

Paweł Idziak, Mariusz Barański, Wiesław Łyskawiński, Krzysztof Kowalski
Politechnika Poznańska

OCENA WYBRANYCH PARAMETRÓW ENERGETYCZNYCH MODELOWYCH SILNIKÓW PRĄDU PRZEMIENNEGO MAŁEJ MOCY O RÓŻNYCH KONSTRUKCJACH WIRNIKA

EVALUATION OF SELECTED ENERGY PERFORMANCE OF LOW POWER AC MOTOR WITH DIFFERENT ROTOR STRUCTURES

Streszczenie: W artykule porównano parametry energetyczne dwóch silników: synchronicznego magnetoelektrycznego o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM) oraz indukcyjnego klatkowego. W obu konstrukcjach wykorzystano stojan silnika indukcyjnego typu Sg 100L-4B o mocy 3 kW. W celu określenia możliwości polepszenia parametrów użytkowych silnika o magnesach trwałych porównano krzywe nagrzewania obu silników. Stwierdzono, że nawet wzrost momentu obciążenia LSPMSM o 20% ponad moment znamionowy silnika indukcyjnego, nie powoduje przekroczenia dopuszczalnej temperatury pracy magnesów. Dla obu konstrukcji zestawiono wyznaczone na podstawie pomiarów wartości: sprawności, współczynnika mocy i prądów silnika. Zbadano możliwość uzyskania znacznie większej mocy użytecznej silnika magnetoelektrycznego w stosunku do silnika indukcyjnego mającego te same gabaryty.

Abstract: In the paper a power parameters of a line start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM) and squirrel-cage motor have been compared. The stator of 3kW induction motor, Sg 100L-4B, was used in both structures. In order to determine opportunities to increase engine performance parameters of LSPMSM the heating curves of both motors were compared. It was found that even after the load LSPMSM increase of 20% over the induction motor rated torque, does not exceed the allowable operating temperature magnets. Efficiency, power factor and current in the stator windings obtained during measurements for both structures have been presented. Particular attention was paid to the possibility to obtain much greater output power for LSPMSM than for induction motor of the same size.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny magnetoelektryczny, silnik indukcyjny, moc, sprawność, właściwości cieplne

Keywords: permanent magnet synchronous motor, asynchronous motor, power, efficiency, thermal properties

1. Wstęp

W napędach wielu urządzeń stosowane są silniki indukcyjne - najczęściej o wirnikach klatkowych - o mocach od kilku watów do kilkuset kilowatów. W celu lepszego wykorzystania parametrów energetycznych silników o mocach, nie przekraczających kilkunastu kilowatów, dokonano prób zmiany konstrukcji wirnika silnika o magnesach trwałych. Zastępując klasyczny wirnik klatkowy wirnikiem z magnesami trwałymi i klatką rozruchową otrzymano silnik eksperymentalny, dostosowany do bezpośredniego włączania do sieci (ang. *Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor-LSPMSM*) [4, 21, 22]. Magnetoelektryczne silniki synchroniczne są przeważnie stosowane w takich napędach jak: pompy, wentylatory, kompresory (w przemyśle ciężkim i górnictwie [7, 14]). Związane jest to z obniżeniem ich kosztów eksploatacji, wynikających ze zwiększenia sprawności i współczynnika mocy w porównaniu

do kosztów wynikających z zastosowania silników indukcyjnych o tych samych gabarytach [22].

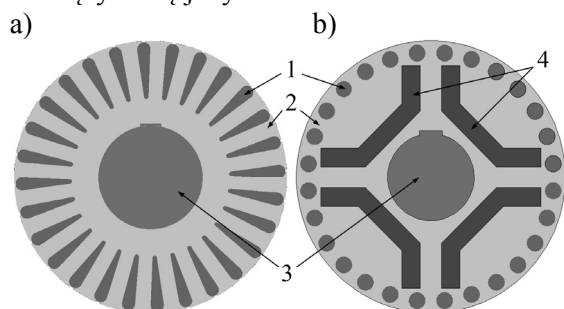
W celu obniżenia kosztów materiałów magnetycznych i obniżenia pracochłonności wybrane elementy konstrukcyjne silników magnetoelektrycznych można wykonywać z materiałów proszkowych [15, 18, 19]. Stosując zasadę unifikacji podzespołów można wykorzystywać również elementy seryjnie produkowanych silników indukcyjnych (np. rdzenie stojanów, kadłuby, tarcze łożyskowe, skrzynki zaciskowe, układy chłodzenia) [8]. Zapewnia się utrzymanie tych samych wartości długości rdzenia oraz wymiaru wzniosu osi wału. Sposoby osiągnięcia wzrostu parametrów energetycznych są bardzo różne. W odniesieniu do silników omawianej odmiany można zalecić informację zawarte w publikacjach [2, 10, 16, 23]. Rozwijane są konstrukcje LSPMSM [6, 9, 11, 13].

