

Maria DEMS¹⁾, Krzysztof KOMEŹA²⁾

PARAMETRY SCHEMATU ZASTĘPCZEGO I WYBRANE PARAMETRY ELEKTROMAGNETYCZNE SILNIKA INDUKCYJNEGO O SKOŚNYCH ŻŁÓBKACH WIRNIKA

Streszczenie: W artykule przedstawiono porównanie parametrów schematu zastępczego oraz wybranych parametrów elektromagnetycznych, wyznaczonych metodą obwodową oraz metodą obwodowo - polową, dla silnika indukcyjnego klatkowego dużej mocy o nietypowej konstrukcji, charakteryzującej się zastosowaniem skośnych żłobków wirnika. Wyznaczone parametry zostały porównane z parametrami silnika o konstrukcji klasycznej, to znaczy o prostych żłobkach wirnika. W obliczeniach uwzględniono nierównomierne rozkłady gęstości prądu w prętach wirnika oraz wpływ nasycenia obwodu magnetycznego na indukcyjności rozproszenia uzwojeń.

PARAMETERS OF EQUIVALENT CIRCUIT AND SELECTED ELECTROMAGNETIC PARAMETERS OF INDUCTION MOTOR WITH SLANTED ROTOR SLOTS

Summary. The comparison of the parameters of the equivalent circuit and the selected electromagnetic parameters of the induction rotor of high power and non-typical structure is presented. These parameters were obtained using circuit and field - circuit methods. They were compared with the classical motor i.e. having radial slots parameters. The non-uniform current distributions in the rotor bars and the influence of the magnetic circuit saturation on the induction motor leakage reactances were taken into account in the calculations.

Key words: electrical machines, induction motors, circuitual methods, field – circuit methods

1. WSTĘP

Parametry klasycznych konstrukcji silników asynchronicznych dają się dość dokładnie określać dzięki wieloletniemu doświadczeniu w ich wyznaczaniu. W przypadku silników o nietypowej konstrukcji stosowane metody klasyczne nie zawsze dają dobre wyniki, zwłaszcza przy wyznaczaniu parametrów schematu zastępczego, z uwzględnieniem ich zmienności spowodowanej zjawiskami nieliniowymi. Dotyczy to zwłaszcza obwodowych metod uwzględnienia zjawiska nasycenia obwodu magnetycznego i wypierania prądu w pręcie wirnika. Dlatego też celowe wydaje się zastosowanie do wyznaczenia parametrów silnika, a szczególnie parametrów wirnika metod polowych. Dotyczy to szczególnie nowych konstrukcji, np. dla silnika indukcyjnego o skośnych żłobkach wirnika, dla których nie zawsze możliwa jest pełna weryfikacja doświadczalna.

W pracy zastosowano metodę polowo-obwodową do wyznaczenia parametrów schematu zastępczego silnika o skośnych żłobkach wirnika, w celu ich porównania z parametrami obliczonymi metodami klasycznymi i określenie ewentualnych dróg korekty tych parametrów. Określenie klasycznych parametrów silnika na podstawie obliczeń polowych jest mimo pozorów problemem bardzo trudnym, ze względu na brak praktycznej możliwości odseparowania poszczególnych składowych strumienia magnetycznego, które są podstawą określenia parametrów zastępczych w klasycznym schemacie zastępczym. Z tego względu posłużono się metodą porównania zastępczej impedancji silnika widzianej z jego zacisków, a określonej za pomocą metody obwodowo-polowej z impedancją określoną metodami klasycznymi.

