

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

## **WPLYW NASYCENIA OBWODU MAGNETYCZNEGO I WYPIERANIA PRĄDU NA PRZEBIEGI MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO I PRĄDU PODCZAS ROZRUCHU WYSOKOBRÓTOWYCH SILNIKÓW KLATKOWYCH**

### **INFLUENCE OF THE SATURATION OF THE MAGNETIC CIRCUIT AND SKIN EFFECT ON THE TRANSIENTS OF ELECTROMAGNETIC TORQUE AND CURRENT DURING THE START UP OF HIGH-SPEED MOTORS**

**Abstract:** High speed squirrel-cage motors are a relatively unknown group of machines, mainly due to their particular application. High rotational speed is achieved by supplying the motors with 400-1500Hz frequency voltage. Their operation in special conditions results in the fact that their structure and some properties differ from those of squirrel-cage induction machines supplied with 50Hz frequency voltage. The use of closed rotor slots causes strong saturation of the magnetic circuit for the slot leakage flux. Changes in the current in the slot causes a varying state of saturation and thus rotor leakage inductance is not a constant parameter. When determining the rotor winding leakage inductance for classic induction motors supplied with 50Hz frequency voltage, the influence of the saturation of the magnetic circuit for the leakage flux is usually omitted. This is a standard approach and an equivalent scheme, mentioned in literature, is used in such a case. Identification of the inductance in motors supplied with high frequency voltage, in which the phenomenon of core saturation occurs, is a relatively complex issue due to the complicated distribution of magnetic flux, and especially the leakage flux. The value of leakage inductance was determined experimentally. The paper presents differential equations describing a mathematical model and transients of the current and electromagnetic torque, obtained by simulating the start-up of a squirrel-cage high-speed motor.

#### **1. Wstęp**

Wysokoobrotowe silniki klatkowe są mało znaną grupą maszyn ze względu na swoje specyficzne i nieliczne zastosowanie. Dużą prędkość obrotową uzyskuje się przez zasilanie ich napięciem o częstotliwości 400-1500Hz.

Warunki pracy powodują, iż posiadają one konstrukcję oraz niektóre własności odbiegające od maszyn indukcyjnych klatkowych zasilanych napięciem o częstotliwości 50 Hz [5]. Zastosowanie intensywnego chłodzenia umożliwia zmniejszenie wymiarów gabarytowych silnika, natomiast zastosowanie żłobków zamkniętych w wirniku ogranicza drgania i hałas [3], [4].

W Polsce produkowane są pojedyncze egzemplarze tych silników. 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 najczęściej do napędu [1]:

1. obrabiarek skrawających bardzo twarde materiały rozwijających prędkości obro-

towe do 150000 obr/min oraz o mocach w przedziale 10-40000 W,

2. szlifierek do produkcji łożysk tocznych o prędkościach obrotowych do 200000 obr/min oraz mocach do 2 kW,
3. ultrawirówek do separacji zawiesin używanych w laboratoriach (o mocach do 200W),
4. kompresorów oraz pomp odśrodkowych,
5. pomp próżniowych.

Światowy postęp w stosowaniu technologii wysokoobrotowych doprowadził do wytwarzania silników elektrycznych o maksymalnej prędkości obrotowej do 400000 obr/min..

Zasilanie silnika napięciem o dużej częstotliwości determinuje występowanie zjawiska wypierania prądu w przecie klatki wirnika. Obliczenie rezystancji wirnika na podstawie wymiarów gabarytowych obarczone jest dużym błędem, szczególnie dla poślizgów większych od krytycznego, kiedy to częstotliwość prądu w wirniku jest duża. Wyznaczenie tej rezystancji na podstawie pomiarów daje możliwość uzyskania prawidłowych wyników

i ustalenia wpływu wartości i częstotliwości prądu na jej wartość [5], [8].

Zastosowanie zamkniętych żłobków w wirniku powoduje silne nasycenie się obwodu magnetycznego dla strumienia rozproszenia żłobkowego [3].

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 [6].

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

## 2. Model matematyczny silnika wysokoobrotowego

Zjawisko nasycenia obwodu magnetycznego od strumienia rozproszenia wokół zamkniętych żłobków wirnika można uwzględnić wprowadzając do modelu matematycznego silnika, indukcyjność rozproszenia wirnika zależną od jego prądu, wyznaczoną na drodze teoretycznej, bądź doświadczalnej. Równania opisujące stan nieustalony wyprowadzone są w tym przypadku dla liniowego obwodu magnetycznego [7].

Uwzględnienie zjawiska nasycenia w powyższy sposób jest niedokładne, ponieważ nie jest możliwe oddzielne analizowanie zjawisk dla strumienia głównego i strumieni rozprożeń, gdyż przy nieliniowym obwodzie magnetycznym maszyny nie obowiązuje zasada superpozycji tych strumieni. Dlatego też, analizując nieliniowy obwód magnetyczny nie ma teoretycznego uzasadnienia dla posługiwania się modelem matematycznym wyprowadzonym przy założeniu liniowego obwodu matematycznego i stosowaniu transformacji liniowych do analizy zjawisk nieliniowych.