Należy przy tym zwracać uwagę na ograniczenia stopnia nagrzewania izolacji uzwojeń i właściwe odwzorowanie zjawisk cieplnych przy projektowaniu tego typu maszyn. Istotne znaczenie dla ich nagrzewania mają stany nieustalone i warunki pracy. Z tego względu wiele ośrodków naukowo-badawczych również w Polsce zajmuje się analizą zjawisk cieplnych w maszynach prądu przemiennego [1, 3, 4, 5, 12, 17].

W niniejszym artykule autorzy przedstawiają wyniki badań związane z wyzyskaniem takich paramentów jak sprawność, współczynnik mocy i moc użyteczna w silniku LSPMSM o takich samych gabarytach co silnik indukcyjny.

2. Opis badanych silników

Początkowym przedmiotem badań był trójfazowy silnik indukcyjny klatkowy typu Sg 100L-4B o mocy 3 kW, o prędkości znamionowej 1415 obr/min, napięciu znamionowym 400 V przy połączeniu uzwojeń w gwiazdę. Rdzeń o 36 półzamkniętych żłobkach jest umieszczony w żeliwnym kadłubie. W wirniku znajduje się klatka aluminiowa z 28 skoszonymi żłobkami (rys. 1a). Maszyna przeznaczona jest do rozruchów średnich i lekkich. W zbudowanym silniku LSPMSM wykorzystano rdzeń stojana i kadłub czterobiegunowego silnika indukcyjnego typu Sg100L-4B. W silniku zastosowano wirnik z magnesami neodymowymi ułożonymi w kształcie litery "U". Przyjęto klatkę rozruchową o 28 aluminiowych okrągłych prętach (rys. 1b). Takie rozwiązanie konstrukcyjne LSPMSM umożliwia dokonanie analizy porównawczej parametrów energetycznych obu silników różniących się jedynie wirnikami.



Rys.1. Przekroje wirników: a) silnika indukcyjnego, b) LSPMSM (1-pręty klatki, 2-rdzeń wirnika, 3-wał, 4- magnesy)

Wzrost mocy użytecznej ograniczony jest w silniku indukcyjnym dopuszczalnym przyrostem temperatury mogącym uszkodzić

izolacje uzwojeń, a w LSPMSM głównie wytrzymałością temperaturową magnesów. Maksymalna temperatura pracy spiekanych magnesów neodymowych waha się od 80°C do 200°C [20], w zależności od zastosowanych składników surowcowych - pierwiastków: Nd-neodym, Fe-żelazo, B-bor oraz spoiwa (tworzywa sztucznego lub żywicy). W sprzedaży najczęściej dostępne są magnesy neodymowe odporne na temperaturę do 80°C lub 120°C. W zbudowanym wirniku zastosowano magnesy o następujących parametrach:

- $B_r = 1,21-1,25$ [T],
- $H_{cB} = \text{min. } 907$ [kA/m],
- $BH_{\text{max}} = 286-302$ [kJ/m³],
- maksymalna temperatura pracy 150°C.

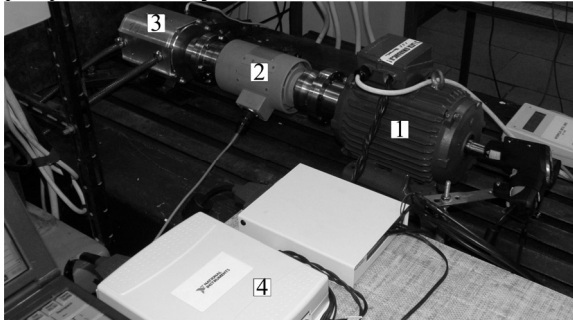
W celu określenia możliwości wyzyskania parametrów energetycznych nowej konstrukcji LSPMSM, należy zwrócić uwagę na to, aby temperatura ustalona przy zwiększonym obciążeniu tego silnika nie przekroczyła dopuszczalnej temperatury pracy magnesów.

