

Maria Dems, Krzysztof Komeza, Jacek Szulakowski
Politechnika Łódzka, Łódź

CHARAKTERYSTYKI BIEGU JAŁOWEGO WYSOKOOBROTOWYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH MAŁEJ MOCY

NO-LOAD CURVES OF THE HIGH-SPEED SMALL SIZE INDUCTION MOTORS

Abstract: Nowadays the high-speed induction motors are widely used in many industrial installations and also in aircraft industry. Many of them are designed as converter-fed induction machines. Some electrical drives with not so sophisticated speed control have voltage shape with many higher harmonics. Examine the operation of high speed induction motors feed from PWM converters, with wide range of frequency, it is necessity for carefully considering of no-load losses of the motor. Results of formulas used in computer aided design for calculation of mechanical losses and core losses have shown good agreement with experimental data for motor feed from sinusoidal 50 Hz source but they have been not valid for higher frequencies. The main aim of the paper will be analysis of the no-load losses and no-load current for some small power induction motors feed with voltage of frequency from 50 to 250 Hz with different U-f ratio. For this problem circuit and field-circuit methods will be use and the results will be validating and computation methods will be improving basing on experimental results.

1. Wstęp

W pracy wysokoobrotowych silników indukcyjnych zasilanych z przemiennika częstotliwości napięciem o częstotliwości zmieniającej się w szerokich granicach (od 50 do 250 Hz) istotną rolę odgrywiają straty jałowe silnika. Stosowane w obliczeniach konstrukcyjnych wzory zarówno na obliczanie strat mechanicznych jak i strat w rdzeniu, dające dość dobre wyniki przy zasilaniu silników napięciem sieciowym, natomiast przy wyższych częstotliwościach mogą prowadzić do znacznych błędów. Celem pracy jest przeanalizowanie strat i charakterystyk biegu jałowego wybranych modelowych silników indukcyjnych małej mocy zasilanych napięciem o częstotliwości zmieniającej się w granicach od 50 do 250 Hz, przy różnych charakterystykach U/f, wyznaczonych na drodze obliczeniowej z zastosowaniem metod obwodowych, obwodowo-polowych oraz z wykorzystaniem wyników pomiarów.

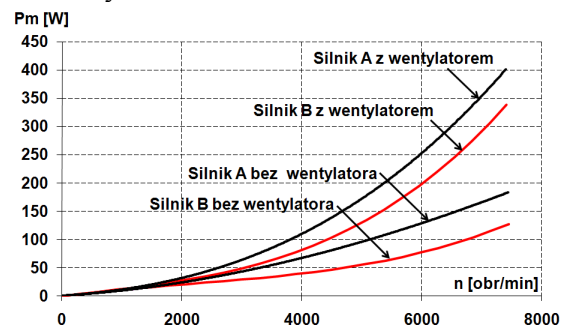
2. Opis badanych silników

Obiektem badań były dwa czterobiegunowe silniki indukcyjne klatkowe typu Sh80-4B, o napięciu znamionowym $U_N = 230/400V$; jeden o mocy znamionowej $P_N = 0,75$ kW i częstotliwości znamionowej $f_N = 50$ Hz. (silnik A), oraz przewojony na $f_N = 200$ Hz (silnik B) [7]. W silnikach tych pakiet stojana posiada, wynikające ze względów technologicznych, cztery

równomierne ścięcia na obwodzie zewnętrznym, w wyniku czego różnica wymiarów zewnętrznych pakietu stojana w różnych osiach wynosi 6 mm (5% maksymalnej średnicy zewnętrznej pakietu). Powoduje to około 30% różnicę wysokości jarzma stojana i jak wykazano w pracy [3], lokalne zwiększenie indukcji w jarzmie stojana rzędu 11%, co w efekcie daje znaczną asymetrię prądów magnesujących w uzwojeniach stojana. Wirnik klatkowy może mieć dwa rozwiązania: ze żłobkami zamkniętymi oraz z półzamkniętymi.

