

**Maria Dems, Krzysztof Komęza, Jacek Szulakowski**  
Politechnika Łódzka, Łódź

## **WPLYW MATERIAŁU RDZENIA NA CHARAKTERYSTYKI WYSOKOOBROTOWYCH SILNIKÓW INDUKCYJNYCH MAŁEJ MOCY**

### **INFLUENCE OF CORE MATERIAL ON THE WORK OF THE HIGH-SPEED SMALL SIZE INDUCTION MOTORS**

**Abstract:** In designing the high-speed low-power induction motors should be pursued to obtain operating characteristics similar to characteristics of general purpose motors and the greatest efficiency at rated load. One way to increase the efficiency of induction motors, particularly those working at higher frequencies, is applied to the motor core electrical sheets with improved magnetic properties and less core losses, including amorphous iron. The paper presents a comparison of measured operating characteristics of several low-power induction motors, a core made from three types of electrical steel, working with supply from the inverter voltage with a frequency varying in a wide range (from 0 to 200 Hz), and grid-supplied frequency 50 Hz and 100 Hz. In the case of grid-supplied motors paper presents the results of calculations made using the available methods from the literature, with particular emphasis on determining the additional losses in both the no-load and at rated load. The calculations used, experimentally determined for the tested motors, the mechanical loss characteristics, and also measured the magnetization characteristics for electrical sheets and sheet specific losses as a function of magnetic flux density for a wide range of frequencies.

#### **1. Wstęp**

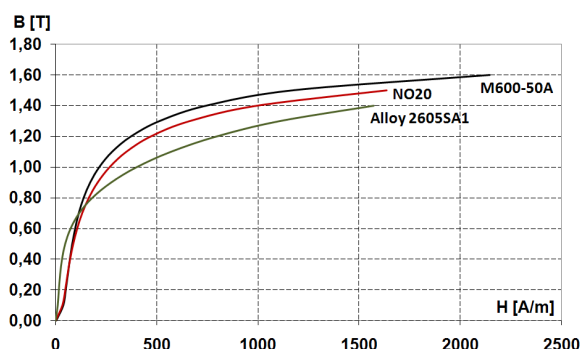
Przy projektowaniu wysokoobrotowych silników indukcyjnych małej mocy należy dążyć do uzyskania charakterystyk eksploatacyjnych zbliżonych do charakterystyk pracy silników powszechnego zastosowania oraz jak najwyższej sprawności przy obciążeniu znamionowym. Jedną z metod podwyższenia sprawności silników, zwłaszcza pracujących przy wyższych częstotliwościach, jest zastosowanie na rdzeń silnika blach elektrotechnicznych o lepszych własnościach magnetycznych i mniejszej stratności, w tym również blachy amorficznej [7, 8, 14, 15, 16].

W pracy przedstawiono porównanie wyznaczonych na drodze pomiarowej charakterystyk eksploatacyjnych modelowych silników indukcyjnych małej mocy, o rdzeniach wykonanych z trzech gatunków blachy elektrotechnicznej, pracujących przy zasilaniu z przemiennika częstotliwości napięciem o częstotliwości zmieniającej się w szerokich granicach (od 0 do 200Hz), oraz przy zasilaniu sieciowym, dla częstotliwości 50Hz i 100Hz. W przypadku zasilania silników napięciem sieciowym przedstawione zostały wyniki obliczeń wykonanych z wykorzystaniem dostępnych w literaturze metod, ze szczególnym uwzględnieniem wyznaczania strat dodatkowych zarówno w stanie ja-

łowym pracy silnika jak i przy obciążeniu znamionowym. W obliczeniach wykorzystano wyznaczone doświadczalnie dla badanych silników charakterystyki strat mechanicznych, a także pomierzone w ramach projektu charakterystyki magnesowania zastosowanych w nich blach elektrotechnicznych oraz charakterystyki stratności blach w funkcji indukcji magnetycznej wyznaczone dla szerokiego zakresu częstotliwości.