3. Wyniki badań

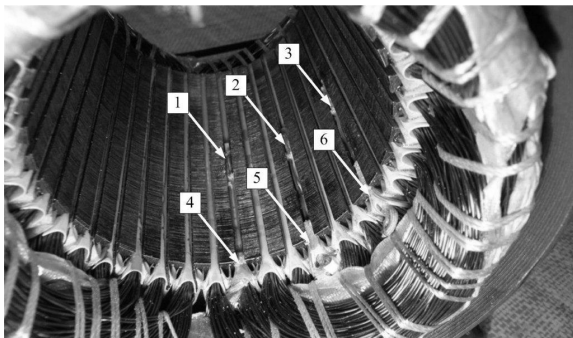
Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku (rys. 2), które umożliwia pomiar, archiwizację i wizualizację przebiegów: prądów, napięć, momentu obrotowego na wale, prędkości obrotowej wirnika oraz temperatury uzwojeń silnika. Do pomiaru temperatury trzech cewek należących do różnych grup uzwojeń fazowych wykorzystano czujniki temperatury PT-100. Trzy czujniki umieszczono w połowie długości żłobków w obszarze rozwarcia żłobkowego tuż przy powierzchni uzwojenia. Rozmieszczono je wzdłuż obwodu rdzenia stojana, tak jak to wskazują strzałki na rys. 3. Kolejne trzy czujniki osadzono pomiędzy zwojami uzwojeń kolejnych faz tuż za końcem rdzenia stojana. Czujniki temperatury połączone przy użyciu ośmiokanałowego modułu SCC-RTD01 firmy National Instruments oraz komputera umożliwiającego rejestrację temperatury uzwojeń w pobliżu połączeń czołowych oraz w obszarze rozwarć żłobkowych stojana.

Rejestrując wartości temperatury z sześciu czujników PT-100 wyznaczono krzywe nagrzewania uzwojeń w opisanych wcześniej miejscach umieszczenia tych czujników (rys. 4). Na kolejnych rysunkach 5-7 pokazano uśrednione krzywe nagrzewania uzwojeń w

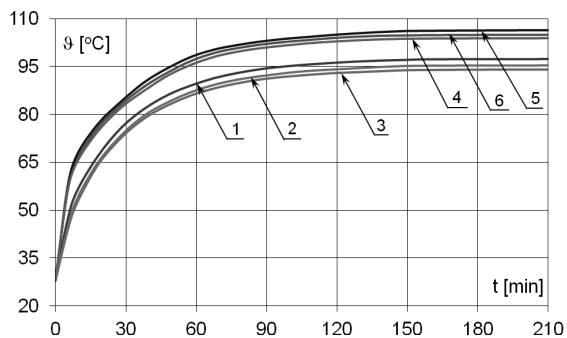
obszarze rozwarcia żłobkowego i w pobliżu połączeń czołowych obu silników.



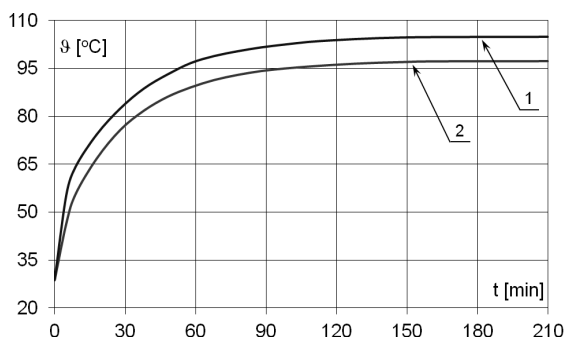
Rys. 2. Stanowisko pomiarowe (1-silnik, 2-głowica pomiarowa, 3-hamulec magneto-reologiczny, 4-moduł pomiarowy)