¹⁾ Dr hab. inż., prof. Politechniki Łódzkiej, Instytut Maszyn Elektrycznych i Transformatorów, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 18/22, tel. (+48)(+42) 6312571, fax (+48)(+42) 2371447, e-mail: mdems@ck-sg.p.lodz.pl

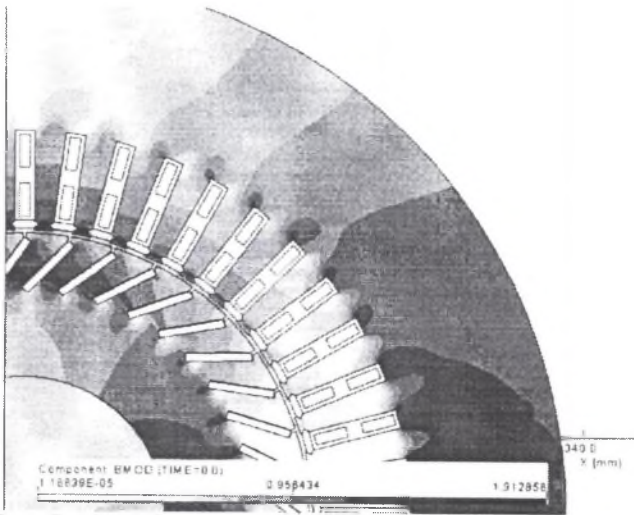
²⁾ Dr hab. inż., prof. Politechniki Łódzkiej, Instytut Maszyn Elektrycznych i Transformatorów, 90-924 Łódź, ul. Stefanowskiego 18/22, tel. (+48)(+42) 6312571, fax (+48)(+42) 2371447, e-mail: komeza@ck-sg.p.lodz.pl

2. PARAMETRY SCHEMATU ZASTĘPCZEGO SILNIKA

Obiektem rozważań był dwubiegunowy silnik indukcyjny wysokonapięciowy, o mocy znamionowej 400 kW, napięciu 6000V, o prostokątnych żłobkach wirnika, nachylonych do promienia pod kątem 35° , w których umieszczono klatkę miedzianą. W celu wyznaczenia parametrów schematu zastępczego silnika wykonano obliczenia elektromagnetyczne, przy wykorzystaniu programu STAT, dla biegu jałowego oraz rozruchu, z uwzględnieniem wpływu zjawisk nieliniowych. Równolegle wykonano obliczenia przy użyciu modelu polowo – obwodowego, oraz porównano wyniki uzyskane różnymi metodami.

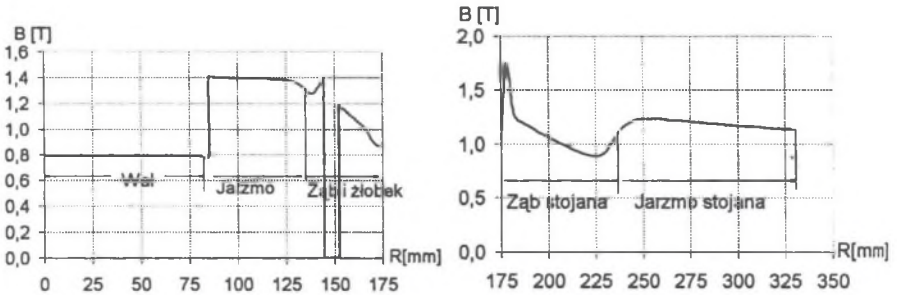
2.1. Bieg jałowy

Dla badanego silnika wyznaczono za pomocą modelu polowo – obwodowego rozkłady pola magnetycznego (rys.1) dla biegu jałowego silnika oraz przebiegi indukcji magnetycznej wzdłuż promienia w wirniku i w stojanie (rys. 2).



Rys.1. Rozkład modulu indukcji przy biegu jałowym silnika dla $\omega t = 0$
Fig.1. Distribution of the flux density magnitude at no-load of the motor, for $\omega t = 0$

Jak wynika z rys.2, w badanym silniku następuje całkowite wnikiwanie strumienia do wału maszyny. Zjawisko to zostało również uwzględnione w obliczeniach elektromagnetycznych, w przypadku silników, w których pakiet wirnika osadzony jest bezpośrednio na wale. W wyniku tych obliczeń wyznaczono indukcję w jarzmie wirnika w stanie jałowym równą $B_{y0} = 1.39$ T, oraz maksymalną indukcję w zębach wirnika $B_{z0} = 1.50$ T. Porównując uzyskane oboma metodami wyniki można stwierdzić, że uzyskano dobrą zgodność wartości indukcji w jarzmie wirnika. Wyznaczona metoda, obwodowo – polowa indukcja, w zębie wirnika jest dla rozpatrywanego promienia mniejsza od wartości otrzymanej w wyniku obliczeń elektromagnetycznych, ale jak wynika z rys.1, obszar, w którym występuje maksymalna indukcja w zębie, nie wchodzi w zakres przedstawiony na rys.2.