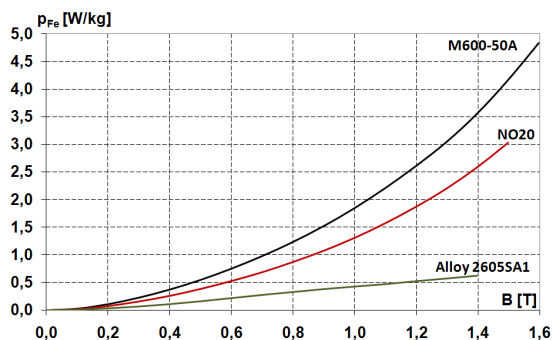
#### **2. Charakterystyki magnesowania i stratności blach elektrotechnicznych**

Obiektem badań były modelowe silniki indukcyjne wykonane z trzech gatunków blachy elektrotechnicznej: blachy prądnicowej o grubości 0,5mm typu M600-50A, taśmy elektrotechnicznej o grubości 0,2mm typu NO20 produkowanej przez szwedzką firmę Cogent Surahammars Bruks AB, oraz blachy amorficznej Alloy 2605SA1 firmy METGLAS o grubości 0,0254mm. Wyznaczone pomiarowo dla próbek pierścieniowych charakterystyki magnesowania poszczególnych gatunków blach przedstawiono na rys. 1 [3, 9]. Dla wszystkich gatunków blach pomierzono również stratność w funkcji indukcji magnetycznej, dla szerokiego zakresu częstotliwości (do 2000Hz) [5, 9, 12, 13].

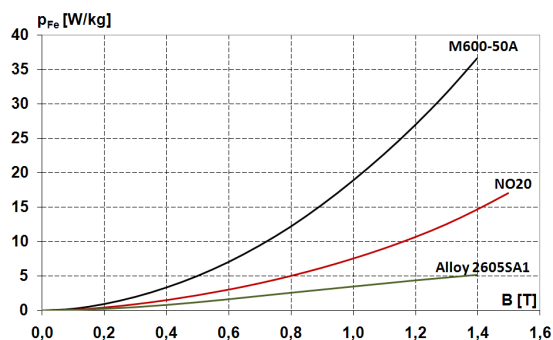


Rys. 1. Pomierzone charakterystyki magnesowania blach elektrotechnicznych

Porównanie charakterystyk stratności dla częstotliwości 50Hz przedstawiono na rys. 2, natomiast dla częstotliwości 250Hz – na rys. 3.



Rys. 2. Pomierzone charakterystyki stratności blach elektrotechnicznych dla  $f = 50\text{Hz}$



Rys. 3. Pomierzone charakterystyki stratności blach elektrotechnicznych dla  $f = 250\text{Hz}$

Jak wynika z przedstawionych przebiegów, najlepszą magnesowalność ma blacha prądnicowa M600-50A, jednak jej stratność przy częstotliwości 250Hz, dla indukcji magnetycznej rzędu 1,4T (a więc wartości indukcji zbliżonej do indukcji nasycenia blachy amorficznej), jest prawie 7-krotnie większa od stratności blachy amorficznej i około 2,5-krotnie większa od stratności blachy NO20.

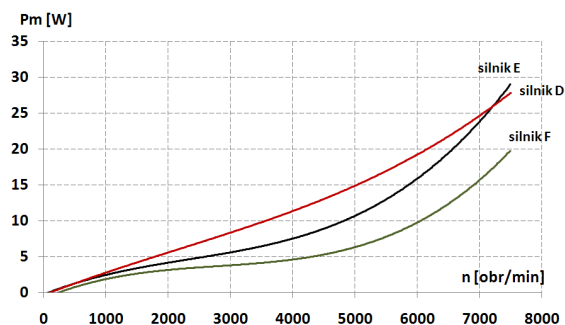
### 3. Obiekt badań

Obiektem badań były trzy 4-biegunowe silniki prototypowe o wzniosie 80mm w wykonaniu energooszczędnym z rdzeniem wykonanym z blachy M600-50A (oznaczanym dalej jako silnik E), z blachy NO20 (silnik D) oraz z rdzeniem stojana z blachy amorficznej Alloy 2605SA1 firmy METGLAS (silnik F), uzwojone na napięcie 231/400V dla częstotliwości 200Hz. Wszystkie silniki miały takie same wymiary rdzenia, jednakowe kształty i wymiary żłobków stojana i wirnika oraz takie same uzwojenia stojana i wirnika. Wirniki wszystkich silników posiadały żłobki zamknięte zalewane aluminium. Dla silników tych wykonano pomiary strat mechanicznych oraz wyznaczono charakterystyki biegu jałowego, obciążenia oraz charakterystyki mechaniczne.

