poślizgu przy granicznym momencie obciążenia od częstotliwości



Rys. 8. Zależność sprawności η przy granicznym momencie obciążenia od częstotliwości silników a, b, c

5. Ocena kosztów eksploatacji

Silnik elektryczny jest wyrobem tanim, tzn. że koszt inwestycyjny (zakupu i zainstalowania) jest znacznie tańszy od kosztów eksploatacyjnych w ciągu życia silnika zwykle określonego na 20 lat. Dlatego ocena kosztów eksploatacji stanowi istotny wskaźnik doboru silnika. Jeśli porównać dwa silniki „a” oraz „c” obciążone tą samą mocą 0,75 kW, zasilanych napięciem o częstotliwości 100 Hz, to ich sprawności wyniosą: $\eta_a = 0,7$; $\eta_c = 0,78$ (rys. 8). Różnica mocy pobranych przez te dwa silniki wynosi

$$\Delta P = \frac{P_m}{\eta_a} - \frac{P_m}{\eta_c} = P_m \frac{\eta_c - \eta_a}{\eta_a \eta_c},$$

$$\Delta P = 0,75 \frac{0,78 - 0,7}{0,7 \cdot 0,78} = 0,1 kW .$$

Daje to różnicę mocy pobranej 0,1 kW czyli oszczędność energii 0,1 kWh w ciągu godziny. Jeśli przyjąć ostrożnie roczny czas pracy silnika na około 2000-3000 godzin to roczna oszczędność zużycia energii wynosi ok. 200-300 kWh. Jeśli średni koszt 1 kWh przyjąć 0,35 zł/kWh, to roczną oszczędność kosztów eksploatacji w przypadku zainstalowania silnika przystosowanego do napięcia o częstotliwości 100 Hz można szacować w granicach 70-105 zł, a więc więcej niż różnice w cenie silnika standardowego i przystosowanego do częstotliwości 100 Hz. Można ocenić, że większy koszt zakupu silnika zwraca się po ok. 1000-2000 godzinach jego pracy.

6. Wnioski

- Praca silnika przy nastawianej częstotliwości napięcia zasilania jest korzystniejsza przy zachowaniu stałego stosunku U/f .
- Przejście silnika i dostosowanie go do częstotliwości napięcia zasilania 100 Hz zwiększa zakres pracy silnika przy stałym stosunku U/f .
- Zastosowanie silnika dostosowanego do częstotliwości napięcia zasilania daje oszczędności zużycia energii elektrycznej i oszczędność kosztów eksploatacji.

- Graniczny moment obciążenia wyznacza się na podstawie pomiaru nagrzewania uzwojeń stojana. Zaproponowano do tej oceny, pomocniczo, posłużyć się pomiarem poślizgu, którego wartość pozwala szacować straty i nagrzanie wirnika.

7. Literatura

- [1] Materiały firmy FSE „BESEL”
- [2] Jakubiec M., Kłapciński K., Polak A.: *Straty mocy, sprawność i zjawiska pasożytnicze układu napędowego silnik indukcyjny-przemiennik*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne Nr 62/2001
- [3] Hickiewicz J., Kmiecik S., Łukaniszyn M., Michalski S., Tomczuk B.: *Laboratorium maszyn elektrycznych*, skrypt 225 Opole 2000
- [4] Plamitzer A. M.: *Maszyny elektryczne*, Warszawa 1982

Autorzy

Dr hab. inż. Jerzy Hickiewicz, prof. PO,
e-mail: j.hickiewicz@po.opole.pl
Mgr inż. Karol Wujec,
e-mail: karolwujec@gmail.com
Politechnika Opolska,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki,
ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole

Mgr inż. Andrzej Wieczorek,
e-mail: anw10@wp.pl
Fabryka Silników Elektrycznych BESEL S.A.
Cantoni Group
ul. Elektryczna 8, 49-300 Brzeg