3. Wyznaczenie strat mechanicznych

Straty mechaniczne obu silników modelowych zostały wyznaczone pomiarowo, dla dwóch przypadków: silnik z wentylatorem oraz silnik bez wentylatora.



Rys. 1. Pomierzone charakterystyki strat mechanicznych silników modelowych w funkcji częstotliwości

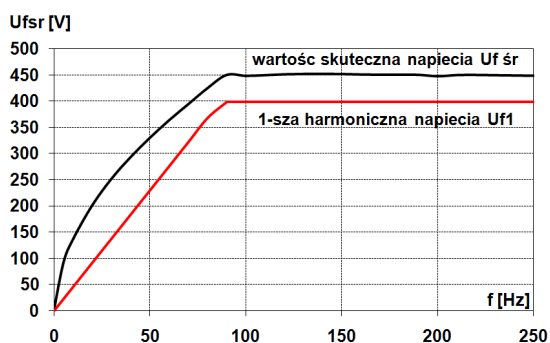
Otrzymane charakterystyki strat mechanicznych w funkcji częstotliwości, przedstawione na rys.1, zostały aproksymowane wielomianami 3-go stopnia i wprowadzone do programu obliczeń obwodowych silnika STAT_WIN_F [4].

Jak wynika z przedstawionych wykresów, nawet dla silników tej samej konstrukcji rozrzut strat mechanicznych dla silników z wentylatorem jest rzędu 17 % (w stosunku do wartości średniej), natomiast dla silników bez wentylatora wynosi około 36%, co uniemożliwia wprowadzenia uogólnienia aproksymacji charakterystyki strat mechanicznych dla danego typu silników.

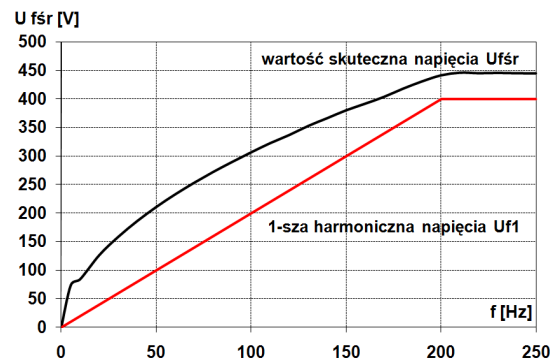
4. Obliczenia strat jałowych i prądu biegu jałowego metodami obwodowymi

Do obliczeń strat jałowych oraz prądu magnetycznego w silnikach modelowych metodami obwodowymi wykorzystano program STAT_WIN_F v.1. Ze względu na znaczny udział strat mechanicznych przy wysokich częstotliwościach założono, że silniki pracują bez wentylatora w całym zakresie częstotliwości. Ponieważ opracowana metoda obliczeń dotyczy tylko przebiegów monoharmonicznych, w obliczeniach jako napięcie zasilające silnik przyjęto podstawową harmoniczną napięcia, przy czym obliczenia w całym zakresie częstotliwości wykonano w takich samych warunkach, w jakich były przeprowadzane pomiary.

Pomierzone przebiegi napięcia zasilającego dla silnika A przedstawiono na rys.2, natomiast dla silnika B – na rys.3. Na rysunkach tych przedstawiono również przebieg pierwszej harmonicznej tego napięcia.



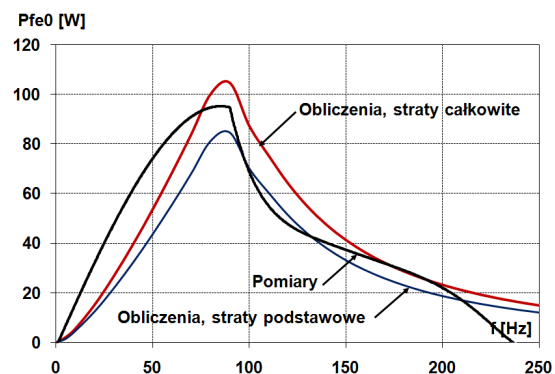
Rys. 2. Przebieg napięcia zasilającego silnik A