Rys. 2. Rozkład maksymalnej indukcji w silniku wzdłuż promienia
Fig. 2. Distribution of the maximal flux density along the motor radius

Na podstawie obliczeń elektromagnetycznych [2] indukcja w jarzmie stojana w stanie jałowym wynosi $B_{s0} = 1.44$ T, natomiast maksymalna indukcja w zębach stojana $B_{ds0} = 1.53$ T. W przypadku zastosowania metody polowo – obwodowej uzyskano o około 10% większe maksymalne wartości indukcji w zębach stojana i o około 17% mniejszą wartość maksymalnej indukcji w jarzmie stojana. W badanym silniku zastosowano w żłobkach stojana kliny wykonane z materiału Vetroferrit, o względnej przenikalności magnetycznej równej 3 dla indukcji 0.7 T. Występujące różnice mogą więc być spowodowane pominięciem w obliczeniach elektromagnetycznych ferromagnetycznych klinów w żłobkach stojana, które mogą mieć wpływ na rozkład indukcji magnetycznej w stojanie. Dodatkową przyczyną rozbieżności jest pominięcie w metodzie polowo - obwodowej promieniowych i osiowych kanałów wentylacyjnych. Jeśliby w obliczeniach elektromagnetycznych pominięto kanały, to obliczony prąd magnesujący wynosiłby $I_{m0} = 8.04$ A.

Znajduje to swoje odbicie w wartościach prądu magnesującego, który wynosi:

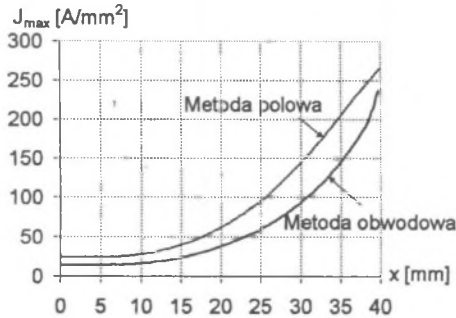
- * wyznaczony z obliczeń elektromagnetycznych – $I_{m0} = 10.33$ A,
- * wyznaczony metodą obwodowo – polową przy uwzględnieniu klinów magnetycznych w żłobkach stojana – $I_{m0} = 7.26$ A,
- * prąd biegu jałowego, z uwzględnieniem składowej czynnej wyznaczony z pomiarów przeprowadzonych dla tego silnika – $I_0 = 9.57$ A.

Jak z tego wynika, przyjęcie w obliczeniach elektromagnetycznych klinów niemagnetycznych daje wartości prądu magnesującego większe od wyników pomiarów, natomiast uwzględnienie klinów ferromagnetycznych w obliczeniach polowo - obwodowych daje wartości nieco mniejsze (po wydzieleniu składowej czynnej z wartości prądu I_0) od uzyskanych na drodze pomiarowej. Dodatkową przyczyną rozbieżności jest pominięcie w metodzie polowo - obwodowej promieniowych i osiowych kanałów wentylacyjnych. Jeśliby w obliczeniach elektromagnetycznych pominąć kanały, to obliczony prąd magnesujący wynosiłby $I_{m0} = 8.04$ A.

2.2. Rozruch

Dla badanego silnika wyznaczono rozkłady maksymalnej gęstości prądu w przecie wirnika w pierwszej chwili rozruchu silnika (dla poślizgu $s = 1$). Obliczenia wykonano metodą obwodowo – polową oraz metodą przewodów elementarnych. Wyniki przedstawiono na rys. 3.