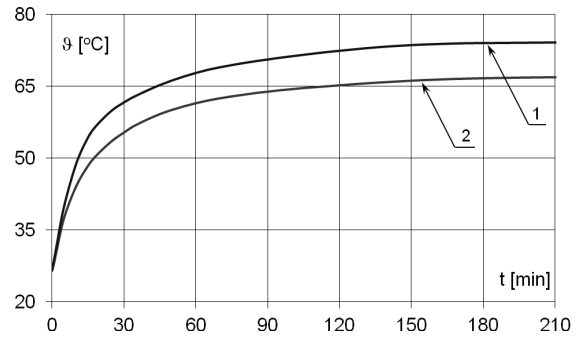
Rys. 3. Stojan z czujnikami PT-100



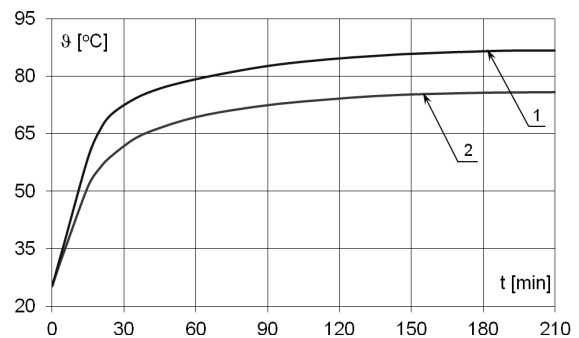
Rys. 4. Krzywe nagrzewania silnika indukcyjnego dla $T = 20 \text{ Nm}$ pomierzone czujnikami PT-100 w miejscach oznaczonych na rys. 3



Rys. 5. Krzywe nagrzewania uzwojenia stojana silnika indukcyjnego dla $T = 20 \text{ Nm}$ (1-w pobliżu połączeń czołowych, 2-w obszarze żłobka)



Rys. 6. Krzywe nagrzewania uzwojenia stojana silnika LSPMSM dla $T = 20 \text{ Nm}$ (1-w pobliżu połączeń czołowych, 2-w obszarze żłobka)



Rys. 7. Krzywe nagrzewania uzwojenia stojana silnika LSPMSM dla $T = 24 \text{ Nm}$ (1-w pobliżu połączeń czołowych, 2-w obszarze żłobka)

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów stwierdzono, że przy obciążeniu znamionowym silnika indukcyjnego $T = 20 \text{ Nm}$ temperatura ustalona w silniku LSPMSM jest o ok. 30°C niższa niż w silniku klatkowym. Związane jest to z generowaniem mniejszych strat mocy w silniku LSPMSM w wyniku zaniku strat mocy w wirniku oraz zmniejszeniem strat w stojanie (mniejszy prąd w uzwojeniach stojana). W silniku synchronicznym wirnik obraca się z prędkością wirowania pola magnetycznego wytworzonego przez uzwojenia stojana. Z tego względu w ustalonym stanie pracy nie indukuje się w prętach klatki rozruchowej siła elektromotoryczna i nie popłynie prąd. Nie wystąpią zatem straty mocy w uzwojeniu klatkowym. W rdzeniu wirnika również nie będzie strat, gdyż w tych warunkach pracy nie ma w wirniku zmian pola magnetycznego. Z tych powodów możliwe jest obciążenie silnika synchronicznego większą mocą. Nawet przy obciążeniu momentem o 20% większym od $T = 20 \text{ Nm}$ temperatura magnesów nie powinna przekroczyć 80°C , - tj. najniższej dopuszczalnej temperatury pracy magnesów neodymowych [20].

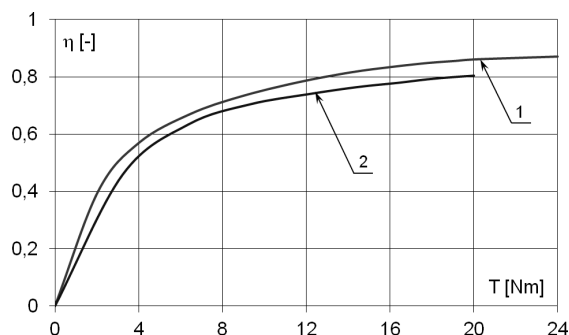
W celu porównania uzyskanych w tych warunkach pracy parametrów energetycznych obu konstrukcji silników, w tabeli 1 zestawiono wartości: sprawności, współczynnika mocy, prądu w uzwojeniach stojana i mocy wydawanej na wale.

Tabela 1. Wybrane parametry funkcjonalne w stanie pracy ustalonym obu silników

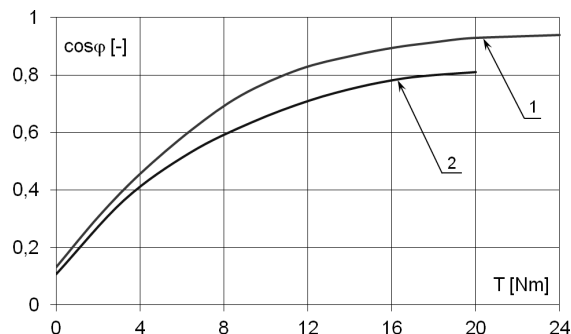
silnik	indukcyjny	LSPMSM	
	T=20Nm	T=20Nm	T=24Nm
parametry			
η [%]	0,81	0,86	0,88
$\cos\varphi$ [-]	0,81	0,93	0,94
I [A]	7,2	6,0	7,1
P_u [kW]	3,0	3,1	3,8