### 4. Charakterystyki biegu jałowego

#### 4.1. Straty mechaniczne

W celu wyodrębnienia z pomierzonych strat jałowych silnika strat w rdzeniu niezbędne jest dokładne wyznaczenie strat mechanicznych w całym zakresie pracy silnika. Dla badanych silników modelowych straty mechaniczne zostały wyznaczone pomiarowo, dla dwóch przypadków: silnik z wentylatorem oraz silnik bez wentylatora. Otrzymane charakterystyki strat mechanicznych w funkcji częstotliwości, dla silników modelowych bez wentylatorów przedstawiono na rys. 4.



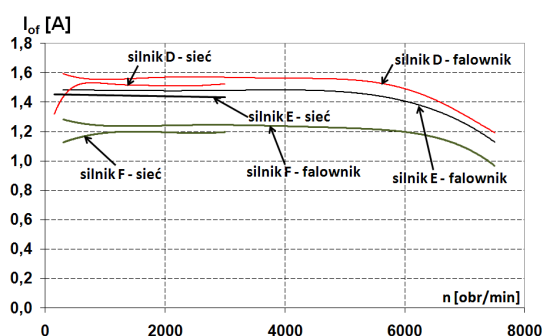
Rys. 4. Pomierzone charakterystyki strat mechanicznych silników modelowych w funkcji częstotliwości

Jak wynika z rys. 4, najmniejsze straty mechaniczne ma silnik F wykonany z blachy amorficznej, co wskazuje na najlepszą jakość użytych w nim łożysk. Silniki D i E wykonywane były w tym samym czasie i mają straty mechaniczne zbliżone. Pomierzone charakterystyki

strat mechanicznych zostały aproksymowane wielomianami 3-go stopnia i wprowadzone do programu obliczeń [2].

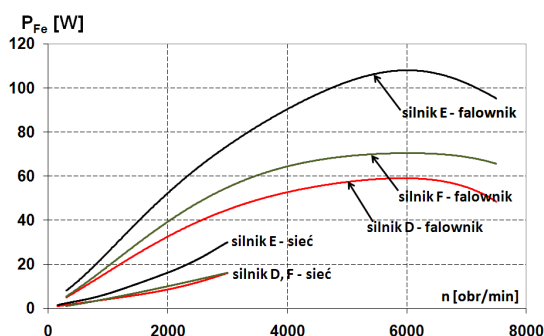
#### 4.2. Prąd biegu jałowego i straty w rdzeniu

Dla wszystkich badanych silników wykonano pomiary prądu biegu jałowego oraz strat jałowych oraz wydzielono z nich straty w rdzeniu, korzystając z wyznaczonych charakterystyk strat mechanicznych. Charakterystyki stanu jałowego wyznaczono przy zasilaniu silnika z sieci napięciem sinusoidalnie zmiennym oraz przy zasilaniu z falownika. Przebiegi prądu stanu jałowego przedstawiono na rys. 5, natomiast przebiegi strat jałowych podano na rys. 6.



Rys. 5. Prąd biegu jałowego dla silników modelowych w funkcji częstotliwości

Jak wynika z przedstawionych na rys. 5 wykresów, najmniejszy prąd biegu jałowego, zarówno przy zasilaniu sieciowym jak i falownikowym, pomimo najgorszej charakterystyki magnesowania blachy, ma silnik F o rdzeniu stojana wykonanym z blachy amorficznej. Silniki D oraz E mają wartości tego prądu nieco większe i zbliżone do siebie.



Rys. 6. Straty jałowe w rdzeniu silników modelowych w funkcji częstotliwości

Może to być spowodowane faktem, że poszczególne silniki mają nieco różne, trudne do precyzyjnego oszacowania, grubości szczeliny powietrznej.

