

Maria Dems, Krzysztof Komeza
Politechnika Łódzka, Łódź

WPLYW KSZTAŁTU RDZENIA STOJANA NA PARAMETRY EKSPLOATACYJNE SILNIKA INDUKCYJNEGO MAŁEJ MOCY

INFLUENCE OF THE STATOR CORE SHAPE ON THE PARAMETERS OF SMALL INDUCTION MOTOR

Abstract: Higher requirements concerning economical aspect of the production of induction motors encourage designers to look for new variants of motor construction. The small induction motors with stator core shape with cut of parts making stator yoke width not constant is an example of an atypical motor construction. The subject of this paper is a field-circuit and circuit analysis of this type of motor construction. The aim of this analysis is to determine the influence of the saturation of the magnetic circuit on motor parameters. It is shown that the cuts of the stator core have significant influence at standstill and less significant at load characteristics of induction motors. Comparisons with measurements are given. From comparisons between the results of the analysis and experiments, it is clarified that the use of presented circuit and field-circuit methods can estimate characteristics of induction motors with enough accuracy even for motors with specific construction like not round stator core.

1. Wstęp

W produkcji serii silników indukcyjnych istotną rolę odgrywają względy ekonomiczne, polegające, między innymi, na maksymalnym wykorzystaniu taśm elektrotechnicznych. Efektem tego jest znormalizowanie wartości średnic zewnętrznych pakietu stojana, w zależności od wzniosu osi wału silnika. W niektórych przypadkach, zwłaszcza w przypadku silników małej mocy, można spotkać konstrukcje rdzenia stojana z nierównomierną grubością jarzma, spowodowaną ścięciem okręgu zewnętrznego blachy stojana. Taka konstrukcja może jednak prowadzić do nadmiernej koncentracji linii pola w pewnych obszarach jarzma stojana, co może niekorzystnie wpłynąć na parametry eksploatacyjne silnika. Celem pracy jest przeanalizowanie rozkładu pola magnetycznego dla przykładowego silnika indukcyjnego małej mocy o równomiernej i nierównomiernej grubości jarzma stojana oraz wyznaczenie jego parametrów eksploatacyjnych z wykorzystaniem modelu obwodowo-polowego oraz obwodowego. Wykonane obliczenia zweryfikowano na drodze pomiarowej.

2. Opis badanego silnika

Obiektem badań jest czterobiegunowy silnik indukcyjny klatkowy o mocy $P_N = 0,75$ kW, napięciu $U_N = 400$ V (uzwojenia połączone w gwiazdę), $f_N = 50$ Hz. Silnik ten posiada pakiet stojana posiadający 4 równomierne ścięcia na obwodzie zewnętrznym. Średnica zewnętrzna

blachy stojana wynosi $D_{se} = 120$ mm, natomiast średnica okręgu wpisanego w obrys blachy stojana wynosi $D_{se}^* = 114$ mm, co daje różnicę wymiarów zewnętrznych pakietu stojana 6 mm (5% maksymalnej średnicy zewnętrznej pakietu). Powoduje to jednak około 30% różnicę wysokości jarzma stojana. Wirnik klatkowy może mieć dwa rozwiązania: ze żłobkami zamkniętymi oraz z półzamkniętymi. Dla badanego silnika wykonano obliczenia polowe, przy założeniu rzeczywistego kształtu rdzenia stojana, dla wirnika o żłobkach zamkniętych. Wykonano również obliczenia elektromagnetyczne metodą obwodową, przy założeniu kołowego kształtu rdzenia stojana, dla dwóch wartości średnicy zewnętrznej blachy stojana, oraz dla wirnika zarówno o żłobkach zamkniętych jak i półzamkniętych.

3. Obliczenia polowe

Badany silnik został zamodelowany za pomocą metody obwodowo-polowej łączącej elementy obliczenia polowego dwuwymiarowego w przekroju poprzecznym silnika z elementami skupionymi reprezentującymi elementy silnika nieuwzględnione w płaszczyźnie rozwiązania, takimi jak połączenia czołowe stojana.