Wyznaczone na podstawie pomiarów wybrane parametry funkcjonalne obu silników (tab. 1) wykazują, że wzrost momentu obciążenia silnika LSPMSM o 20 % skutkuje wzrostem mocy użytecznej o ponad 25 % w stosunku do mocy silnika indukcyjnego. Wynika to nie tylko ze wzrostu momentu obciążenia, ale również ze zwiększenia prędkości obrotowej do 1500 obr/min. W związku z tym rośnie także proporcjonalnie wydatek pomp i wentylatorów napędzanych silnikami LSPMSM.

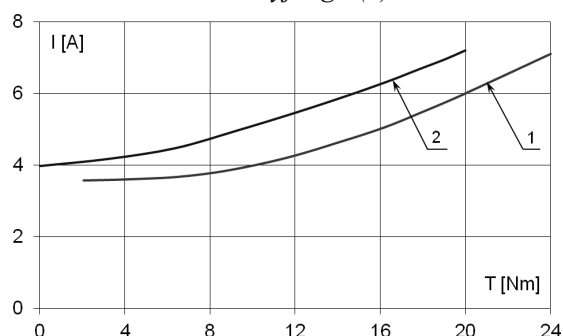
Na podstawie pomiarów wielkości elektrycznych i mechanicznych w ustalonych stanach pracy badanych silników wyznaczono sprawność (rys. 8), współczynnik mocy (rys. 9) oraz prąd pobierany z sieci (rys. 10) w funkcji momentu obciążenia. Otrzymane charakterystyki potwierdzają wzrost wyzyskania parametrów eksploatacyjnych nowej konstrukcji LSPMSM (większa sprawność i współczynnik mocy oraz mniejszy prąd w uzwojeniach stojana przy tym samym obciążeniu) w stosunku do silnika indukcyjnego o takim samym stanie.



Rys. 8. Sprawność w funkcji momentu obciążenia silników synchronicznego (1) i indukcyjnego (2)



Rys. 9. Współczynnik mocy w funkcji momentu obciążenia silników synchronicznego (1) i indukcyjnego (2)



Rys. 10. Prąd pobierany z sieci w funkcji momentu obciążenia silników synchronicznego (1) i indukcyjnego (2)

4. Wnioski

Zbudowany magnetoelektryczny silnik synchroniczny o rozruchu bezpośrednim charakteryzuje się lepszymi parametrami od silnika indukcyjnego klatkowego o tych samych gabarytach. Współczynnik mocy i sprawność silnika o magnesach trwałych są znacząco wyższe od wartości uzyskiwanych dla silnika indukcyjnego. Również wartość skuteczna prądu silnika LSPMSM w stanie ustalonym przy takim samym obciążeniu obu maszyn jest o ok. 20 % mniejsza niż w silniku indukcyjnym klatkowym. Otrzymane rezultaty pomiarów świadczą o tym, że silniki synchroniczne z magnesami trwałymi z powodzeniem mogą znaleźć zastosowanie w przemyśle szczególnie do napędu energochłonnych wentylatorów i pomp. Celowe jest zatem wdrożenie tego typu maszyn do produkcji i eksploatacji.

7. Literatura

- [1] Antal L., Gwoździewicz M., Marciniak T., Antal M.: *Badania skutków cieplnych zwarć zwojowych w uzwojeniach stojana silnika indukcyjnego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 66, Wrocław 2012, s. 316-324.

