

*silnik synchroniczny magnetoelektryczny, rozruch własny,  
nowa struktura wirnika, analiza wybranych stanów pracy*

Mariusz BARAŃSKI, Wojciech SZELAĞ,  
Cezary JĘDRYCZKA, Jacek MIKOŁAJEWICZ\*

## **ANALIZA SILNIKA SYNCHRONICZNEGO O ROZRUCHU BEZPOŚREDNIM I MAGNESACH W WIRNIKU ROZŁOŻONYCH W KSZTAŁCIE LITERY U**

W artykule dokonano analizy procesu rozruchu i stanu pracy ustalonej silnika synchronicznego magnetoelektrycznego przystosowanego do rozruchu bezpośredniego. Badania symulacyjne przeprowadzono przy wykorzystaniu połowo-obwodowego modelu zjawisk i programu symulacyjnego, opracowanego w środowisku Maxwell. Rozpatrzono silnik o wirniku z magnesami trwałymi ułożonymi w obszarze podziałki biegunowej wirnika w kształcie litery U. Przyjęto, że pakiet stojana jest identyczny jak w seryjnie produkowanym trójfazowym czterobiegunowym silniku indukcyjnym o mocy 3 kW. Analizowano m.in. wpływ napięcia zasilania i liczby zwojów uzwojenia stojana na parametry rozruchowe i parametry funkcjonalne silnika w stanie pracy ustalonej. Przedstawiono wybrane rezultaty badań oraz wynikające z nich wnioski.

### **1. WPROWADZENIE**

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie magnetoelektrycznymi silnikami synchronicznymi przystosowanymi do rozruchu bezpośredniego. W literaturze określone są one skrótem LSPMSM (ang. *Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*) [1, 2, 3]. Silniki te charakteryzują się większym współczynnikiem mocy i sprawnością w porównaniu z klasycznymi silnikami indukcyjnymi klatkowymi. Z tego względu silniki LSPMSM są szczególnie pożądane w układach napędowych przeznaczonych do pracy ciągłej, stosowanych m.in. w napędach pomp i wentylatorów w górnictwie.

Przy opracowywaniu nowych konstrukcji silników synchronicznych przystosowanych zarówno do rozruchu bezpośredniego, jak i rozruchu częstotliwościowego, celo-

---

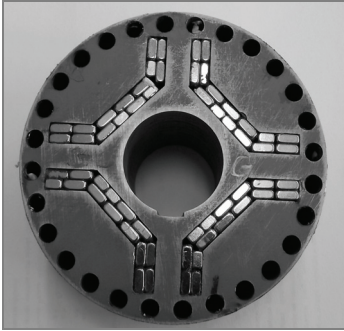
\* Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań.

we jest, wykorzystanie podzespołów produkowanych seryjnie silników indukcyjnych klatkowych [4, 5]. Głównym powodem jest dążenie do obniżenia kosztów produkcji poprzez zachowanie standardowych elementów maszyn stosowanych w ramach produkowanych serii. Do podzespołów tych można zaliczyć m.in. rdzenie magnetyczne stojana, kadłuby, tarcze łożyskowe, skrzynki zaciskowe, układy chłodzenia. Magnes trwały w rozpatrywanych silnikach magnetoelektrycznych są umieszczone w wirniku [6–9]. Dla potrzeb zapewnienia rozruchu asynchronicznego w wirniku oprócz magnesów trwałych umieszcza się uzwojenie klatkowe. Po wpadzie w synchronizm tłumiono również kołysania wirnika towarzyszące nagłym zmianom obciążenia, a także może pełnić rolę elementu konstrukcyjnego łączącego poszczególne podzespoły wirnika.

W pracy zaproponowano konstrukcję silnika LSPMSM bazującą na stojanie czterobiegunowego silnika indukcyjnego przystosowanego dla zasilania napięciem przewodowym 400 V. W celu zbadania możliwości wykorzystania tego silnika w przemyśle górniczym przeprojektowano uzwojenie oraz przeprowadzono obliczenia przy napięciu przewodowym 500 V. Zaprezentowano wybrane wyniki badań symulacyjnych oraz wynikające z nich wnioski dotyczące procesu rozruchu i stanu pracy ustalonej rozpatrywanego silnika.

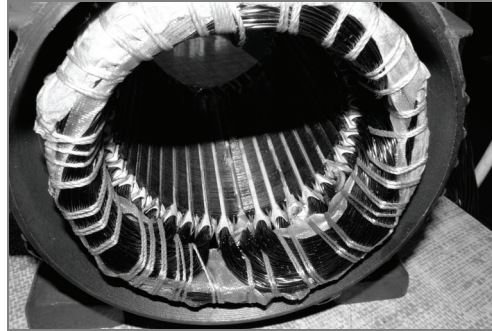
## 2. PROJEKT NOWEJ STRUKTURY WIRNIKA

Na podstawie przeprowadzonych w Zakładzie Mechatroniki i Maszyn Elektrycznych Politechniki Poznańskiej analiz konstrukcji i wstępnej optymalizacji silników synchronicznych, zaproponowano nową strukturę wirnika silnika magnetoelektrycznego przystosowanego do rozruchu bezpośredniego. Strukturę wirnika (bez zamontowanego uzwojenia klatkowego) pokazano na rys. 1. Przy projektowaniu silnika uwzględniono, że zadany jest wykrój blachy stojana. Wykorzystano rdzeń stojana seryjnie produkowanego czterobiegunowego trójfazowego silnika indukcyjnego typu Sg100L-4B (rys. 2). W celu optymalnego wykorzystania obwodu magnetycznego stojana trzeba było dostosować układ wzbudzenia (poprzez dobór rozmieszczenia, grubości oraz parametrów materiałowych magnesów trwałych) odpowiednio do pożądanego rozkładu i wartości indukcji w szczelinie maszyny. Przyjęto, że amplituda indukcji, ze względu na nasycanie się zębów i jarzma stojana jest zbliżona do wartości amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji w szczelinie silnika indukcyjnego typu Sg100L-4B. Na rysunku 3 pokazano wykonany wirnik silnika modelowego.