Analizując przebiegi podane na rys. 6 można stwierdzić, że największe straty w rdzeniu w stanie jałowym występują w silniku E wykonanym z blachy o grubości 0,5mm. Silnik D wykonany z blachy NO20 oraz silnik F o rdzeniu stojana z blachy amorficznej mają przy zasilaniu sinusoidalnym straty w rdzeniu zbliżone, natomiast przy zasilaniu falownikowym silnik F ma nieco większe straty w rdzeniu od silnika D, pomimo nieco mniejszej stratności blachy amorficznej.

Można to wytłumaczyć faktem, że wszystkie silniki modelowe mają stosunkowo niskie wartości indukcji w rdzeniu, a więc różnice stratności blachy NO2 i blachy amorficznej są w tym zakresie niewielkie, a poza tym, w badanych silnikach mogą występować różne straty dodatkowe spowodowane przez wyższe harmoniczne generowane przez falownik, jak również straty dodatkowe wywołane przez harmoniczne przestrzenne pola magnetycznego w szczelinie powietrznej, spowodowane rozłożeniem uzwojenia w żłobkach (harmoniczne wzbudzeniowe), oraz nierównomierną grubością szczeliny powietrznej spowodowaną użłobkowaniem rdzenia stojana i wirnika (harmoniczne przewodnościowe) [1, 11].

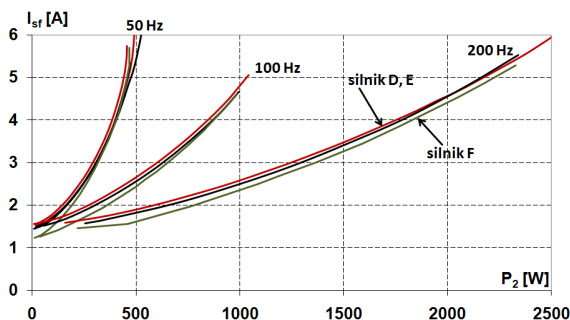
Dokładne wyznaczenie tych strat wymaga przeprowadzenia obliczeń z wykorzystaniem metod obwodowo – polowych.

#### 5. Charakterystyki obciążeniowe

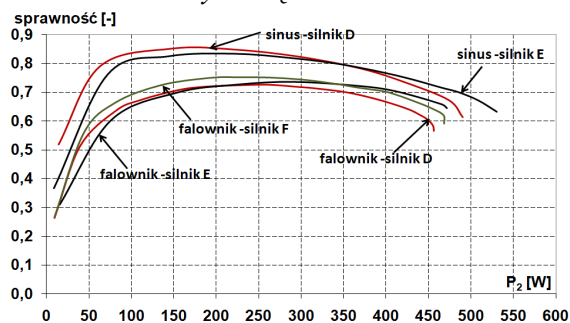
Dla badanych silników wykonano próby obciążenia, zarówno przy zasilaniu z sieci dla częstotliwości 50 i 100Hz, jak i przy zasilaniu falownikowym, dla częstotliwości 50, 100 i 200Hz.

Na rys. 7 przedstawiono przebiegi prądu obciążenia w uzwojeniu stojana w funkcji mocy na wale dla poszczególnych silników modelowych, dla różnych częstotliwości napięcia zasilającego. Na podstawie przedstawionych na rys. 7 przebiegów można stwierdzić, że wartości prądów w uzwojeniach stojana w całym zakresie częstotliwości, dla wszystkich badanych silników są zbliżone, jednak najmniejsze wartości prądu obciążenia występują w silniku F.

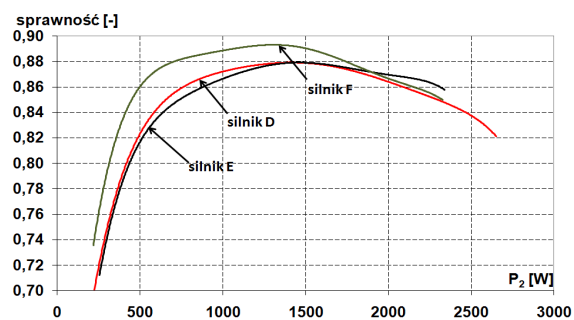
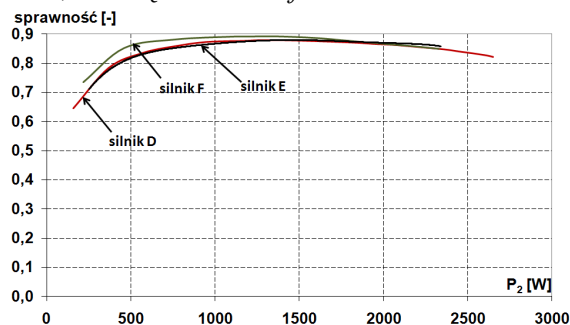
Na rys. 8 przedstawiono przebiegi sprawności silników modelowych przy zasilaniu napięciem o częstotliwości 50Hz, zarówno z sieci jak z falownika.