Rys. 3. Przebieg napięcia zasilającego silnik B

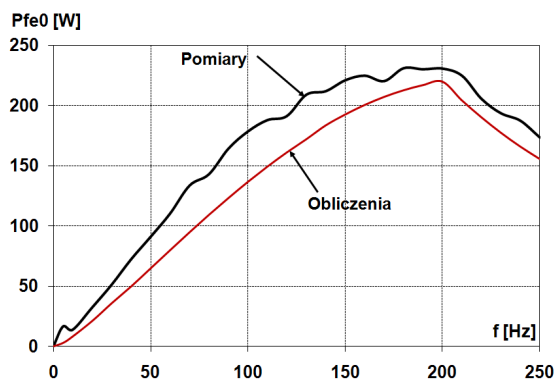
Na podstawie przebiegów przedstawionych na rys. 2 i 3 można stwierdzić, że w zakresie regulacji napięcia przy stałym stosunku U/f udział wyższych harmonicznych w krzywej napięcia jest znaczny, zwłaszcza dla wartości częstotliwości mniejszych od 50% wartości częstotliwości znamionowej i wynosi około 30% dla silnika A i 35 % dla silnika B (w stosunku do średniej wartości skutecznej napięcia). Dalsze zwiększanie wartości częstotliwości, powyżej wartości f_{max} realizowane jest przy zachowaniu stałej wartości skutecznej napięcia. W tym przypadku udział wyższych harmonicznych napięcia jest w przybliżeniu stały i wynosi około 10 % dla obu silników. Udział wyższych harmonicznych jest zależny od częstotliwości impulsowania oraz algorytmu kształtowania przebiegu czasowego napięcia w zastosowanym falowniku MSI. Wybrany do badań falownik charakteryzował się przeciętnymi parametrami.

Obliczenia elektromagnetyczne wykonano przy założeniu kołowego, zastępczego kształtu rdzenia stojana, dla średniej wartości średnicy zewnętrznej blachy stojana ($D_{semax} = 117\text{mm}$), dla wirnika o złóbkach półzamkniętych.



Rys. 4. Pomierzony i obliczony przebieg strat jałowych w rdzeniu w silniku A

Wyniki pomiarów i obliczeń strat jałowych w rdzeniu obu silników przedstawiono na rys. 4 oraz rys. 5.

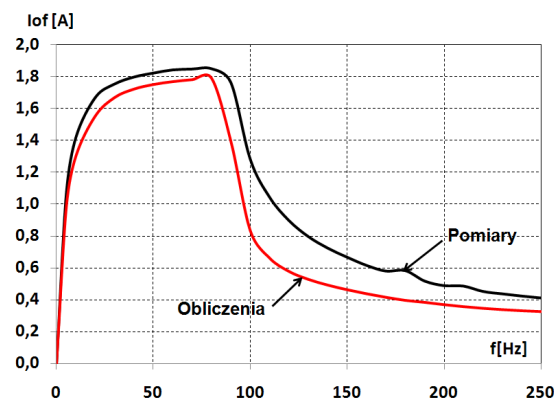


Rys. 5. Pomierzony i obliczony przebieg strat jałowych w rdzeniu w silniku B

W obliczeniach uwzględniono pomierzone wartości strat mechanicznych. Dokładne obliczenie strat podstawowych i dodatkowych w rdzeniu silnika przy zasilaniu napięciem o częstotliwości znamionowej zostało obszernie omówione w pracach [5,6]. W pracy [5] podane zostały zależności do praktycznego obliczania strat podstawowych w rdzeniu silnika wykonanego z blachy M600-50A, w których zastosowano przeliczanie stratności blachy w stosunku do jej wartości przy indukcji maksymalnej 1,5T, przyjmując wykładniki potęgowe dla indukcji $B \leq 1,5$ T, dla jarzma $n_{By} = 3,5$, dla zębów $n_{Bd} = 2,2$, oraz dla indukcji $B > 1,5$ T, dla jarzma $n_{By} = 5$, dla zębów $n_{Bd} = 3,5$. Podane wartości dotyczą jednak tylko przeliczania stratności przy zasilaniu silnika napięciem sieciowym.

