

**Maria J. Zielińska, Wojciech G. Zieliński, Włodzimierz Zieliński**  
**Politechnika Lubelska, Lublin**

## **PRZEBIEGI NIEUSTALONE PRĄDU I MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO PODCZAS ROZRUCHU W SILNIKACH INDUKCYJNYCH WYSOKOOBROTOWYCH**

### **TRANSIENTS OF CURRENT AND ELECTROMAGNETIC TORQUE DURING START-UP IN HIGH-SPEED INDUCTION MOTORS**

**Abstract:** High-speed motors are produced in Poland outside the machine-building industry. Only a few motors, adapted to specific purposes, are manufactured, for example, by plants that produce rolling-element bearings. These motors have found their application in driving high-speed grinders in bearing ring raceway production lines.

The properties of motors fed with high-frequency voltage result mainly from the use of a closed slot in the rotor and the high frequency of supply voltage. The use of the closed rotor slot causes strong saturation of the magnetic circuit by the leakage flux around the slot.

Taking account of the phenomenon of saturation of the magnetic circuit due to the leakage flux around the closed rotor slots is a complex issue. In the present article, this phenomenon was taken into consideration by introducing into the mathematical model of the motor, derived for a linear magnetic circuit, rotor leakage inductance dependent on rotor current. The relation was determined experimentally.

#### **1. Wstęp**

Silniki indukcyjne wysokoobrotowe zasilane są napięciem o częstotliwości 400-1500Hz. Stanowią one mało znaną grupę maszyn ze względu na swoje nieliczne zastosowanie. Stosowane są głównie w przemyśle łożyskowym, precyzyjnym, włókienniczym.

Pracują one w specyficznych warunkach, posiadają własności oraz konstrukcję różniącą je od maszyn klasycznych. Spowodowane jest to głównie przez dużą częstotliwość napięcia zasilającego, wprowadzenia intensywnego chłodzenia dla zmniejszenia wymiarów silnika oraz zastosowania zębów zamkniętych w wirniku celem ograniczenia drgań i hałasu [3], [4].

Silniki wysokoobrotowe są w Polsce produkowane poza przemysłem maszynowym. Pojedyncze egzemplarze tych silników, przystosowane do określonych celów np. do napędu wysokoobrotowych szlifierek na liniach produkcyjnych bieżni pierścieni łożysk tocznych.

Rozwijające się technologie wysokoobrotowe skłaniają do przygotowania wdrożenia produkcji silników wysokoobrotowych dla odpowiedniego zakresu mocy, prędkości obrotowej i zakresu jej regulacji.

Silniki o dużej prędkości obrotowej są stosowane do napędu [1]:

- obrabiarek skrawających bardzo twarde materiały (prędkości obrotowe do  $150000 \frac{1}{min}$

oraz moce w przedziale  $10 \div 4000W$ ),

- szlifierek do łożysk tocznych (prędkości obrotowe do  $200000 \frac{1}{min}$  oraz moce do  $2kW$ ),

- ultrawirówek do separacji zawiesin używane w laboratoriach (o mocach do 200W),

- kompresorów oraz pomp odśrodkowych,

- pomp próżniowych.

Światowy postęp w stosowaniu technologii wysokoobrotowych doprowadził do wytwarzania silników elektrycznych o maksymalnej prędko-

ści obrotowej do  $400000 \frac{1}{min}$ .

Stosunkowo skromna jest literatura dotycząca tego typu silników.

Największe częstotliwości, czyli najwyższe prędkości obrotowe wynikają z potrzeb technologicznych, a ograniczone są możliwościami wykonawczymi. Pracują one w specyficznych warunkach, posiadają swoją specyficzną konstrukcję oraz niektóre własności odbiegające od maszyn indukcyjnych klatkowych zasilanych napięciem o częstotliwości 50 Hz [5].

Własności silników zasilanych napięciem o dużej częstotliwości wynikają głównie z zastosowania żłobka zamkniętego w wirniku oraz dużej częstotliwości napięcia zasilającego. Powoduje to silne nasycenie się obwodu magnetycznego strumienia rozproszenia wokół tego żłobka.

Zmiana prądu płynącego w żłobku wywołuje zmienny stan nasycenia, stąd też indukcyjność rozproszenia wirnika nie jest wielkością stałą.