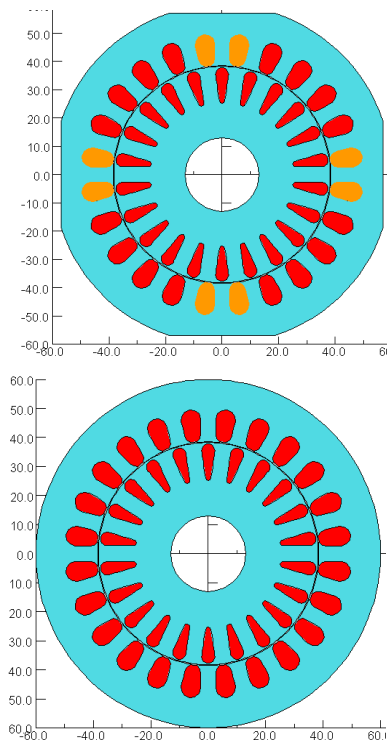
$$\mathbf{RX} + \mathbf{S} \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial t} = \mathbf{B} \quad (1)$$

Układ równań dla tej metody możemy przedstawić w ogólnej postaci (1) i jest on rozwiązy-

wany z zastosowaniem schematu różnicowego z krokiem Θ względem czasu, dobieranym na podstawie porównania wyniku otrzymanego z zastosowaniem kroku Δt i dwóch kroków $\Delta t/2$. Dla zagadnień nieliniowych dla każdego kroku wykonywane są jeszcze iteracje uwzględniające nieliniowość blachy elektrotechnicznej z zastosowaniem metody Newtona-Raphson'a. Alternatywą dla rozwiązania zagadnienia niestacjonarnego jest założenie harmonicznego przebiegu w czasie wszystkich wielkości polowych. Rozwiązanie problemu prowadzi w tym przypadku do rozwiązania układu równań algebraicznych o zespolonych współczynnikach.

$$RX + jSX = B \quad (2)$$

W przypadku tak zdefiniowanego problemu quasi-ustalonego wartość przenikalności jest stała w okresie przemagnesowania i jest przyjmowana w drodze iteracyjnego procesu Newtona-Raphson'a na podstawie wartości maksymalnej modułu wektora indukcji magnetycznej. Powoduje to problemy dla przypadków, gdy występuje duża zmienność wartości modułu indukcji magnetycznej w okresie przemagnesowania i jego wartości osiągają znaczne wartości, nawet ponad 2T.



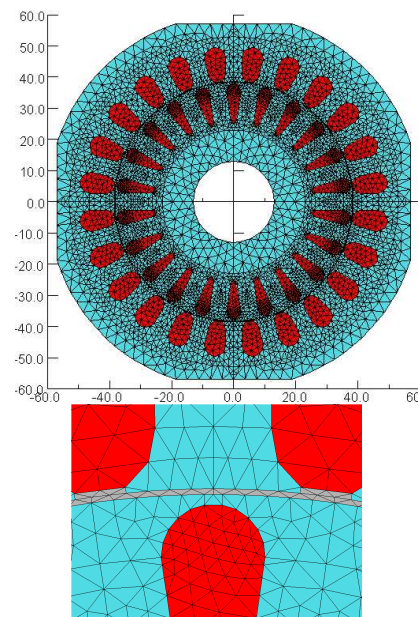
Rys. 1. Dwie konstrukcje silnika porównane w pracy ($D_{se} = 120$ mm)

W pracy rozważono dwie konstrukcje obwodu magnetycznego silnika: z rdzeniem stojana ze

ścięciami pozwalającymi na uzyskanie oszczędności w procesie wykrawania blach, oraz bez ścięć, przy zachowaniu maksymalnej wartości średnicy zewnętrznej pakietu (rys.1).

Dla silnika ze ścięciami wykonano obliczenia prądu magnesującego. Wartość prądu magnesującego może być obliczona dla modelu quasi-ustalonego o założonej sinusoidalnej zmienności przebiegów polowych w czasie, jak również jako efekt końcowy rozruchu silnika lub obliczenia niestacjonarnego przy założeniu braku przepływu prądu w klatce wirnika.

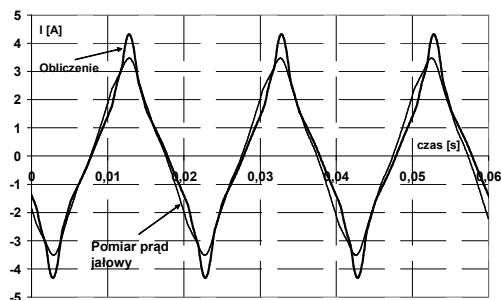
Ze względu na znaczne nasycenie elementów jarzma stojana w obszarze ścięcia obliczenie quasi-ustalone daje w tym przypadku wartości znacznie różniące się od wartości pomierzonych. Z tego względu obliczenia wykonano przy pomocy modelu z rozwiązaniem względem czasu. Wykorzystano wartości prądu po ustaleniu się stanu nieustalonego związanego z załączeniem napięcia po czasie około 0.1 sekundy. Na wykresach przedstawiono wyniki obliczeń przebiegów czasowych prądu magnesującego silnika dla zasilania uzwojeń napięciem $U_f = 230$ V.