- [2] Banach H.: *Sprawność maksymalna indukcyjnego silnika pierścieniowego*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 92, 2011, wyd. BOBRME Komel, s. 139-143.
- [3] Barański M., Szelaż W.: *Finite element analysis of transient electromagnetic-thermal phenomena in a squirrel cage motor working at cryogenic temperature*. IET Science Measurement and Technology, 2012, Vol. 6, No 5, pp. 357-363.
- [4] Barański M., Szelaż W., Jędrzycka C., Mikołajewicz J., Łukaszewicz P.: *Analiza i badanie silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim i magnesach w wirniku rozłożonych w kształcie litery U*. Przegląd Elektrotechniczny, R. 89, Nr 2b/2013 s. 107-111.
- [5] Boglietti A., Cavagnino A., Staton D., Shanel M., Mueller M., Mejuto C.: *Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 3, March 2009, pp. 871-882.
- [6] Ding T., Takorabet N., Sargos F.M.: *Design and analysis of different line-start PM synchronous motors for oil-pump applications*. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, Vol. 45, No. 3, pp. 1816-1819.
- [7] Dzikowski A.: *Zastosowanie silnika z magnesami trwałymi do napędu ciągnienia górniczego kombajnu ścianowego*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 94, 2012, wyd. BOBRME Komel, s. 165-170.
- [8] Glinka T., Jakubiec M., Wiczorek A.: *Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych obwodu elektromagnetycznego na parametry silnika asynchronicznego synchronizowanego momentem reluktancyjnym*. Wiadomości Elektrotechniczne, 2001, Nr 6, s. 234-237.
- [9] Fei W., Luk K.P.C., Ma J., Shen J.X., Yang G.: *A high-performance line-start permanent magnet synchronous motor amended from a small industrial three-phase induction motor*. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, Vol. 45, No. 1, pp. 4724-4727.
- [10] Figura R., Leszek Szycha L.: *Estymacja sprawności silnika indukcyjnego klatkowego pracującego w zespole pompowym*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 92, 2011, wyd. BOBRME Komel, s. 175-180.
- [11] Knight A.M., McClay C.I.: *The design of high-efficiency line-start motors*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, Vol. 36, No. 6, pp. 1555 -1562.
- [12] Mikołajewicz J.: *Zjawiska cieplne w liniowych silnikach synchronicznych o magnesach trwałych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 62, Wrocław 2008, s. 301-306.
- [13] Miller T.J.E., Popescu M., Cossar C., McGilp M.I., Strappazon G., Trivillin N., Santarossa R.: *Line start permanent magnet motor: single-phase steady-state performance analysis*. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, Vol. 40, No. 2, pp. 516-525.
- [14] Polnik B.: *Silnik PMSM jako nowoczesny napęd w górniczych systemach transportowych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 94, 2012, wyd. BOBRME Komel, s. 81-86.
- [15] Skarrie H.: *Design of powder core inductors*. Lund University, Lund 2001.
- [16] Szulc Zb.: *Ocena ilościowa efektywności energetycznej układów napędowych wirowych maszyn przepływowych dużych mocy*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 91, 2011, wyd. BOBRME Komel, s. 195-198.
- [17] Szymczak P.: *Analiza stanów cieplnych nieustalonych w silnikach indukcyjnych liniowych*. Przegląd Elektrotechniczny, R. 86, Nr 6/2010, s. 179-183.
- [18] Wiśniewska-Weinert H., Leshchynsky V., Wendland J., Lisowski J.: *Rozwój technologii metalurgii proszków*. Stal Metale & Nowe Technologie, 2008, Nr 11-12, s. 52-59.
- [19] Wojciechowski R.M., Jędrzycka C., Łukaszewicz P., Kapelski D.: *Analysis of high speed permanent magnet motor with powder core material*. COMPEL, 2012, Vol. 31, No. 5, pp. 1528-1540.
- [20] www.magnesy-neodymowe.pl
- [21] Zalas P., Kisielewski P.: *Zastosowanie magnesów trwałych w silnikach elektrycznych małej mocy*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 91, 2011, wyd. BOBRME Komel, s. 109-112.
- [22] Zawilak T., Antal L.: *Porównanie silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim - badania eksperymentalne*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 77, 2007, wyd. BOBRME Komel, s. 277-282.
- [23] Zieliński W.G.: *Porównanie wskaźników energetycznych przy energooszczędnej pracy silnika klatkowego, realizowanej przez skokową regulację napięcia*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 91, 2011, wyd. BOBRME Komel, s. 187-190.

Autorzy

dr hab. inż. Wiesław Łyskawiński,
e-mail: Wieslaw.Lyskawin-ski@put.poznan.pl

dr inż. Paweł Idziak
e-mail: Pawel.Idziak@put.poznan.pl

dr inż. Mariusz Barański,
e-mail: Mariusz.Baranski@put.poznan.pl

dr inż. Krzysztof Kowalski,
e-mail: Krzysztof.Kowal-ski@put.poznan.pl

Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3A,

Recenzent

prof. dr hab. inż. Zdzisław Życki

