

Mariusz BARAŃSKI\*  
Paweł IDZIAK\*  
Wiesław ŁYSKAWIŃSKI\*

## **ANALIZA POWÓRNAWCZA STANÓW PRACY SILNIKÓW INDUKCYJNEGO I SYNCHRONICZNEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI I KLATKĄ ROZRUCHOWĄ**

W artykule porównano pracę w stanie ustalonym i podczas rozruchu dwóch silników: synchronicznego magnetoelektrycznego o rozruchu bezpośrednim (LSPMSM) oraz indukcyjnego klatkowego (IM). W obu konstrukcjach wykorzystano stojan silnika indukcyjnego typu Sg 100L-4B o mocy 3 kW. W silniku synchronicznym zastosowano klatkę rozruchową wykonaną z aluminium i z miedzi. Zbadano proces rozruchu tych maszyn. W celu określenia możliwości polepszenia parametrów użytkowych silnika o magnesach trwałych porównano krzywe nagrzewania silników. 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.

**SŁOWA KLUCZOWE:** silnik synchroniczny magnetoelektryczny, silnik indukcyjny, rozruch, nagrzewanie

### **1. WSTĘP**

Stosowane w napędach elektrycznych silniki indukcyjne coraz częściej są zastępowane przez silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM). Spowodowane jest to niższymi kosztami eksploatacji tych silników, wynikającymi ze zwiększenia sprawności i współczynnika mocy przy jednoczesnym zmniejszeniu gabarytów w porównaniu z odpowiadającymi im silnikami indukcyjnymi [22]. Opracowano m.in. interesujące konstrukcje z dzielonymi magnesami powierzchniowymi [12, 14]. W dążeniu do obniżenia kosztów i czasu produkcji proponuje się wykonywanie elementów konstrukcyjnych silników z materiałów proszkowych [16, 19, 20] w jednym procesie technologicznym.

Podstawową wadą PMSM jest konieczność zastosowania do ich rozruchu energoelektronicznych układów przekształtnikowych. W istotny sposób zwiększa to koszty całego układu napędowego. W celu uniknięcia tej wady w wielu ośrodkach naukowo-badawczych [4, 6, 9, 11, 13] prowadzone są intensywne prace

---

\* Politechnika Poznańska.

nad silnikami synchronicznymi przystosowanymi do rozruchu przy bezpośrednim podłączeniu do sieci elektrycznej (Line Start Permanent Magnets Synchronous Motors - LSPMSM). Tego typu silniki ze względu na swe zalety zastępują już silniki indukcyjne stosowane m.in. w górnictwie [7, 15].

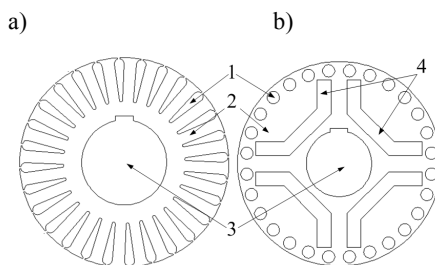
W celu obniżenia kosztów produkcji silników synchronicznych, bardzo często wykorzystuje się podzespoły seryjnie produkowanych silników indukcyjnych (np. rdzenie stojanów, kadłuby, tarcze łożyskowe, skrzynki zaciskowe, układy chłodzenia) [11]. Zapewnia się utrzymanie tych samych wartości długości rdzenia oraz wymiaru wzniosu osi wału. Sposoby osiągnięcia wzrostu parametrów energetycznych są bardzo różne. W odniesieniu do silników omawianej odmiany można zalecić informacje zawarte w publikacjach [2, 10, 17, 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, 18].