Jak wynika z przedstawionych przebiegów, w rozpatrywanym silniku występuje silnie zjawisko wypierania prądu w prętach wirnika, przy czym uwzględnienie tego zjawiska przez zastosowanie metody przewodów elementarnych daje rozbieżności maksymalnych wartości gęstości prądu nie przekraczające 10%. Parametry schematu zastępczego silnika w stanie zwarcia wyznaczono metodą polowo – obwodową poprzez obliczenie zastępczej impedancji silnika widzianej z jego zacisków. Impedancję tę obliczono również jako sumę poszczególnych składników dla pierwszej chwili rozruchu silnika (to znaczy dla $s = 1$) na drodze obliczeń elektromagnetycznych. W obliczeniach tych uwzględniono zmianę reaktancji uzwojeń silnika, spowodowaną nasyceniem obwodu magnetycznego strumienia rozproszenia.



Rys.3. Rozkład maksymalnej gęstości prądu wzdłuż wysokości pręta wirnika
Fig.3. Distribution of the maximal current density along the height of the rotor bar

W obu przypadkach przyjęto tę samą temperaturę uzwojeń silnika. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Porównanie wyników obliczeń parametrów schematu zastępczego w stanie zwarcia

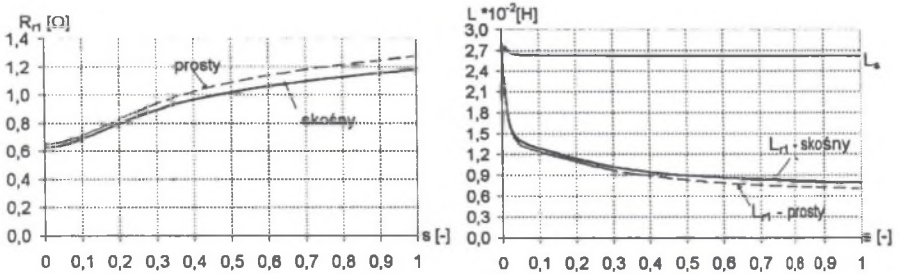
Tabela 1

Lp.	Parametr	Wartość [Ω]	
		Obliczenia elektromagnetyczne	Obliczenia obwodowo - polowe
1.	Rezystancja uzwojenia stojana	0.850	--
2.	Rezystancja uzwojenia wirnika, sprowadzona	1.140	--
3.	Reaktancja uzwojenia stojana	8.241	--
4.	Reaktancja uzwojenia wirnika sprowadzona	2.495	--
5.	Rezystancja zwarcia	1.990	2.164
6.	Reaktancja zwarcia	10.736	9.941

Jak wynika z tabeli 1, wartości rezystancji zwarcia otrzymane z wyników obliczeń elektromagnetycznych są o około 8% mniejsze od uzyskanych w wyniku obliczeń obwodowo – polowych, natomiast odpowiednie wartości reaktancji zwarcia – o około 8% większe. Rozbieżność ta jest spowodowana uwzględnieniem w obliczeniach polowo-obwodowych silniejszego o około 10% wypierania prądu w pręcie wirnika.