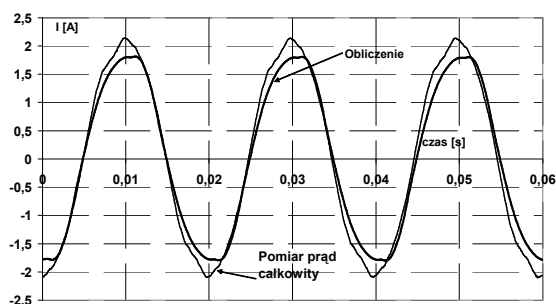
Rys. 2. Siatka podziałowa zastosowana do modelowania badanego silnika

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono porównanie pomierzonych wartości prądu jałowego oraz obliczonych wartości prądu magnesującego będących wynikiem obliczeń dla stanu nieustalonego wywołanego wzbudzeniem sinusoidalnym przy założeniu braku prądów indukowanych w uzwojeniach wirnika po ustaleniu się przebiegu. Należy podkreślić, że prąd pomierzony poka-

zany na przebiegach 3 i 4 jest rzeczywistym prądem biegu jałowego, a więc zawiera również składową czynną.

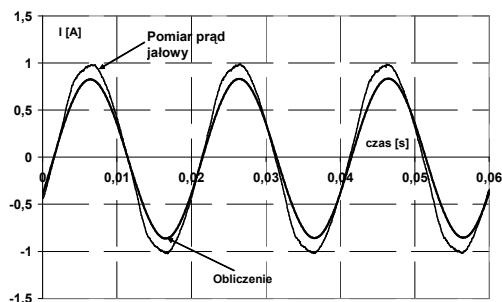


Rys. 3. Porównanie obliczonego przebiegu prądu magnesującego dla uzwojenia 1



Rys. 4. Porównanie obliczonego przebiegu prądu magnesującego dla uzwojenia 2

Na rysunku 5 przedstawiono podobne porównanie dla wybranego uzwojenia silnika zasilanego napięciem 150 V. Podobną zgodność uzyskano dla dwóch pozostałych uzwojeń fazowych.

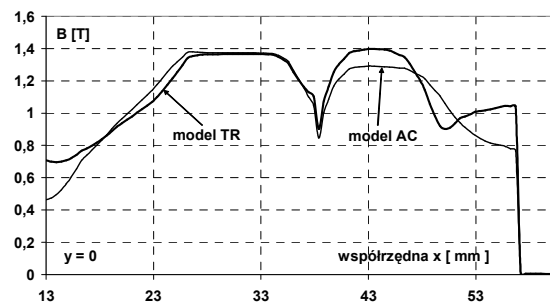
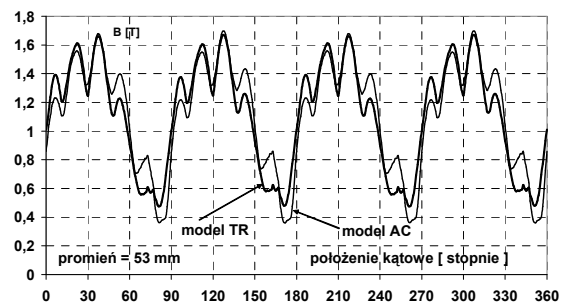


Rys. 5. Porównanie obliczonego przebiegu prądu magnesującego dla uzwojenia 1

Porównanie przebiegów obliczonych wskazuje na występowanie asymetrii prądów magnesujących przy zasilaniu silnika połączonego w trójkąt. Występujące różnice pomiędzy prądem obliczonym i pomierzonym dla uzwojenia fazowego umieszczonego w żłobkach najbliższych ścięcia (wyróżnione na rys.1) spowodowane jest nasyceniem elementów jarzma w tym obszarze i problemów z poprawnym określeniem przebiegu charakterystyki magnesowania. Charakterystyki magnesowania dostarczane przez

producentów blach mają największą wartość indukcji rzędu 1.7 T. Model dwuwymiarowy nie uwzględnia również wypierania strumienia magnetycznego do powietrza dla indukcji większych od indukcji nasycenia. O tym, że nasycenie jest tu elementem dominującym wskazuje dobra zgodność przebiegów dla napięcia obniżonego.