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

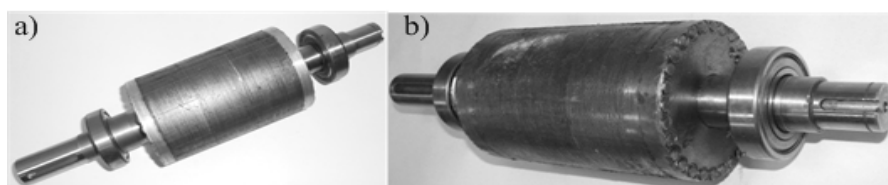
## 2. KONSTRUKCJA BADANYCH SILNIKÓW

Badaniom poddano silnik indukcyjny klatkowy 3-fazowy typu Sg 100L-4B o mocy 3 kW, prędkości znamionowej 1415 rpm, napięciu znamionowym 3x400 V przy połączeniu w gwiazdę. Stojan ma 36 półzamkniętych żłobków, a wirnik klatkowy (oryginalny) 28 skoszonych żłobków (rys. 1). Maszyna przeznaczona jest do rozruchów średnich i lekkich. Natomiast w wirniku z magnesami znajduje się 28 zamkniętych żłobków okrągłych (rys. 1).



Rys. 1. Przekrój poprzeczny wirnika silnika a) IM, b) LSPMSM (1-uzwojenie klatkowe, 2-rdzeń wirnika, 3-wał, 4- magnesy)

W silniku LSPMSM wykorzystano rdzeń stojana i kadłub tego samego silnika indukcyjnego typu Sg100L-4B. W silniku zastosowano dwa wirniki z magnesami neodymowymi ułożonymi w kształcie litery "U". W jednym wirniku wykonano klatkę rozruchową z 28 okrągłych prętów aluminiowych, a w drugim z miedzianych (rys. 2). Takie rozwiązanie konstrukcyjne LSPMSM umożliwia dokonanie analizy porównawczej parametrów energetycznych wyznaczonych w stanie ustalonym oraz parametrów rozruchowych obu silników różniących się jedynie wirnikami.



Rys. 2. Wirnik silnika LSPMSM z klatką a) aluminiową, b) miedzianą

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 [21], w zależności od zastosowanych składników surowcowych - pierwiastków: Nd-neodym, Fe-żelazo, B-bor oraz spoiwa (tworzywa sztuczne 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:

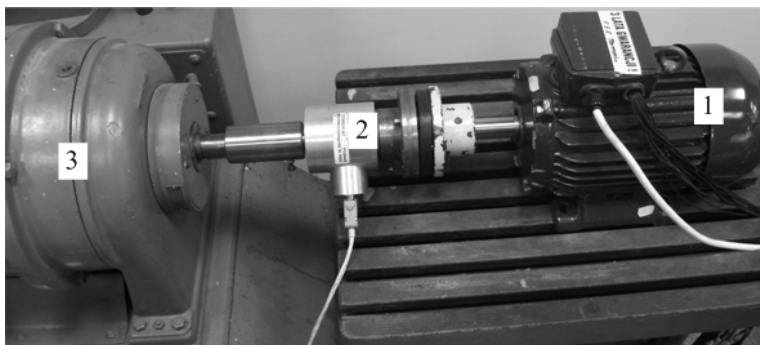
- $B_r = 1,21-1,25$  [T],
- $H_{cB} = \text{min. } 907$  [kA/m],
- $BH_{\text{max}} = 286-302$  [kJ/m<sup>3</sup>],
- maksymalna temperatura pracy 150°C.

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

Opracowana konstrukcja LSPMSM ma stanowić zamiennik silnika indukcyjnego. Z tego powodu moment znamionowy silnika klatkowego ( $T_N = 20$  Nm) uznano za wartość wzorcową podczas prowadzonych badań.

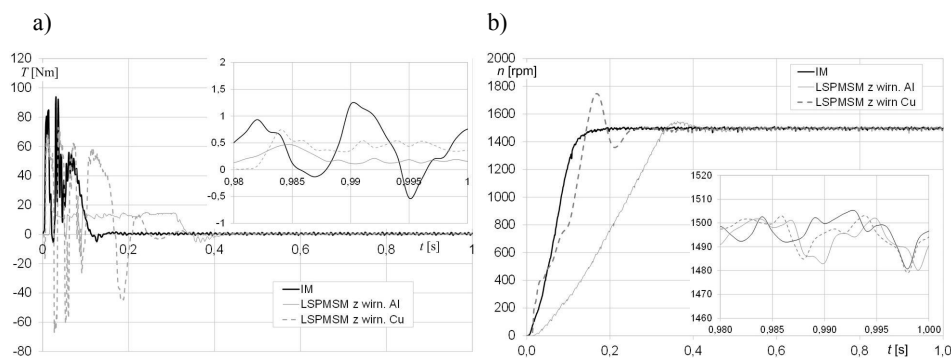
Pomiary w ustalonych i przejściowych stanach pracy badanych silników zrealizowano na stanowisku przedstawionym na rys. 3.