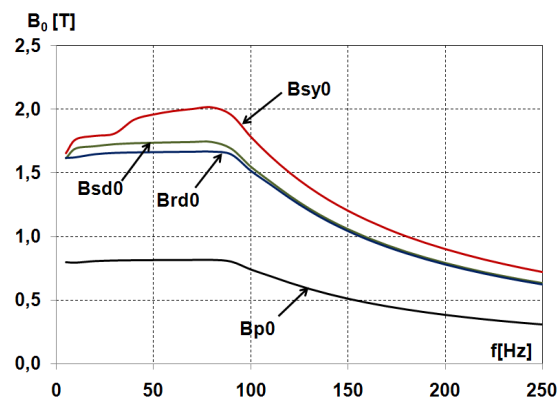
Ze względu na konieczność wykonania obliczeń przy zasilaniu silnika z falownika, w szerokim zakresie zmian częstotliwości, w obliczeniach przyjęto jedną, uśrednioną wartość wykładnika potęgowego dla maksymalnej indukcji $n_B = 3,3$, oraz stały wykładnik potęgowy dla częstotliwości $n_f = 1,3$. Wprowadzono również nieco powiększone, w stosunku do zaproponowanych w pracy [5], współczynniki korekty strat w jarzmie i zębach, spowodowane przemagnesowaniem obrotowym oraz względami technologicznymi. Dokładne obliczenie strat w rdzeniu, zarówno podstawowych jak i dodatkowych w całym zakresie pracy silnika, przy różnych charakterystykach napięcia zasilającego, z uwzględnieniem stosowania różnych gatunków blach, jest przedmiotem dalej prowadzonych prac. Wyniki pomiarów i obliczeń

uśrednionego skutecznego prądu biegu jałowego dla silnika A podano na rys. 6. Uzyskano dobrą zgodność charakteru przebiegu, oraz stosunkowo niewielkie rozbieżności pomierzonych i obliczonych wartości, zwłaszcza w zakresie wyższych częstotliwości.



Rys. 6. Pomierzony i obliczony przebieg prądu biegu jałowego w silniku A

Na rys. 7 przedstawiono maksymalne wartości indukcji w szczelinie powietrznej (B_{p0}), jarzmie stojana (B_{sy0}) oraz zębach stojana i wirnika (B_{sd0} , B_{rd0}) w silniku A, w całym zakresie zmian częstotliwości.



Rys. 7. Przebiegi indukcji magnetycznej w funkcji częstotliwości w silniku A

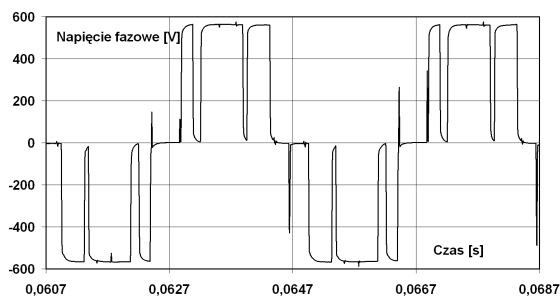
Jak wynika z rys.7, w zakresie pracy silnika przy stałym stosunku pierwszej harmonicznej napięcia do częstotliwości $U_{f1}/f = \text{const.}$, wartości indukcji w szczelinie powietrznej oraz zębach silnika są w przybliżeniu stałe, natomiast w jarzmie stojana można zaobserwować wyraźny wzrost wartości indukcji, zwłaszcza w zakresie częstotliwości $f_s = 50 \div 86,7$ Hz, stanowiącej górną granicę zwiększania napięcia. Jest to spowodowane głównie znaczną nierównomiernością wysokości jarzma stojana, pro-

wadzącą do lokalnego zwiększenia indukcji w jarzmie powyżej 2 T.