Na rysunku 6 przedstawiono porównanie przebiegów modułu wektora indukcji dla adekwatnych chwil czasowych dla rozwiązania TR i AC. Rozkłady te są zbliżone ze względu na zasilanie silnika ze źródła napięciowego.



Rys. 6. Porównanie rozkładów modułu indukcji dla rozwiązania TR i AC

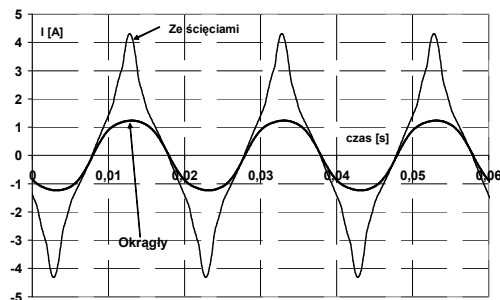
Tabela 1.

Porównanie prądów obliczonych za pomocą modeli AC i TR i pomierzonego prądu jałowego

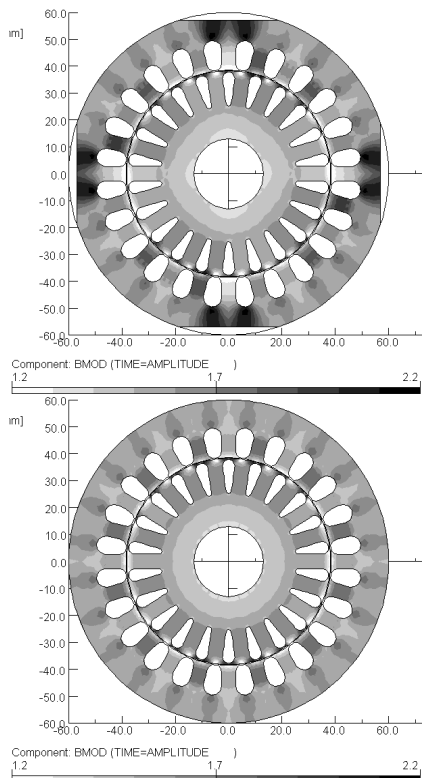
| U_f [V] | | I_m AC [A] | I_m TR [A] | Pomiar I_0 [A] |
|--------------|----|-----------------|-----------------|---------------------|
| 230 | U | 1,66 | 1,36 | 1,48 |
| | V | 1,95 | 1,44 | 1,56 |
| | W | 3,36 | 2,23 | 2,08 |
| | śr | 2,33 | 1,68 | 1,707 |
| 150 | U | 0,58 | 0,61 | 0,71 |
| | V | 0,59 | 0,64 | 0,72 |
| | W | 0,65 | 0,66 | 0,74 |
| | śr | 0,61 | 0,64 | 0,725 |

W tabeli 1 przedstawiono porównanie wyników obliczeń przy zastosowaniu modelu quasi-stacycznego (AC) oraz pełnego rozwiązania względem czasu (TR). Porównanie wyników obliczeń prądu magnesującego uzyskanych przy założeniu sinusoidalnej zmienności wielkości

polowych w czasie (AC) z rozwiązaniem uzyskanym na podstawie stanu ustalonego procesu przejściowego wywołanego zasilaniem silnika układem napięć sinusoidalnych (TR) wskazuje na lepszą dokładność metody TR. Uzyskanie dokładności wskazuje na dobre odwzorowanie poprzez stosowany model rozkładu strumienia głównego. Na rysunku 7 przedstawiono porównanie przebiegu prądu magnesującego dla uzwojenia fazowego o największym prądzie dla wariantu ze ścieciem z przebiegiem prądu dla rdzenia stojana okrągłego.