Przy wyznaczaniu indukcyjności rozproszenia uzwojenia wirnika dla klasycznych silników indukcyjnych zasilanych napięciem częstotliwości 50 Hz zwykle pomija się wpływ nasycenia obwodu magnetycznego dla strumienia rozproszenia. Jest to postępowanie typowe i obowiązuje wówczas znany z literatury schemat zastępczy [2].

Identyfikacja tej indukcyjności w silnikach zasilanych napięciem o dużej częstotliwości, w których występuje zjawisko nasycenia rdzenia jest zagadnieniem dość złożonym, z uwagi na skomplikowany rozkład strumieni magnetycznych w szczególności strumieni rozproszenia.

Dodatkowym utrudnieniem jest tutaj uwzględnienie wpływu nasycenia się przesmyku nad zamkniętym żłobkiem wirnika.

## 2. Model matematyczny silnika indukcyjnego wysokoobrotowego

Uwzględnienie w stanach nieustalonych zjawiska nasycenia się obwodu magnetycznego od strumienia rozproszenia wokół zamkniętych żłobków wirnika jest zagadnieniem złożonym. Zjawisko to uwzględnia się poprzez wprowadzenie do modelu matematycznego silnika, wyprowadzonego dla liniowego obwodu magnetycznego, indukcyjności rozproszenia wirnika zależnej od jego prądu. Zależność tę określono na drodze doświadczalnej.

Analiza taka nie jest ścisła, ponieważ:

1. Przy nieliniowym obwodzie magnetycznym maszyny nie obowiązuje zasada superpozycji strumieni magnetycznych: strumienia głównego i strumieni rozproszonych, a więc nie jest możliwe oddzielne analizowanie zjawisk dla obu strumieni.

2. Przy nieliniowym obwodzie magnetycznym nie ma teoretycznego uzasadnienia dla posługiwania się modelem matematycznym wyprowadzonym przy założeniu liniowego obwodu matematycznego i stosowaniu transformacji liniowych do analizy zjawisk nieliniowych.

Mimo tych zastrzeżeń sposób ten jest stosowany i na ogół daje dobrą zgodność wyników obliczeń z wynikami pomiaru.

Na podstawie modelu matematycznego wyprowadzono równania stanu nieustalonego silnika przy uwzględnieniu nasycenia obwodu magnetycznego strumienia rozproszenia wirnika [5].

Indukcyjność całkowitą wirnika  $L'_2$  zależną jest do prądu wirnika  $I'_2$  i określoną w postaci wyrażenia (1) uwzględniono w równaniach opisujących model matematyczny silnika (2).

$$L'_2 = L_\mu + L'_{s2} = L'_2(I'_2) \quad (1)$$

$$\underline{U}_1 = \frac{d\Psi_1}{dt} + j\omega_x \Psi_1 + \underline{I}_1 R_1$$

$$0 = \frac{d\Psi_2}{dt} + j(\omega_x - \omega) \Psi'_2 + \underline{I}'_2 R'_2$$

$$\Psi_1 = L_1 \underline{I}_1 + L_\mu \underline{I}'_2$$

$$\Psi'_2 = L_\mu \underline{I}_1 + L'_2(I'_2) \underline{I}'_2 \quad (2)$$

$$\frac{J}{p_b} \frac{d\omega}{dt} = T_{em} + T_m$$

$$T_{em} = p_b \operatorname{Re}\{j \Psi_1 \underline{I}'_1^*\}$$

## 3. Badania symulacyjne rozruchu silnika

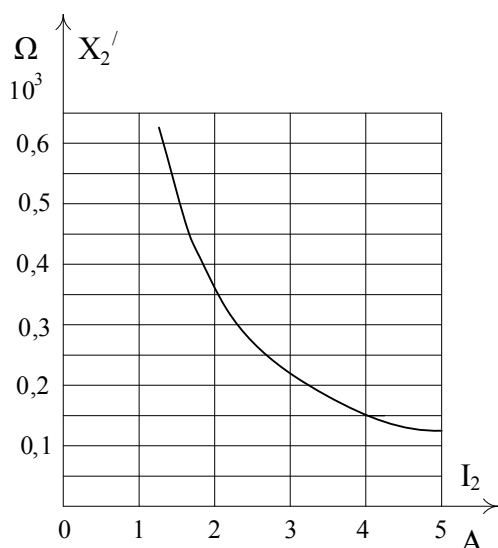
Badania symulacyjne przeprowadzono dla silnika indukcyjnego wysokoobrotowego typu *PTShPd75-90C80* o następujących danych znamionowych:  $P_N = 1,65 \text{ kW}$ ,  $U_N = 300 \text{ V}$ ,  $f_N = 1250 \text{ Hz}$ ,  $I_N = 10 \text{ A}$ ,  $n_N = 75000 \frac{1}{\text{min}}$ ,  $p_b = 1$ ,  $R_1 = 1,77 \Omega$ ,  $R_2 = 1,44 \Omega$ ,  $L_\mu = 0,0024 \text{ H}$ ,  $X_1 = 57,6 \Omega$ ,  $X'_2 = 120 \Omega$ ,  $J = 0,0032 \text{ kgm}^2$ .