5. Obliczenia prądu biegu jałowego metodami polowymi

Obliczenia obwodowo-polowe silników asynchronicznych zasilanych z falownika MSI mogą być wykonywane z różnym poziomem dokładności odwzorowania zjawisk w silniku [1, 2]. Porównanie obliczeń quasi-statycznych wykonywanych dla harmonicznych napięcia zasilającego oraz rozwiązania nieuwzględniającego ruchu wirnika, ale przy rzeczywistym kształcie napięcia na zaciskach maszyny zostały przedstawione w pracy [3]. Wykazały one, że szczególnie w przypadku silnika o ściętym kształcie pakietu stojana i występujących znacznych przesyceniach zwężonego jarzma konieczna jest analiza czasowa, ponieważ rozwiązanie quasi-statyczne wykorzystujące stałą wartość przenikalności dla elementu w okresie dają wyniki znacznie różniące się od wyników pomiarów. Dla silników wysokoobrotowych nawet dla stanu jałowego występuje znaczne oddziaływanie zjawisk związanych z ruchem wirnika stąd do analizy wykorzystano modele wykorzystujące analizę po czasie oraz zjawisko wirowania silnika.

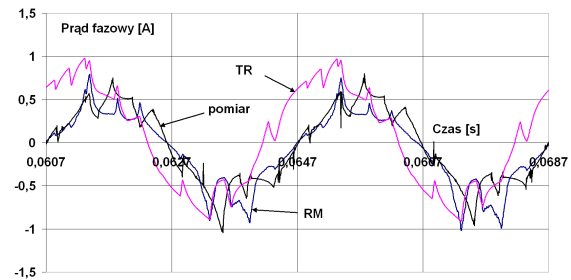
Obliczenia polowe zostały wykonane z zastosowaniem modułu RM pakietu Opera 2D. Pozwala on na obliczenie zjawisk w wirującym silniku z uwzględnieniem rzeczywistego kształtu napięcia zasilającego z falownika MSI pomierzonego na zaciskach silnika. Pomierzony przebieg napięcia dla częstotliwości zasilania 250 Hz został pokazany na rysunku 8.



Rys. 8. Pomierzony przebieg napięcia dla 250Hz dla silnika A

Na rys. 9 przedstawiono porównanie wyników obliczeń dla modelu TR nieuwzględniającego wirowania wirnika oraz dla modelu RM uwzględniającego to zjawisko. Wyniki porównania wskazują na lepszą dokładność metody

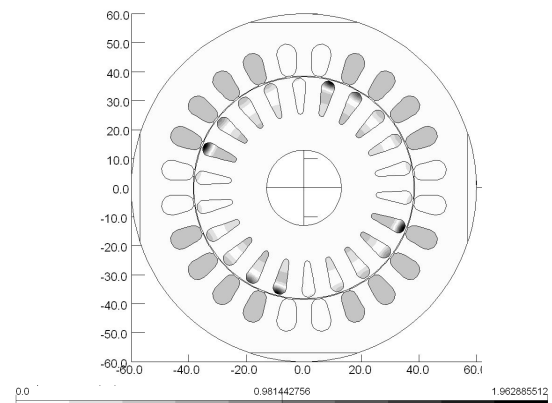
RM. Spowodowane jest to znacznym udziałem składowej czynnej w prądzie biegu jałowego.



Rys. 9. Porównanie obliczonych i pomierzonych przebiegów prądu fazowego dla 250Hz dla silnika A

Prądy fazowe na skutek ściętej konstrukcji stojana wykazują znaczną asymetrię, która zresztą występuje również dla zasilania znamionowego częstotliwością 50 Hz.

Na dokładność obliczeń wpływa szereg czynników, w tym również dokładne określenie prędkości wirowania w chwili obliczeń, gdyż, mimo że mamy do czynienia ze stanem jałowym w wirniku, występuje przepływ prądu spowodowany tym, że przy znacznie odkształconym przebiegu napięcia zasilającego (rys. 8) pole ma charakter „skaczący”, a nie wirujący. Na rys. 10 pokazano rozkład gęstości prądu w prętach wirnika dla wybranej chwili czasowej.