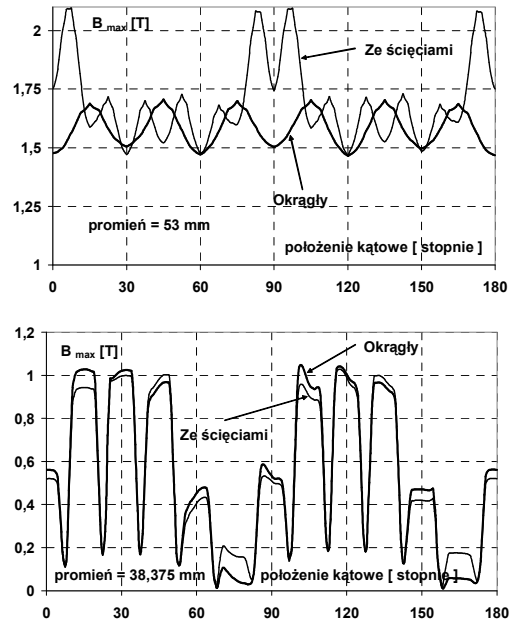
Rys. 7. Porównanie przebiegu prądu dla rdzenia stojana ze ścieciem oraz okrągłego



Rys. 8. Porównanie rozkładów wartości maksymalnych modułu wektora indukcji

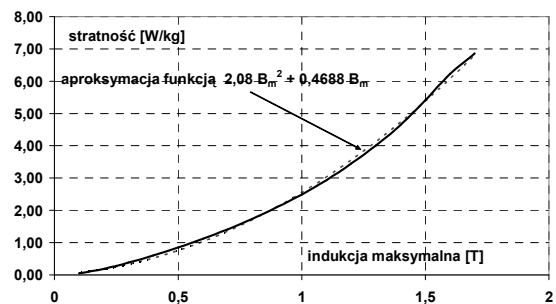
Otrzymane różnice wartości prądu wynikają z znacznej różnicy stanu nasycenia przewężonej części jarzma rdzenia stojana, co jest widoczne na rysunkach rozkładu maksymalnej wartości

indukcji magnetycznej dla rdzenia stojana ze ścieciem oraz okrągłego (rys.8). Porównanie rozkładów wartości maksymalnych modułu wektora indukcji magnetycznej dla rdzenia stojana ze ścieciem oraz okrągłego podano na rys.9.



Rys. 9. Porównanie rozkładów wartości maksymalnych modułu wektora indukcji magnetycznej w jarzmie oraz wzdłuż szczeliny powietrznej

Analiza rozkładów modułu indukcji magnetycznej w silniku ze ścieciem oraz o rdzeniu okrągłym wskazuje, że przesycenie obszaru zwężonego na skutek ściecia jarzma stojana powoduje powstanie asymetrii prądów magnesujących stojana oraz wzrost o 83 % strat na rezystancji uzwojenia stojana wytworzonych przez prądy magnesujące trzech uzwojeń.



Rys. 10. Aproksymacja charakterystyki stratności blachy M 600-50A

Na podstawie rozkładu wartości maksymalnej modułu wektora indukcji oraz aproksymacji krzywej stratności blachy elektrotechnicznej wyznaczono wartość strat podstawowych w rdzeniu stojana. Stwierdzono, że zastosowanie

ściętego rdzenia powoduje wzrost strat o około 9,6 % w stosunku do rdzenia okrągłego.

3. Obliczenia obwodowe

Dla badanego silnika wykonano obliczenia elektromagnetyczne metodą obwodową (programy STAT, STATz), przy założeniu kołowego kształtu rdzenia stojana, dla dwóch wartości średnicy zewnętrznej blachy stojana ($D_{semax} = 120$ mm, i $D_{semin} = 118$ mm) oraz dla wirnika zarówno o żłobkach zamkniętych jak i półzamkniętych. Wykonanie obliczeń dla mniejszej wartości średnicy zewnętrznej stojana było niemożliwe, ze względu na zbyt dużą wartość indukcji w jarzmie stojana. W obliczeniach uwzględniono zjawiska nieliniowe, takie jak nasycenie obwodu magnetycznego silnika i wypieranie prądu w prętach klatki wirnika, z uwzględnieniem również specyfiki żłobków zamkniętych. Wyniki obliczeń uśrednionego prądu biegu jałowego silnika (przy pominięciu występujących niesymetrii) przy zasilaniu napięciem znamionowym ($U = 400$ V, gwiazda), dla wirnika o żłobkach zamkniętych i półzamkniętych, dla dwóch różnych średnic zewnętrznych pakietu stojana zestawiono w tab.2.

Tabela 2.