Rys. 7. Przebiegi prądu stojana w funkcji mocy na wale dla różnych częstotliwości



Rys. 8. Przebiegi sprawności w funkcji mocy na wale, dla częstotliwości  $f = 50$  Hz

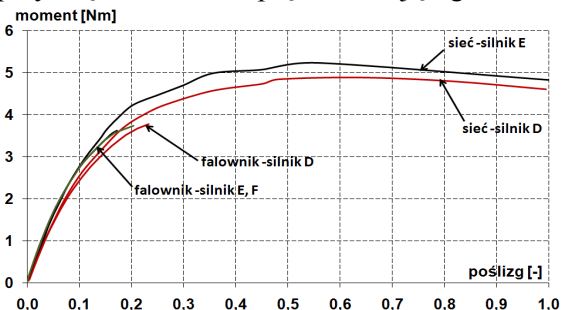


Rys. 9. Przebiegi sprawności silnika w funkcji mocy na wale dla częstotliwości  $f = 200$  Hz

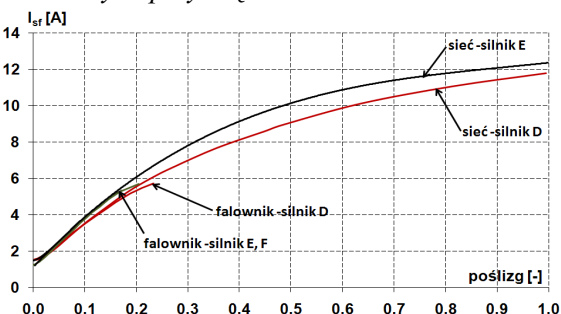
Rys. 9 przedstawia przebiegi sprawności silników modelowych przy zasilaniu z falownika napięciem o częstotliwości 200 Hz.

Jak wynika z rys. 8 i 9, największą sprawność uzyskano dla silnika F wykonanego z blachy amorficznej. Sprawność silników D i E jest zbliżona, chociaż nieco lepsze wyniki uzyskano dla silnika D wykonanego z blachy NO20.

Na rys. 10 oraz 11 przedstawiono odpowiednio charakterystyki mechaniczne oraz przebiegi prądów w funkcji poślizgu wirtualnych badanych silników, przy zasilaniu z sieci i falownika, przy częstotliwości napięcia zasilającego 50 Hz.



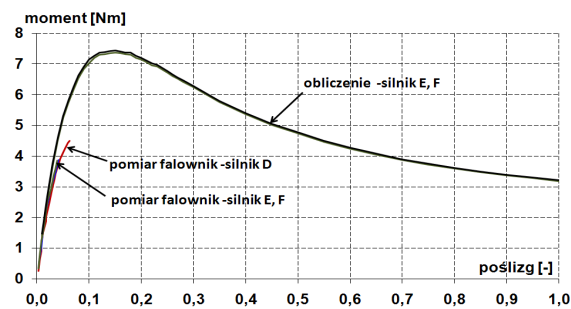
Rys. 10. Charakterystyki mechaniczne silników modelowych przy częstotliwości 50 Hz



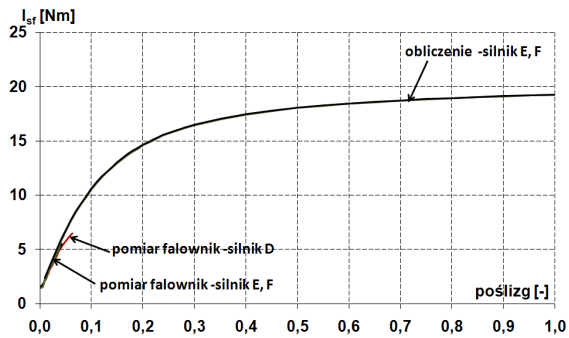
Rys. 11. Charakterystyki prądu w funkcji poślizgu dla silników modelowych przy częstotliwości 50 Hz

Charakterystyki mechaniczne oraz odpowiednie przebiegi prądów stojana badanych silników wyznaczone przy zasilaniu falownikowym napięciem o częstotliwości 200 Hz przedstawiono odpowiednio na rys. 12 i 13.