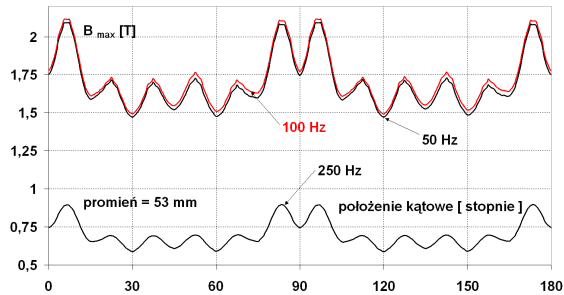


Rys. 10. Rozkład gęstości prądu w prętach wirnika dla wybranej chwili czasowej

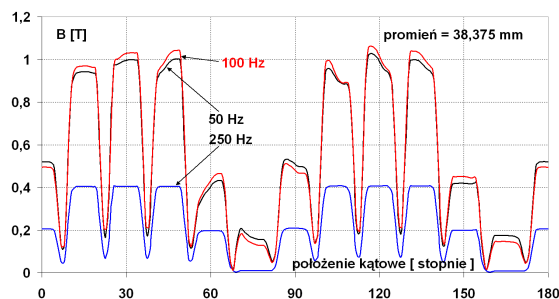
Rozkład ten cechuje się dużą niejednorodnością wynikającą z szybkości zmian pola wytworzonego przez prądy stojana.

Wartość chwilowa strat mocy w wirniku jest niewielka i waha się od 0,008 do 1,158 W, w zależności od rozpatrywanej chwili czasowej. Moment oscyluje wokół wartości średniej wynikającej z momentu strat mechanicznych równo 0,236 Nm.

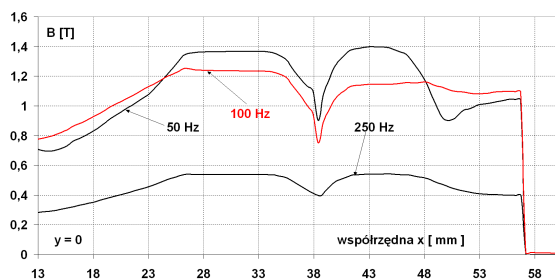
Na wyniki modelowania ma oczywiście wpływ zasilanie silnika A, który powoduje, że wartości indukcji magnetycznej w rdzeniu silnika są znacznie mniejsze niż dla 50 czy 100 Hz. Na rys. 11, 12 i 13 przedstawiono rozkłady modułu indukcji magnetycznej w jarzmie, szczelinie i wzdłuż zębów stojana i wirnika.



Rys. 11. Rozkład wartości maksymalnej indukcji w jarzmie stojana dla zasilania znamionowego oraz częstotliwością 100 Hz i 250 Hz



Rys. 12. Porównanie rozkładów w szczelinie dla wybranej chwili czasowej



Rys. 13. Rozkład wzdłuż zęba stojana i wirnika dla wybranej chwili czasowej

Jak wynika z rys. 11, 12 i 13, wartości indukcji dla zasilania 250 Hz są znacznie mniejsze niż dla 50 czy 100 Hz. Z drugiej strony, nawet dla silnika pozbawionego wentylatora występują znaczne straty mechaniczne. Powoduje to znaczący wpływ na przebieg prądu jałowego składowej czynnej i stąd konieczność korzystania z czasochłonnego rozwiązania RM.

6. Podsumowanie

Silniki klatkowe pracując z wysokimi prędkościami obrotowymi wykazują duże straty mechaniczne i wentylacyjne (rys. 1). Projektując silnik, który ma być wykorzystywany w taki sposób należałoby szczególnie starannie zaprojektować system wentylacji. Prawdopodobnie nie wystarczy przeprojektowanie wentylatora zewnętrznego lub jego zastąpienie wentylatorem napędzanym osobnym silnikiem. Być może należy też inaczej zaprojektować wentylację wewnętrzną tak, aby uzyskać wystarczające odprowadzanie ciepła przy jak najmniejszych stratach mocy i jak najmniejszym momencie strat wentylacyjnych. Porównanie silników modelowych A i B wskazuje, że ich straty mechaniczne i wentylacyjne dla wysokich prędkości obrotowych różnią się o ok. 50W, co odpowiada zmianie sprawności silnika o ok. 1,3%.