Rys. 3. Stanowisko do badania silników magnetoelektrycznego i indukcyjnego: 1- silnik, 2-głowica do pomiaru momentu i prędkości obrotowej, 3- hamowania

Stanowisko umożliwia pomiar wielkości wejściowych takich jak prądy, napięcia i moce oraz wielkości wyjściowych, tj. prędkości obrotowych i momentów obciążenia na wale badanych silników. W celu uniknięcia błędów odczytu wielkości elektryczne mierzono z wykorzystaniem przyrządów cyfrowych i analogowych, a moment i prędkość obrotową odczytywano zarówno z głowicy pomiarowej jak i hamowani.

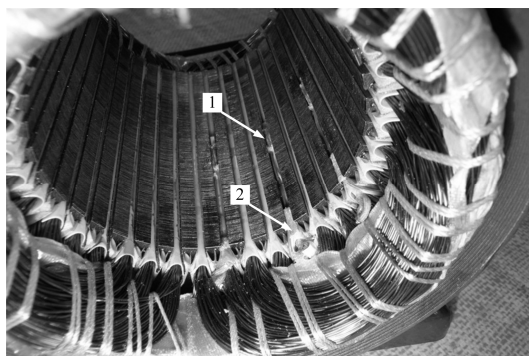
Na rysunku 4 przedstawiono zarejestrowane przebiegi momentu obrotowego na wale (rys. 4a) oraz prędkości obrotowej (rys. 4b). Badano proces rozruchu silników zasilanych z sieci o napięciu  $U = 400$  V, pracujących na biegu jałowym (brak połączenia mechanicznego z obciążeniem). Ze względu na przyjętą skalę czasu na tych samych rysunkach, w celu lepszej wizualizacji przebiegów w powiększeniu przedstawiono końcowe ich fragmenty. Prezentują one przebiegi uzyskane w ostatnim okresie napięcia zasilającego. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zastosowanie w silniku synchronicznym klatki miedzianej zamiast aluminiowej spowodowało znaczne skrócenie czasu rozruchu (rys. 4).



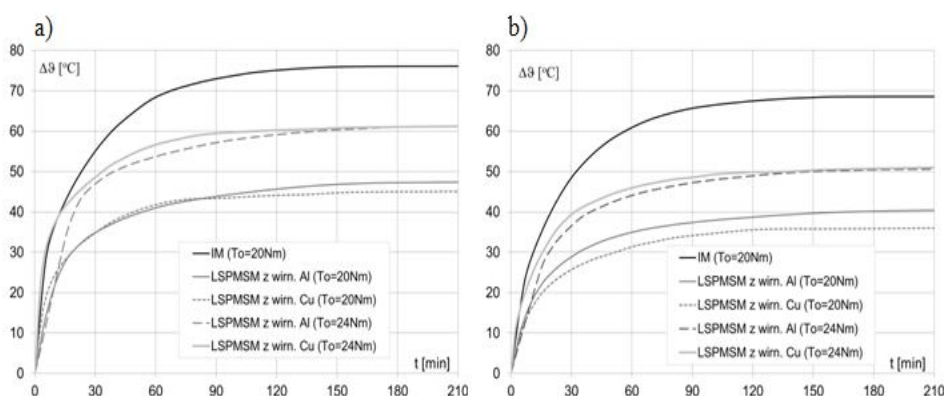
Rys. 4. Przebiegi a) momentu elektromagnetycznego, b) prędkości obrotowej dla  $T_0 = 0$  Nm

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. 5. Kolejne trzy czujniki osadzono pomiędzy zwojami uzwojeń kolejnych faz tuż za końcem rdzenia stojana. Czujniki temperatury połączono do 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. 5). Na rysunkach 6 pokazano uśrednione krzywe nagrzewania uzwojeń w obszarze rozwarcia żłobkowego i w pobliżu połączeń czołowych obu silników.