Porównanie średnich wartości prądów obliczonych za pomocą modelu obwodowego i pomierzonych

| żłobki wirnika | STAT - I_0 [A] | | Pomiar I_{0sr} [A] |
|----------------|------------------|----------------|----------------------|
| | D_{se} 120mm | D_{se} 118mm | |
| półzamknięte | 1,589 | 1.685 | 1,707 |
| zamknięte | 1,579 | 1.676 | |

Na podstawie tabeli 2 można stwierdzić, że zmniejszenie średnicy zewnętrznej stojana o 2 mm (to znaczy o 1,7%), powodujące zmniejszenie wysokości jarzma stojana o około 5%, wpływa na prąd magnesujący silnika, a w efekcie również na jego prąd biegu jałowego i powoduje wzrost tego prądu o około 6%. Jest to spowodowane wzrostem indukcji w jarzmie stojana o około 11,1%.

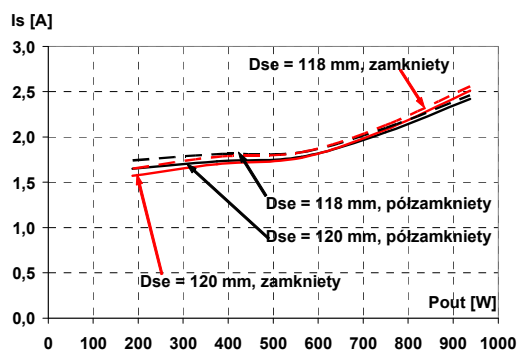
W tabeli 3 zestawiono obliczone i pomierzone wartości strat jałowych dla rozpatrywanych przypadków.

W przypadku strat w rdzeniu, przy niewielkim zmniejszeniu średnicy zewnętrznej pakietu, wzrost indukcji jest kompensowany zmniejszeniem o około 8% masy rdzenia.

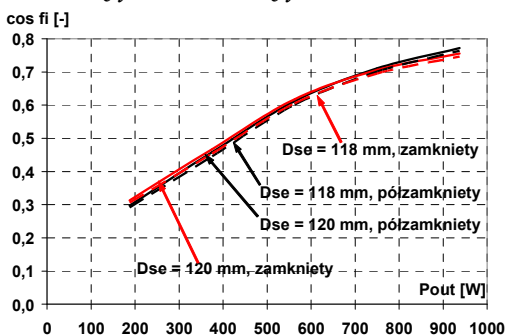
Tabela 3.

Porównanie wartości strat w rdzeniu obliczonych za pomocą modelu obwodowego i pomierzonych

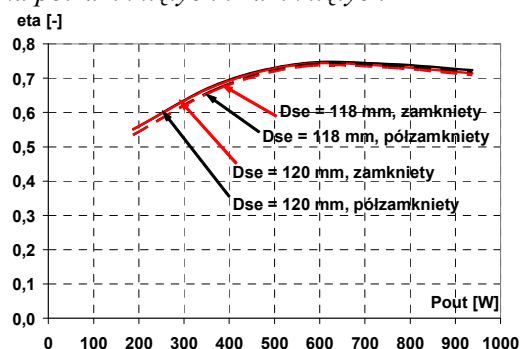
| żłobki wirnika | STAT - ΔP_0 [W] | | Pomiar ΔP_0 [W] |
|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------|
| | D_{se} 120mm | D_{se} 118mm | |
| półzamknięte | 49.0 | 48.6 | 52.9 |
| zamknięte | 53.6 | 53.0 | |



Rys. 11. Przebiegi prądu stojana dla różnych średnic rdzenia stojana, dla żłobków wirnika półzamkniętych i zamkniętych



Rys. 12. Przebieg współczynnika mocy dla różnych średnic rdzenia stojana, dla żłobków wirnika półzamkniętych i zamkniętych

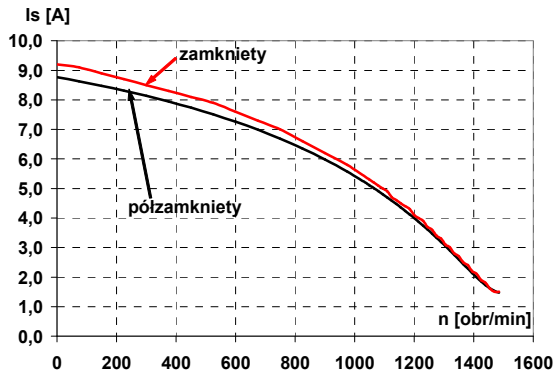


Rys. 13. Przebieg sprawności silnika dla różnych średnic rdzenia stojana, dla żłobków wirnika półzamkniętych i zamkniętych