3. PORÓWNANIE PARAMETRÓW ELEKTROMAGNETYCZNYCH SILNIKA O PROSTYCH I SKOŚNYCH ŻŁÓBKACH WIRNIKA

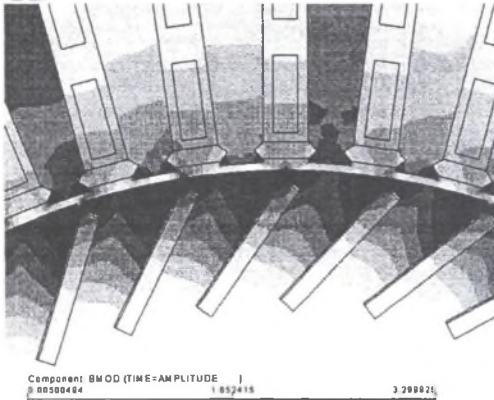
W celu oceny wpływu zastosowania ukośnych żłóbków w wirniku wykonano obliczenia przebiegów parametrów schematu zastępczego silnika w funkcji poślizgu, dla silnika o skośnych i prostych żłóbkach wirnika (rys.4). Jak wynika z przedstawionych przebiegów, w przypadku ukośnych żłóbków wirnika występuje nieco słabsze wypieranie prądu w pręcie niż przy żłóbkach prostych. Można to wytłumaczyć innym rozkładem pola magnetycznego w silniku o prostych i skośnych żłóbkach wirnika, w warunkach rozruchu (rys.5,6). W wyniku tego, w początkowym okresie rozruchu, dla żłóbka ukośnego uzyskuje się mniejsze wartości rezystancji wirnika ϕ około 8% niż przy żłóbku prostym, oraz większe o około 11% wartości indukcyjności uzwojenia wirnika.



Rys.4. Przebiegi sprrowadzone do uzwojenia stojana rezystancji i indukcyjności uzwojenia wirnika oraz indukcyjności uzwojenia stojana dla silnika o prostych i ukośnych żłobkach wirnika

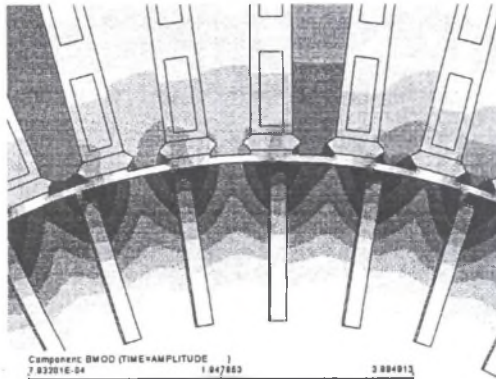
Fig.4. The resistance and leakage inductance of the stator and rotor windings in the motor with radial and slanted rotor slots

W zakresie pracy znamionowej silnika konstrukcja wirnika praktycznie nie wpływa na wartości parametrów uzwojeń silnika.



Rys.5. Rozkład wartości maksymalnej modułu indukcji w silniku o skośnych żłobkach wirnika, przy $s=1$

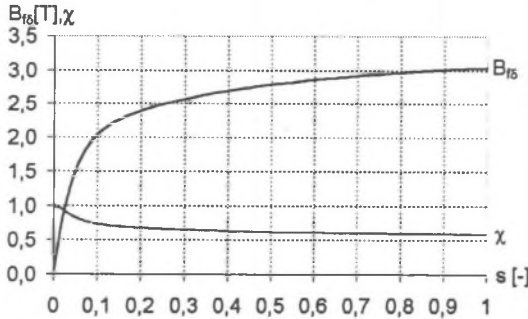
Fig.5. Distribution of the maximal value of the flux density module during starting of the motor with slanted rotor slots, at $s=1$



Rys.6. Rozkład wartości maksymalnej modułu indukcji w silniku o prostych żłobkach wirnika, przy $s=1$

Fig.6. Distribution of the maximal value of the flux density module during starting of the motor with radial rotor slots, at $s=1$

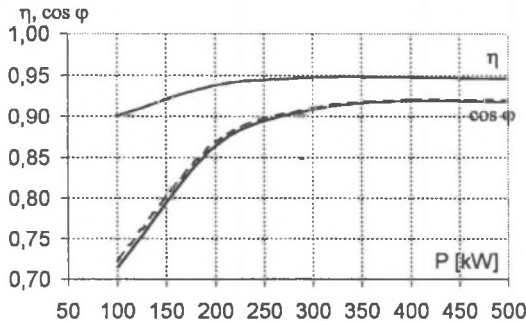
Porównując przebiegi indukcyjności rozproszenia uzwojenia stojana i wirnika, można stwierdzić, że wpływ zjawiska nasycenia obwodu magnetycznego strumienia rozproszenia jest praktycznie niezależny od zastosowanej konstrukcji wirnika. Zjawisko to w obliczeniach elektromagnetycznych zostało uwzględnione przez wprowadzenie współczynnika nasycenia zgodnie z zależnościami podanymi w [3,5], z uwzględnieniem współczynnika korekcyjnego określonego na podstawie wartości obliczeniowej indukcji B_{16} , zweryfikowanej na drodze obliczeń połowych [4]. Przebiegi indukcji obliczeniowej i współczynnika nasycenia w funkcji poślizgu podano na rys.7.