W oznaczeniu typu silnika użyto specjalnych oznaczeń składających się z liter oraz cyfr podawanych przez producenta [6]. Pierwsze trzy litery *PTS* pochodzą od skrótu nazwy: „przyrząd technologiczny szlifierski”. Kolejna litera „h” oznacza, że jest to silnik stanowiący inte-

gralną całego urządzenia szlifierskiego. Piąta litera oznacza kierunek obrotów, w tym przypadku „p” – prawy. Kolejna mała litera „d” wskazuje, że jest to silnik dużej mocy. Po literach występują cyfry „75–90” wyrażające prędkość synchroniczną w tysiącach obrotów na minutę. Końcowe cyfry „80” wyrażają średnicę zewnętrzną tulei przyrządu szlifierskiego podaną w milimetrach.

Do przeprowadzenia symulacji zastosowano graficzne rozszerzenie programu Matlab-Simulink z wykorzystaniem metody Runge-Kutta rozwiązywania równań różniczkowych.

Zależność określającą reaktancję rozproszenia  $X_2'$  otrzymaną na drodze doświadczalnej przedstawiono na rys.1.



Rys. 1. Przebieg reaktancji rozproszenia wirnika w funkcji prądu wirnika  $X_2' = f(I_2)$  dla badanego silnika wysokoobrotowego wyznaczona na drodze doświadczalnej

Analizując wykres z rysunku 1 można zauważyć, że krzywa o równaniu (3):

$$y = 38,167x^2 - 373,81x + 1034,7 \quad (3)$$

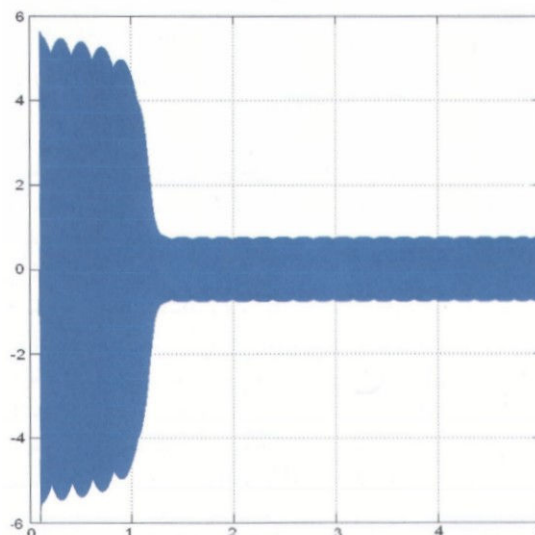
jest aproksymacją funkcji  $X_2' = f(I_2)$ .

W miarę wzrostu prądu wirnika  $I_2$  wartość reaktancji rozproszenia wirnika sprowadzona na stronę stojana  $X_2'$  dąży do wartości ustalonej która dla badanego silnika wynosi  $X_2' = 120\Omega$ .

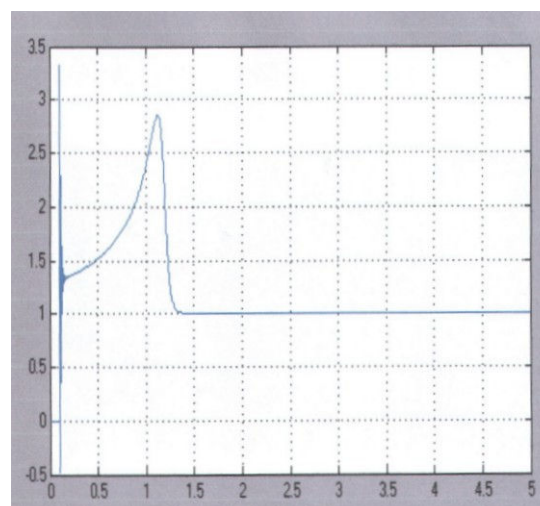
Świadczy to o występowaniu zjawiska nasycenia rdzenia, które wpływa na zmniejszenie

reaktancji w miarę wzrostu prądu. Wynika z tego, że dla wartości prądu wirnika  $I_2 > 5A$  wartość reaktancji wirnika pozostaje stała.