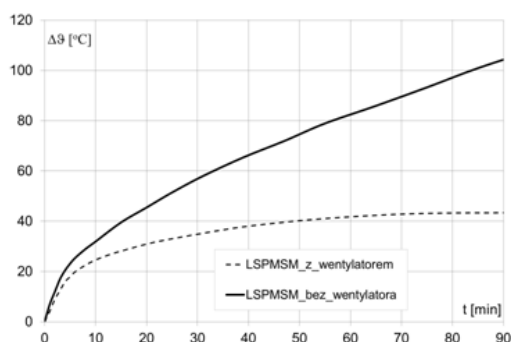


Rys. 5. Stojan z czujnikami PT-100 (1-połowa długości żłobków, 2 – połączenia czołowe)



Rys. 6. Krzywe nagrzewania dla  $T_0 = 20 \text{ Nm}$  (silniki IM i LSPMSM) oraz dla  $T_0 = 24 \text{ Nm}$  (silnik LSPMSM) w obszarze połączeń czołowych (a) oraz w połowie długości żłobków (b)

Na rysunku 7 zestawiono krzywe nagrzewania silnika LSPMSM z wirnikiem miedzianym przy swobodnym (bez wentylatora) i wymuszonym (z wentylatorem) przepływie czynnika (powietrza) chłodzącego badaną maszynę. Dla czasu nagrzewania równego  $t = 90$  minut różnica temperatury wynosi ok.  $60^{\circ}\text{C}$ , przy czym proces nagrzewania silnika bez wentylatora jeszcze trwa (rys. 7).



Rys.7. Krzywe nagrzewania silnika LSPMSM z wentylatorem i bez wentylatora w obszarze połączeń czołowych, dla  $T_0 = 20$  Nm

Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów stwierdzono, że przy obciążeniu znamionowym silnika indukcyjnego  $T = 20$  Nm temperatura ustalona w silniku LSPMSM jest o ok.  $30^{\circ}\text{C}$  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  $T = 20$  Nm przyrost temperatury silnika synchronicznego jest o ponad  $15^{\circ}\text{C}$  mniejszy niż w silniku indukcyjnym.

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.

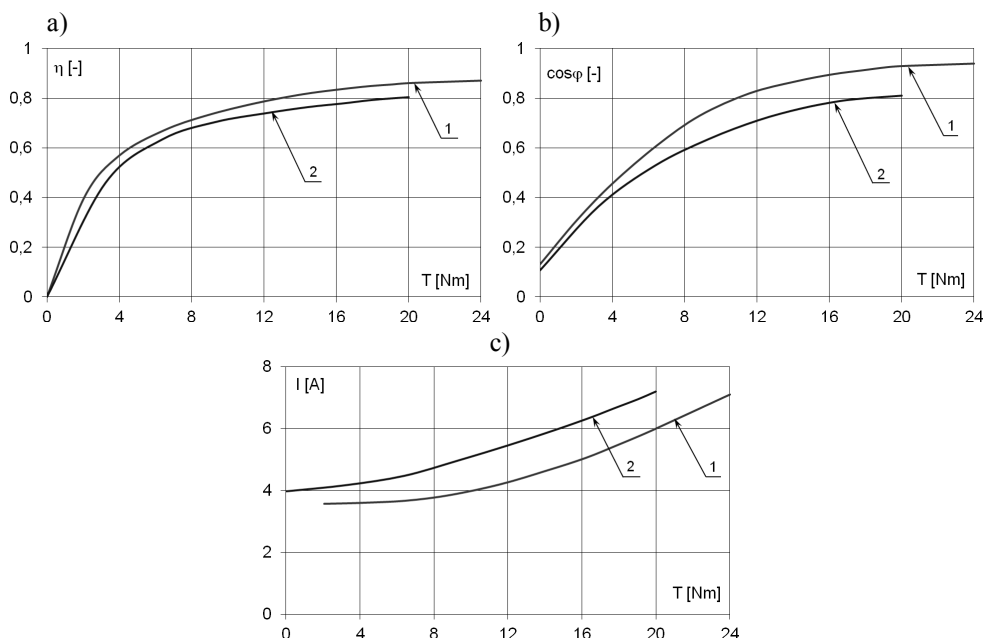
Wyznaczone na podstawie pomiarów wybrane parametry funkcjonalne obu silników (tabela 1) wykazują, że wzrost momentu obciążenia silnika LSPMSM o 20 % skutkuje wzrostem mocy użytecznej o ponad 25 % w stosunku do mocy silnika indukcyjnego. Wynika to nie tylko ze wzrostu momentu obciążenia, ale