Rys.7. Przebiegi obliczeniowej indukcji i współczynnika nasycenia dla silnika o ukośnych żłobkach wirnika
Fig.7. Curves of the calculated flux density and saturation coefficient of the motor with slanted rotor slots

4. PORÓWNANIE CHARAKTERYSTYK EKSPLOATACYJNYCH SILNIKA O PROSTYCH I SKOŚNYCH ŻŁOBKACH WIRNIKA

Z przedstawionego porównania parametrów schematu zastępczego silników o różnej konstrukcji wirnika można stwierdzić, że zastosowanie skośnych żłobków w wirniku praktycznie nie powinno wpływać na charakterystyki eksploatacyjne silnika w warunkach pracy znamionowej. Potwierdzają to wartości prądu znamionowego obliczonego dla obu konstrukcji, wynoszące odpowiednio $I_s = 44.16$ A dla wirnika o żłobkach skośnych oraz $I_s = 44.07$ A dla wirnika o żłobkach prostych, a także przebiegi sprawności $\eta = f(P)$ oraz współczynnika mocy $\cos \varphi = f(P)$, przedstawione na rys. 8.



Rys.8. Przebiegi sprawności oraz współczynnika mocy dla silnika o prostych i ukośnych żłobkach wirnika
Fig.8. The efficiency and power coefficient in the motor with radial and slanted rotor slots

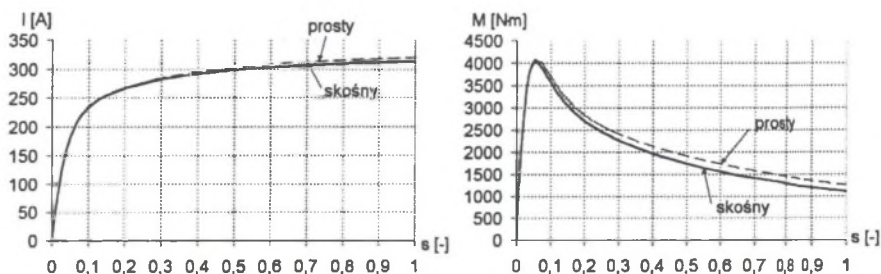
Pewien wpływ konstrukcji wirnika można zaobserwować w przypadku charakterystyk prądu i momentu elektromagnetycznego w funkcji poślizgu, przedstawionych na rys.9, oraz na podstawie wartości zestawionych w tabeli 2.

W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń prądu i momentu rozruchowego dla obu konstrukcji wirnika oraz porównano je z wartościami katalogowymi i wynikami pomiarów dla silnika o skośnych żłobkach wirnika.

Tabela 2
Porównanie parametrów rozruchowych dla żłobków skośnych i prostych

Żłobki	Obliczenia połowo-obwodowe		Obliczenia obwodowe	
	Prąd rozruchowy	Moment rozruchowy	Prąd rozruchowy	Moment rozruchowy
	A	Nm	A	Nm
Proste	357.1	1719	320.4	1259.5
Skośne - obliczenie	366.9	1645	313.4	1111.5
Skośne - znamionowe	--	--	294.4	1156.9
Skośne - pomiary	--	--	--	1136,3

Jak wynika z przedstawionych przebiegów oraz z tabeli 2, zastosowanie ukośnych żłobków w wirniku w niewielkim stopniu wpływa na wartości prądu i momentu rozruchowego. Maksymalne rozbieżności wartości prądu rozruchowego dla różnych konstrukcji wirnika, niezależnie od metody obliczeń, nie przekraczają 2.5%, natomiast rozbieżności momentu – 12% wartości obliczonych dla żłobków skośnych.