Rezystancja wirnika  $R_2'$  zmienia się w zależności od wartości prądu wirnika  $I_2'$  i jego częstotliwości, natomiast indukcyjność całkowita rozproszenia wirnika  $L_2'$  zależna jest do prądu wirnika [5].

Równania opisujące model matematyczny silnika mają postać:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \frac{d\Psi_1}{dt} + j\omega_x \underline{\Psi}_1 + \underline{I}_1 R_1 \\ \underline{U}_1^* &= \frac{d\Psi_1^*}{dt} + j\omega_x \underline{\Psi}_1^* + \underline{I}_1^* R_1 \\ 0 &= \frac{d\Psi_2'}{dt} + j(\omega_x - \omega) \underline{\Psi}_2' + \underline{I}_2' R_2' \\ 0 &= \frac{d\Psi_2'^*}{dt} + j(\omega_x - \omega) \underline{\Psi}_2'^* + \underline{I}_2'^* R_2' \end{aligned}$$

$$\underline{\Psi}_1 = L_1 \underline{I}_1 + L_\mu \underline{I}_2' \quad (1)$$

$$\underline{\Psi}_1^* = L_1 \underline{I}_1 + L_\mu \underline{I}_2'^*$$

$$\underline{\Psi}_2' = L_\mu \underline{I}_1 + L_2' \left( \underline{I}_2' \underline{I}_2'^* \right) \underline{I}_2'$$

$$\underline{\Psi}_2'^* = L_\mu \underline{I}_1 + L_2' \left( \underline{I}_2' \underline{I}_2'^* \right) \underline{I}_2'^*$$

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

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

## 3. Badania symulacyjne rozruch silnika

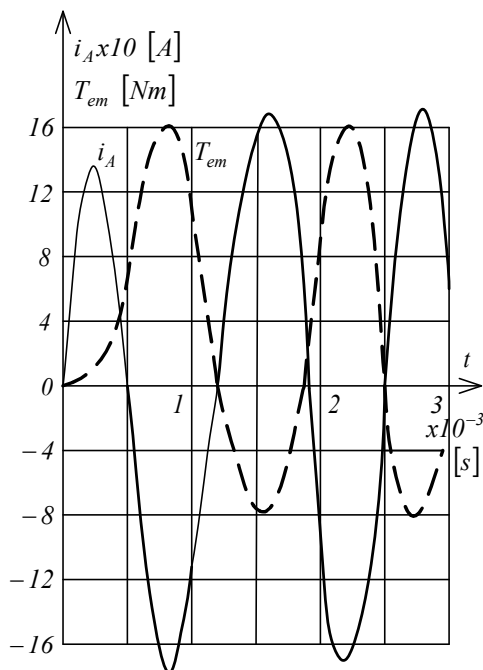
Badania symulacyjne przeprowadzono dla silnika indukcyjnego wysokoobrotowego typu *PTShPd24C170* o następujących danych znamionowych:  $P_N = 9kW$ ,  $U_N = 245V$ ,

$$f_N = 800Hz, n_N = 400 \frac{1}{s}, p_b = 2.$$

Badania przeprowadzono dla znamionowej częstotliwości napięcia zasilania równej  $800Hz$  i znamionowego napięcia zasilania  $U_1 = U_{1N}$  (rys.1.) oraz napięcia obniżonego  $U_1 = 0,25U_{1N}$  (rys.2.).

Zjawisko wypierania prądu w przecie klatki wirnika i nasycenie rdzenia dla strumienia rozpro-

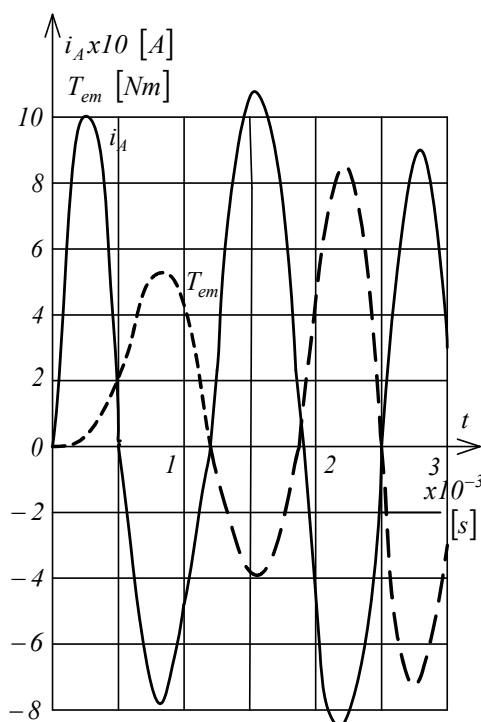
szenia wokół zamkniętego zębka wirnika w obliczeniach uwzględniono wprowadzając do równań (1) rezystancję i indukcyjność rozproszenia wirnika otrzymane na drodze doświadczalnej, uwzględniając zmianę wartości prądu i jego częstotliwość [5], [8].