Na rysunkach tych zamieszczono dodatkowo pełne charakterystyki mechaniczne silnika oraz charakterystyki prądu stojana obliczone przy pomocy programu STAT\_WIN\_F [6], dla silnika E wykonanego z blachy elektrotechnicznej o grubości 0,5 mm oraz dla silnika F wykonanego z blachy amorficznej.



Rys. 12. Charakterystyki mechaniczne silników modelowych przy częstotliwości 200 Hz



Rys. 13. Charakterystyki prądu stojana w funkcji poślizgu dla silników modelowych przy częstotliwości 200Hz

Na podstawie przedstawionych charakterystyk można oszacować, że przy 200Hz znamionowy moment elektromagnetyczny badanych silników jest rzędu 2,5 - 3Nm.

## 6. Podsumowanie

Efektom przeprowadzonych badań powinno być opracowanie konstrukcji wysokoobrotowych silników indukcyjnych małej mocy o podwyższonej sprawności. W tym celu zostały wykonane jednakowe modele silników, bazujące na klasycznej konstrukcji produkowanego aktualnie silnika indukcyjnego typu SE(M)h80-4, o rdzeniach wykonanych z trzech gatunków blachy elektrotechnicznej: blachy prądnicowej o grubości 0,5mm typu M600-50A, taśmy elektrotechnicznej o grubości 0,2mm typu NO20, oraz blachy amorficznej Alloy 2605SA1 firmy METGLAS o grubości 0,0254mm. Zarówno blacha NO20 jak i blacha amorficzna mają gorsze charakterystyki magnesowania od stosowanej powszechnie blachy prądnicowej o grubości 0,5mm ale jednocześnie znacznie niższą stratność, zwłaszcza przy większych częstotliwościach. Zaproponowane modele silników posiadały identyczne wymiary geometryczne jak w silniku SE(M)h80-4 przystosowanym do pracy przy zasilaniu napięciem sieciowym o częstotliwości 50Hz i jedynie zostały przezwójone na 200Hz. W efekcie uzyskano bardzo małe wykorzystanie materiałów czynnych: maksymalne wartości indukcji magnetycznych w rdzeniu silnika przy 200Hz są rzędu 1T, natomiast gęstości prądów w uzwojeniach nie przekraczają 5A/mm<sup>2</sup>. Badanie jednakowych modeli pozwoliło jednak na ocenę wpływu własności zastosowanych materiałów rdzenia na parametry eksploatacyjne silnika.

Przy dużych częstotliwościach w silniku indukcyjnym dominują straty w rdzeniu, a zwłaszcza

straty dodatkowe [3, 4]. W badanych modelach udział sumarycznych strat w rdzeniu przy 200Hz był rzędu 60% strat całkowitych silnika. Zmniejszenie tych strat pozwala na podwyższenie sprawności silnika nawet o kilka procent. Należy jednak uwzględnić fakt, że blachy o mniejszej stratności mają jednocześnie gorszą magnesowalność, co w efekcie, przy zastosowaniu wyższych indukcji w rdzeniu silnika może prowadzić do znacznego zwiększenia prądu magnesującego, a w konsekwencji do zwiększenia prądu w uzwojeniach silnika i może spowodować zwiększenie strat obciążeniowych w silniku.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że najwyższą sprawność przy pracy w całym zakresie częstotliwości można uzyskać dla silnika z rdzeniem stojana wykonanym z blachy amorficznej. Silnik taki jest jednak stosunkowo drogi i trudny technologicznie. Ponadto sam proces cięcia blachy amorficznej pogarsza jej własności magnetyczne i zwiększa stratność, o czym świadczy porównanie uzyskanych wyników badań blachy amorficznej z danymi katalogowymi. Należy więc rozważyć możliwość stosowania na rdzeń silnika taśmy elektrotechnicznej o grubości 0,2mm typu NO20. W tym przypadku uzyskujemy wprawdzie znacznie mniejsze zwiększenie sprawności silnika, niż przy zastosowaniu blachy amorficznej, jednak koszty wykonania takiego silnika niewiele odbiegają od kosztów wykonania aktualnie produkowanych silników.