Analizując przebiegi prądu biegu jałowego i strat jałowych można stwierdzić, że typowy silnik A pracujący przy częstotliwości ponad 250Hz, ze względu na ograniczenia napięciowe i mały stosunek U/f , miał moment krytyczny mniejszy niż powiększony moment strat mechanicznych i wentylacyjnych, co prowadziło do utyku. W przypadku silnika B, przezwojnego na 200 Hz, problem ten nie wystąpił, jednak wydaje się, że możliwe byłoby zmniejszenie jego strat jałowych, zarówno mechanicznych, poprzez zastosowanie lepszych łożysk i poprawienie wentylacji wewnętrznej, jak i strat w żelazie, głównie przez zastosowanie blach elektrotechnicznych o lepszych parametrach. Zastosowanie w obliczeniach projektowych wysokoobrotowych silników indukcyjnych zasilanych z falowników MSI metod obwodowych wymaga ich korekty, zwłaszcza w zakresie obliczania strat podstawowych i dodatkowych w rdzeniu silnika. Wyniki tych obliczeń powinny być weryfikowane zarówno na drodze analizy polowo-obwodowej jak i eksperymentalnej.

Metody polowo - obwodowe cechują się dość dobrą zgodnością wyników obliczeń z wynikami pomiarów, zwłaszcza w zakresie przebiegów prądów jałowych w uzwojeniach silnika, jednak celowe wydaje się zbadanie wpływu poszczególnych czynników na dokładność obliczeń. Dotyczy to zwłaszcza wpływu temperatury uzwojeń w trakcie pomiaru. Wadą metody

polowo - obwodowej jest nie uwzględnianie w obliczeniach strat mocy w rdzeniu silnika.

7. Literatura

- [1]. Dems M., Komeza K., Wiak S.: *Computer Modelling of Energy-Saving Small Size Induction Electromechanical Converter*, Intelligent Computer Techniques in Applied Electromagnetic, Springer – Verlag Berlin Heidelberg 2008, pp. 269 -276.
- [2]. Dems M., Komeza K.: *Advanced Computer Techniques in Modelling of High-Speed Induction Motor*, Advanced Computer Techniques in Applied Electromagnetic, IOS Press Amsterdam, Berlin, Oxford, Tokyo, Washington, DC, vol. 30, 2008, pp. 130 -136.
- [3]. Dems M., Komeza K.: *Wpływ kształtu rdzenia stojana na parametry eksploatacyjne silnika indukcyjnego małej mocy*, Zeszyty Problemowe BOBRME, KOMEL, Maszyny Elektryczne, nr.77, 2007, pp. 105- 110.
- [4]. Dems M., Rutkowski Z.: *STAT_WIN_F v.1, Obliczenia elektromagnetyczne trójfazowych, wysokoobrotowych silników indukcyjnych*, Biblioteka Programów Instytutu Mechatroniki i Systemów Informatycznych Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2009.
- [5]. Śliwiński T.: *Metody obliczania silników indukcyjnych, t.1 Analiza*, PWN, Warszawa 2008.
- [6]. Dąbrowski M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, WNT, Warszawa 1988.
- [7]. Gąsiorowski T. : *Doświadczenia FSE "BESEL S.A." w produkcji silników indukcyjnych zasilanych z przemienników częstotliwości*, Materiały konferencyjne PPEE'99, Ustroń, 22-25 czerwca 1999.

Praca wykonywana jest w ramach projektu badawczego własnego Nr N N510 388 235 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Autorzy

Dr hab. inż. Maria Dems, prof. PŁ, dr hab. inż. Krzysztof Komeza, prof. PŁ, mgr inż. Jacek Szulakowski, Instytut Mechatroniki i Systemów Informatycznych Politechniki Łódzkiej, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-537 Łódź, tel; (+48 42) 631 25 71, fax: (+48 42) 636 23 09, e-mail: mdems@p.lodz.pl; komeza@p.lodz.pl; jacek.szulakowski@p.lodz.pl