Celem zaobserwowania zmian w przebiegach czasowych prądu i momentu elektromagnetycznego związanych ze zjawiskiem nasycenia rdzenia wokół żłobka w badanym silniku klatkowym na rys.2 i 3 przedstawiono przebiegi tych wartości dla badanego silnika.



Rys. 2. Przebieg amplitudy prądu wirnika  $I_{max}$  w czasie  $t$



Rys. 3. Przebieg amplitudy momentu elektromagnetycznego  $T_e$  w czasie  $t$

Przebiegi prądu i momentu elektromagnetycznego uzyskane na drodze symulacji komputerowej praktycznie nie odbiegają od analogicznych przebiegów dla silników o praktycznie stałych parametrach schematu zastępczego.

Uzyskane przebiegi świadczą o tym, że bardzo szybko nasycą się obwód magnetyczny dla strumienia żłobkowego uzwojenia wirnika, a reaktancja rozproszenia przyjmuje wartość odpowiadającą stanowi nasycenia.

#### 4. Wnioski końcowe

1. Silniki wysokoobrotowe pracują w specyficznych warunkach, posiadają własności oraz konstrukcję różniącą je od maszyn klasycznych. Spowodowane jest to głównie przez dużą częstotliwość napięcia zasilającego, wprowadzenia intensywnego chłodzenia dla zmniejszenia wymiarów silnika oraz zastosowania żłobków zamkniętych w wirniku celem ograniczenia drgań i hałasu. Obwód magnetyczny dla strumienia rozproszenia wokół żłobka wirnika ulega więc silnemu nasyceniu.

2. Zjawisko nasycenia w stanach nieustalonych uwzględnia się poprzez wprowadzenie do modelu matematycznego silnika, wyprowadzonego dla liniowego obwodu magnetycznego, indukcyjności rozproszenia wirnika zależnej od jego prądu. Zależność tę określono na drodze doświadczalnej.

3. W miarę wzrostu prądu wartość reaktancji rozproszenia wirnika maleje i dąży do wartości ustalonej, co świadczy o występowaniu zjawiska nasycenia rdzenia.

4. Wpływ nasycenia w rdzeniu wirnika dla strumienia rozproszenia wokół zamkniętego żłobka zmniejszają wartość reaktancji wirnika i uwidacznia się w postaci zmiany amplitudy i kształtu przebiegu strumienia magnetycznego oraz różnych czasów ustalania się prędkości obrotowej i wartości momentu elektromagnetycznego.

4. Przebiegi prądu i momentu elektromagnetycznego uzyskane na drodze symulacji komputerowej w oparciu o program Matlab-Symulink świadczą o tym, że bardzo szybko nasycą się obwód magnetyczny dla strumienia żłobkowego w wirniku.

#### 5. Literatura

[1]. Dąbrowski M., Rudeński A. *Oprogramowanie do projektowania silników indukcyjnych wysokoobrotowych*. Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy KOMEL, Maszyny Elektryczne, Zeszyty problemowe Nr 80/2008, Katowice – maj 2008.

[2]. Dubicki B.: *Maszyny elektryczne, Tom III: Silniki indukcyjne*, WNT, Warszawa 1964.

[3]. Zielińska M., Zieliński W.: *Chosen electromagnetic parameters of asynchronous high-speed motors of reduced noise level*. Electromagnetic Devices and

Processes in Environment Protection the Second Conference, str 261-264, Naęczów 1997.

[4]. Zielińska M.: *Własności mechaniczne szybkoobrotowych indukcyjnych silników klatkowych*. XI Seminarium Techniczne BOBRME Komel. Katowice 2001.

[5]. Zielińska M.: *Cechy szczególne silników indukcyjnych zasilanych napięciem o dużej częstotliwości*, rozprawa doktorska, Gliwice 1986r.

[6]. Zielińska M., Zieliński W.: *Metoda określenia parametrów elektromagnetycznych szybkoobrotowych silników asynchronicznych uwzględniająca zjawisko nasycenia rdzenia*. Materiały III Sympozjum Sterowanie i Monitorowanie Układów Przemysłowych SM'99, Kazimierz Dolny.