Rys.9. Przebiegi prądu i momentu w funkcji poślizgu dla silnika o prostych i ukośnych żłobkach wirnika
Fig.9. The stator current and the electromagnetic torque during starting of the motor with radial and slanted rotor slots

Porównując wyniki obliczeń elektromagnetycznych z danymi katalogowymi i wynikami pomiarów, można stwierdzić, że występujące rozbieżności są rzędu 6.5% dla prądu i poniżej 4% dla momentu elektromagnetycznego. Dość znaczne różnice występują pomiędzy wynikami obliczeń elektromagnetycznych i uzyskanych z metody obwodowo – połowej. Można je wytłumaczyć tym, że w zastosowanym modelu obwodowo – połowym zostały pominięte promieniowe i osiowe kanały wentylacyjne, które uwzględniono w obliczeniach elektromagnetycznych.

5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń parametrów i charakterystyk silników o różnych konstrukcjach wirnika można stwierdzić, że zastosowanie skośnych żłobków wirnika nie wpływa istotnie na parametry i charakterystyki eksploatacyjne silnika w stosunku do silnika o klasycznej konstrukcji. W tym przypadku wystarczającą dokładność obliczeń zapewnia metoda obwodowa, przy prawidłowym odwzorowaniu w niej zjawisk nieliniowych, takich jak wypieranie prądu i nasycenie obwodu magnetycznego.

Zastosowanie do obliczeń metody połowo - obwodowej pozwala jednak, na podstawie otrzymanego rozkładu pola, skorygować przyjęty w obliczeniach elektromagnetycznych współczynnik nasycenia obwodu magnetycznego strumienia rozproszenia.

LITERATURA

1. Dąbrowski M.: Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, WNT, Warszawa 1988.
2. Dems M., Rutkowski Z.: Obliczanie prądu magnesującego i parametrów rozruchowych w silnikach indukcyjnych, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Elektryka, nr 40, 1992, ss.63-73.
3. Dems M.: Symulacja komputerowa przebiegów elektromechanicznych w silnikach indukcyjnych klatkowych. Zeszyty Naukowe nr 754, Rozprawy Naukowe, z.229, ss.176, Politechnika Łódzka 1996.
4. Komęza K., Dems M., Wiak S.: Analysis of the influence of the assumption of equivalent saturation on starting currents in induction motor, Proceedings ISEF'99, Pavia, Italy, September 22-25, 1999, pp. 191 –194.
5. Śliwiński T., Głowacki A.: Parametry rozruchowe silników indukcyjnych, PWN, Warszawa 1982.

Recenzent: Dr hab. inż. Lech Nowak
Profesor Politechniki Poznańskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 lutego 2001 r.

Abstract

For an induction motor of atypical structure the classical methods of estimating the parameters may not lead to the correct results, especially when evaluating parameters of the equivalent circuit including their variations caused by non-linear effects.

This can be the case of the circuitual methods taking into account the phenomena of the magnetic circuit saturation and the skin effect in the bars of the rotor. For this reason it seems logical to use the field methods for calculating the parameters of the motor (in particular in modern structures, e.g. an induction motor with slanted rotor slots, for which it is not always possible to verify the results by experiment).

Estimating the motor parameters from the field calculations is very difficult because it is virtually impossible to separate the magnetic stream components, which are necessary to evaluate equivalent parameters of the equivalent circuit. For this reason the method of comparison of the equivalent motor impedance seen from outside and calculated by means of the field - circuit method with the results of the electromagnetic calculations was taken into consideration.

In the paper the electromagnetic calculation method of estimating the equivalent circuit parameters of the motor with slanted rotor bars was analysed. The non-uniform current distributions in the rotor bars and the influence of the magnetic circuit saturation on the induction motor leakage reactances were included in these calculations. The comparison of the static characteristics of the motors with slanted and radial slots show that the influence of the slant of the rotor slots is negligible. The results were compared with those obtained from the field - circuit method.