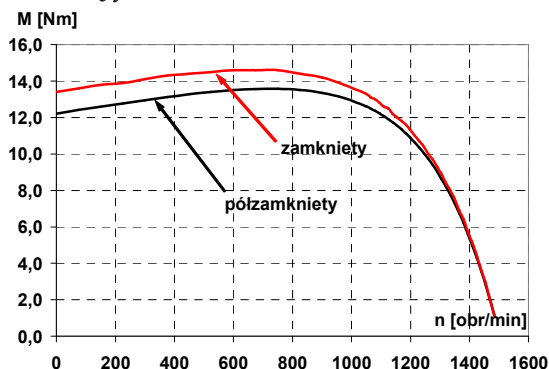
Przeanalizowano również wpływ średnicy zewnętrznej rdzenia stojana oraz otwarcia żłobka

wirnika na parametry eksploatacyjne silnika. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 11 – 13.

Jak wynika z rys. 11, 12 i 13, zmniejszenie średnicy zewnętrznej o 2 mm praktycznie nie wpływa na charakterystyki obciążeniowe silnika. Jedynie niewielkie różnice występują w wartościach prądu stojana.



Rys. 14. Przebieg prądu silnika dla w funkcji prędkości dla żłobków wirnika półzamkniętych i zamkniętych



Rys. 15. Przebieg momentu silnika w funkcji prędkości dla żłobków wirnika półzamkniętych i zamkniętych

Na rysunkach 14 i 15 przedstawiono przebiegi prądu stojana i momentu elektromagnetycznego w funkcji prędkości obrotowej silnika. Zmiana średnicy zewnętrznej pakietu stojana nie ma żadnego wpływu na te przebiegi, a występujące różnice są spowodowane różnym wykonaniem żłobków wirnika. Zastosowanie w wirniku żłobków zamkniętych daje wprawdzie nieco większe wartości prądu rozruchowego (o 4,9%), ale również wyraźnie większe wartości momentu rozruchowego (o 9,75%). W praktyce oba wykonania są stosowane wymiennie.

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że zastosowanie rdzenia stojana ze ścięciami, pozwalającymi na uzyskanie oszczędności w procesie wykrawania blach, powoduje znaczną koncentrację pola w pewnych obszarach jarzma stojana, co prowadzi do zwiększenia wartości prądu magnesującego silnika oraz bardzo silnego jego odkształcenia, a w efekcie, znacznej asymetrii prądów w uzwojeniach fazowych stojana. Jeżeli w obliczeniach pominiemy wpływ wyższych harmonicznych i założymy symetrię prądów w układzie trójfazowym, to wpływ lokalnego zwiększenia indukcji w jarzmie stojana rzędu 11% na straty w rdzeniu i obliczone charakterystyki eksploatacyjne będzie praktycznie pomijalny. Wyniki obliczeń uzyskane metodą połowo-obwodową oraz zastosowaną metodą obwodową wykazują dużą zgodność z wynikami pomiarów.

5. Literatura

- [1]. Dems M.: *Modeling of electromechanical transient processes in induction motors with closed slots of the rotor*, Archives of Electrical Engineering, nr.3, 1997, pp.333-353
- [2]. Dems M., Komeza K., Wiak S., Stec T., Kikosicki M.: *Application of Circuit and Field-circuit Methods in Designing Process of Small Induction Motors with Stator Cores Made from Amorphous Iron*, COMPEL, vol 25, No. 2, 2006, pp. 283-296.
- [3]. Dems M., Komeza K.: *A comparison of circuit and field-circuit models of electromechanical transient processes of the induction motor with power controller supply*, Proceedings COMPUMAG'2001, Lyon-Evian, France, 2-5 July, 2001, pp.206-207.
- [4]. Dems M., Rutkowski Z.: *STAT, STATz Software for calculation of electromagnetic parameters and characteristics of induction motors*, Technical University of Lodz, Poland, 2006.
- [5]. PC OPERA-2D – version 11.03, Software for electromagnetic design from VECTOR FIELDS, 2007.

Autorzy

Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych Politechniki Łódzkiej
ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Lodz, tel:
(+48 42) 6312571, fax: (+48 42)-6362309,
e-mail: mdems@p.lodz.pl ,komeza@p.lodz.pl