również ze zwiększenia prędkości obrotowej do 1500 obr/min. W związku z tym rośnie także proporcjonalnie wydatek pomp i wentylatorów napędzanych silnikami LSPMSM.

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

silnik parametry	indukcyjny	LSPMSM	
	T = 20 Nm	T = 20 Nm	T = 24 Nm
$\eta$ [%]	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

Na podstawie pomiarów wielkości elektrycznych i mechanicznych w ustalonych stanach pracy badanych silników wyznaczono sprawność (rys. 8a), współczynnik mocy (rys. 8b) oraz prąd pobierany z sieci (rys. 8c) 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 stojanie.



Rys. 8. Sprawność (a), współczynnik mocy (b) oraz prąd pobierany z sieci (c) w funkcji momentu obciążenia silników synchronicznego (1) i indukcyjnego (2)

## 5. 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.

Wykonane pomiarowy wykazały, że stosując prostą wymianę wirnika w maszynie asynchronicznej klatkowej na wirnik z odpowiednio ukształtowanym obwodem magnetycznym z magnesami trwałymi można uzyskać maszynę synchroniczną zdolną do samodzielnego rozruchu. Parametry użytkowe maszyny o nowej konstrukcji są nawet lepsze od parametrów silnika klatkowego.

## 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., Szeląg 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., Szeląg 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., Wieczorek 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 Szychta 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] May H., Palka R., Paplicki P., Szkolny S., Canders W.-R.: *Modified concept of permanent magnet excite synchronous machines with improved high-speed features*. Archives of Electrical Engineering, 2011, Vol. 60, No. 4, pp. 531-540.
- [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] Młot A., Korkosz M., Łukaniszyn M.: *Iron loss and eddy-current loss analysis in a low-power BLDC motor with magnet segmentation*. Archives of Electrical Engineering, 2012, Vol. 61, No. 1, pp. 33-46.
- [15] Polnik B.: *Silnik PMSM jako nowoczesny napęd w górniczych systemach transportowych*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 94, 2012, wyd. BOBRME Komel, s. 81-86.
- [16] Skarrie H.: *Design of powder core inductors*. Lund University, Lund 2001.
- [17] 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.
- [18] Szymczak P.: *Analiza stanów cieplnych nieustalonych w silnikach indukcyjnych liniowych*. Przegląd Elektrotechniczny, R. 86, Nr 6/2010, s. 179-183.
- [19] Wiśniewska-Weinert H., Leshchynsky V., Wendland J., Lisowski J.: *Rozwój technologii metalurgii proszków*. Stal Metale & Nowe Technologie, 2008, Nr 11-12, s. 52-59.
- [20] 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.
- [21] [www.magnesy-neodymowe.pl](http://www.magnesy-neodymowe.pl)
- [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.

#### COMPARED ANALYSIS OF THE TRANSIENTS UNDER STARTING PROCESS AND THE STEADY STATES OF SQUIRREL-CAGE MOTOR AND LSPMSM

In the paper the transients under starting process and the steady states of line start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM) and squirrel-cage motor have been. 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. In LSPMSM the rotor with aluminum and copper cage was used. The basic operating parameters of the two structures which are characterized by identical stators was compared. Particular attention has been given to the transient under starting process. 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. The selected results of experimental tests was shown.