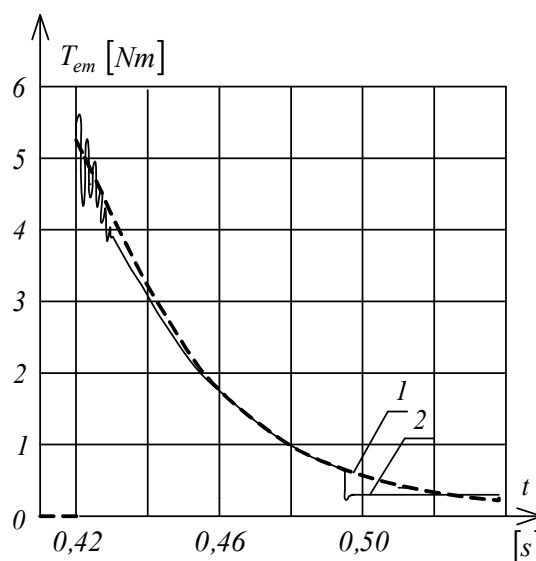
Rys. 1. Przebiegi prądu i momentu elektromagnetycznego w znamionowych warunkach zasilania

Przedstawione na rysunku 1 przebiegi odbiegają nieznacznie od analogicznych przebiegów dla silników o praktycznie stałych parametrach schematu zastępczego tylko w początkowej fazie rozruchu, gdzie w odniesieniu do momentu elektromagnetycznego stwierdza się jego stosunkowo wolne narastanie. Uzyskane przebiegi świadczą o tym, że bardzo szybko nasycia się obwód magnetyczny dla strumienia rozproszenia wirnika.

Rozpatrywany silnik zasilany był z przetwornicy elektromaszynowej. Z tego powodu uzyskanie rzeczywistych przebiegów wymaga uwzględnienia indukcyjności źródła zasilania i obniżenia napięcia zasilania silnika.



Rys. 2. Przebiegi prądu i momentu elektromagnetycznego dla  $U_1 = 0,25U_{1N}$



Rys. 3. Przebieg momentu elektromagnetycznego przy  $U_1 = U_{1N}$ , 1 – odpowiada przebiegowi otrzymanemu przy nasyconym obwodzie magnetycznym, 2 – przebieg przy uwzględnieniu nasycenia

Z analizy przeprowadzonej na podstawie rysunku 2 można stwierdzić, że prąd i moment elektromagnetyczny w rozpatrywanym silniku narastają początkowo wolno i nie osiągają wartości maksymalnych w pierwszym półokre-

sie swoich zmian, jak ma to miejsce w silnikach o stałych parametrach schematu zastępczego. Jest to wynikiem zmian indukcyjności rozproszenia wirnika i świadczy o tym, że zamknięcie żłobków przy zastosowaniu blach o dobrej magnesowalności prowadzi do zmniejszenia prądu i momentu elektromagnetycznego.

Na rysunku 3 pokazano jak zmienia się moment elektromagnetyczny podczas rozruchu do czasu osiągnięcia prędkości biegu jałowego. Przy uwzględnieniu nasycenia rdzenia zmniejsza się moment, co powoduje powstanie oscylacji wirnika.

#### 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 wypierania prądu oraz nasycenia uwzględniono poprzez wprowadzenie do modelu matematycznego silnika rezystancji i indukcyjności rozproszenia wirnika zależnej od częstotliwości i wartości prądu płynącego w wirniku określonych na drodze doświadczeń.

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.

5. Uzyskane przebiegi prądu i momentu elektromagnetycznego odbiegają nieznacznie od analogicznych przebiegów dla silników o praktycznie stałych parametrach schematu zastępczego tylko w początkowej fazie rozruchu. Świadczy to o bardzo szybkim nasyceniu się obwodu magnetycznego dla strumienia rozproszenia żłobkowego wirnika, a reaktancja rozproszenia przyjmuje wartość odpowiadającą stanowi nasycenia.

6. Zmiana momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu silnika z uwzględnieniem zjawiska nasycenia rdzenia i wypierania prądu wskazuje, że przyjmuje on mniejszą wartość. Konsekwencją tego są niewielkie oscylacje prędkości obrotowej w początkowej fazie rozruchu.

#### 5. Literatura

[1]. Dąbrowski M., Rudeński A. *Oprogramowanie do projektowania silników indukcyjnych wysokoobrotowych*. Maszyny Elektryczne, BOBRME, KOMEL, Zeszyty Problemowe, Nr 80/2008, Ryto – 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, Ustroń – maj 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.

[7]. Zielińska M. J., Zieliński W.G., Zieliński W.: *Przebiegi nieustalone prądu i momentu elektromagnetycznego podczas rozruchu w silnikach indukcyjnych wysokoobrotowych*. Maszyny Elektryczne, BOBRME, KOMEL, Zeszyty Problemowe, Nr 82/2009.

[8]. Zielińska M. J., Zieliński W.G.: *Metoda wyznaczenia rezystancji wirnika z uwzględnieniem wypierania prądu dla silników szybkoobrotowych*. Maszyny Elektryczne, BOBRME, KOMEL, Zeszyty Problemowe, Nr 80/2008.