Przeprowadzone badania posłużą do zaprojektowania zmodyfikowanej konstrukcji silnika, pozwalającej na istotne zwiększenie wykorzystania zaproponowanych materiałów magnetycznych.

## 7. Literatura

- [1]. Dąbrowski M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*, WNT, Warszawa 1988.
- [2]. Dems M., Komeza K., Szulakowski J., *Charakterystyki biegu jałowego wysokoobrotowych silników indukcyjnych małej mocy*, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne, nr 82, 2008 wyd. BOBRME Komel, s. 239-245
- [3]. Dems M., Komeza K., Szulakowski J.: *Influence of different magnetic material of the high-speed induction motors cores on motors fields distribution and integral parameters*, Przegląd Elektrotechniczny, R.86 Nr 5/2010, pp. 156-160.
- [4]. Komeza K., Dems M., Szulakowski J.: *Advanced Computer Modelling of no-load curves of*

*the high-speed small size induction motors*, Przegląd Elektrotechniczny, R.86 Nr 5/2010, pp. 152-155.

[5]. Dems M., Komeza K., Szulakowski J.: *Straty podstawowe i dodatkowe w rdzeniu wysokoobrotowych silników indukcyjnych małej mocy*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, BOBRME, KOMEL, nr.86, 2010, pp. 113- 118

[6]. Dems M., Rutkowski Z.: *STAT\_WIN\_F v.2, Obliczenia elektromagnetyczne trójfazowych, wysokoobrotowych silników indukcyjnych*, Biblioteka Programów Instytutu Mechatroniki i Systemów Informatycznych Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2010.

[7]. 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, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol 25, No. 2, 2006, pp. 283-296.

[8]. Dems M., K. Komeza K., Kikosicki M., Wiak S., Stec T.: *Numerical models and experimental verification of small size asynchronous electromechanical converter with stator core made from Amorphous Iron*, Przegląd Elektrotechniczny rok 2006, nr 5, pp. 45-48

[9]. Derlecki S., Kuśmierk Z., Szulakowski J., Dems M.: *Właściwości materiałów magnetycznych i ich wpływ na konstrukcję maszyn elektrycznych*, Przegląd Elektrotechniczny, R.86 Nr 4/2010, pp. 83-86.

[10]. Hernandez-Aramburo C.A., Green T.C., Smith A.C., *Estimating rotational iron losses in an induction machine*, IEEE Trans. on Mag., Vol. 39 , Issue 6, pp. 3527 – 3533, 2003.

[11]. Śliwiński T.: *Metody obliczania silników indukcyjnych, t.1 Analiza*, PWN, Warszawa 2008.

[12]. Youguang G., Jian Guo Z., Jinjiang Z.; Haiyan L.; Jian Xun J., *Measurement and Modeling of Rotational Core Losses of Soft Magnetic Materials Used in Electrical Machines: A Review*, IEEE Trans. on Mag., Vol.44 , Issue 2, pp. 279 – 291, 2008.

[13]. Zhu J. G., Ramsden V. S., *Improved formulations for rotational core losses in rotating electrical machines*, IEEE Trans. Magn., 34, pp. 2234–2242, 1998.

[14]. Ning Lu, J. M. Kokernak, *Amorphous metals for radial airgap electric machines*, Proceedings of ICEM 2000, 28-30 August 2000, Espoo Finland, pp.618-622.

[15]. Jordan H. E, Woods E. J., *Fractional horsepower motor constructed with amorphous iron*, Proceedings of Motor-Con. April 1984, pp 37-42.

[16]. Mischler W.R, Rosenberg G.M., Freschmann P.C., Tompkins R. E., *Test results on a low loss amorphous iron induction motor*, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 6 June 1981, pp 2907-2911.

*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) 6362309 e-mail:maria.dems@p.lodz.pl; krzysztof.komeza@p.lodz.pl; jacek.szulakowski@p.lodz.pl