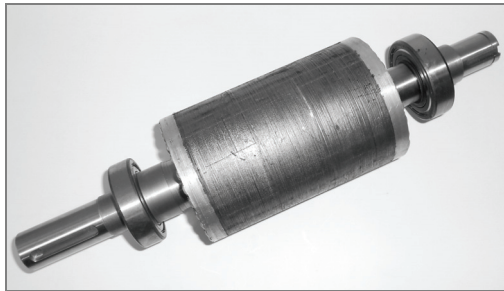
Rys. 1. Fragment pakietu wirnika z magnesami

Fig. 1. Part of rotor core with magnets



Rys. 2. Stojana trójfazowego silnika indukcyjnego Sg100L-4B

Fig. 2. Stator of the three phase induction motor Sg 100L-4B



Rys. 3. Wirnik opracowanego silnika LSPMSM

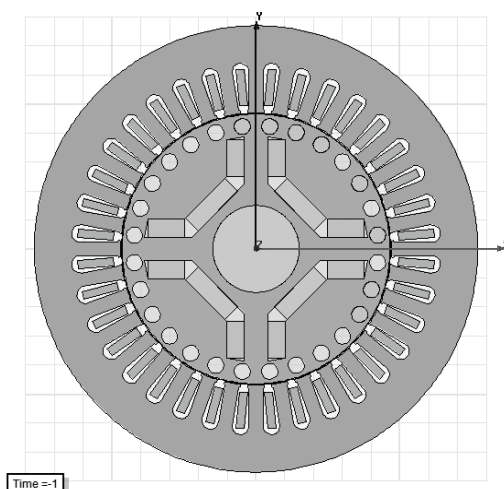
Fig. 3. Elaborated rotor of the LSPMSM motor

### 3. BADANIA SYMULACYJNE SILNIKA

Model polowo-obwodowy rozpatrywanego silnika opracowano w środowisku Maxwell. Geometrię wirnika oraz parametry uzwojenia stojana i układu zasilania sparametryzowano pod kątem potrzeb obliczeń optymalizacyjnych. Są one przewidziane na dalszym etapie badań. Przekrój poprzeczny silnika przedstawiono na rys. 4. Konstrukcję wirnika opracowano na podstawie wstępnych obliczeń optymalizacyjnych z wykorzystaniem modelu obwodowego maszyny LSPMSM przeprowadzonych w ramach [10].

W celu późniejszej pomiarowej weryfikacji zbudowanego silnika wykonano obliczenia symulacyjne procesu rozruchu i ustalonego stanu pracy. W równaniu dynamiki maszyny przyjęto, że moment bezwładności obciążenia jest równy momentowi bezwładności wirnika silnika, tj.  $J_b = 0.0073 \text{ kgm}^2$ . Założono ponadto wentylatorową

charakterystykę obciążenia. Badano wpływ zmiany napięcia zasilania  $U$  oraz liczby zwojów  $z_c$  uzwojenia fazowego silnika na jego parametry funkcjonalne. Symulacje przeprowadzono dla dwóch wartości napięć i liczby zwojów fazowych:  $U = 400V$ ,  $z_c = 30$  oraz  $U = 500V$ ,  $z_c = 39$ . Jednowarstwowe uzwojenie stojana połączone w gwiazdę bez przewodu zerowego. Wyznaczano przebiegi momentu, prędkości obrotowej, prądów i sił elektromotorycznych w uzwojeniu stojana oraz wybrane parametry funkcjonalne charakteryzujące stan pracy ustalonej silnika.

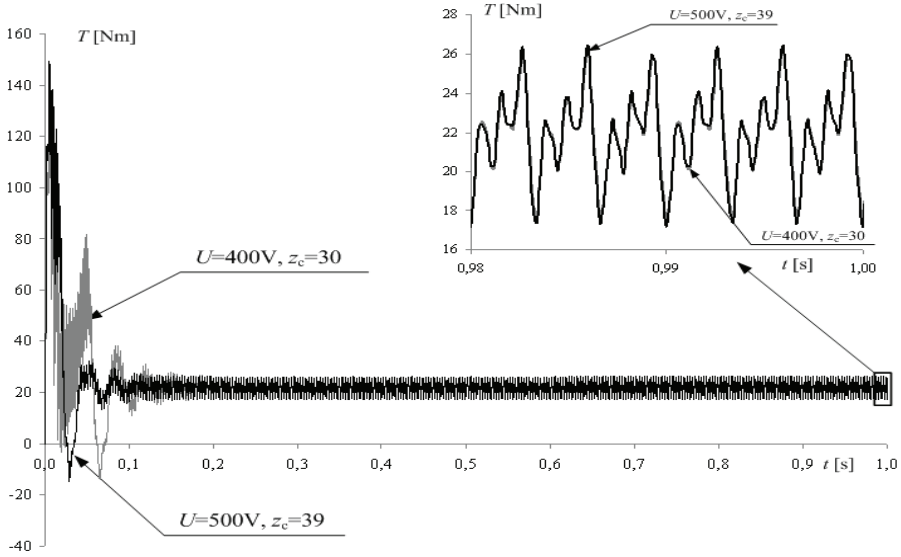


Rys. 4. Struktura silnika z klatką rozruchową oraz magnesami rozłożonymi w kształcie „U”  
 Fig. 4. The structure of LSPMSM motor with „U” shape permanent magnets arrangement

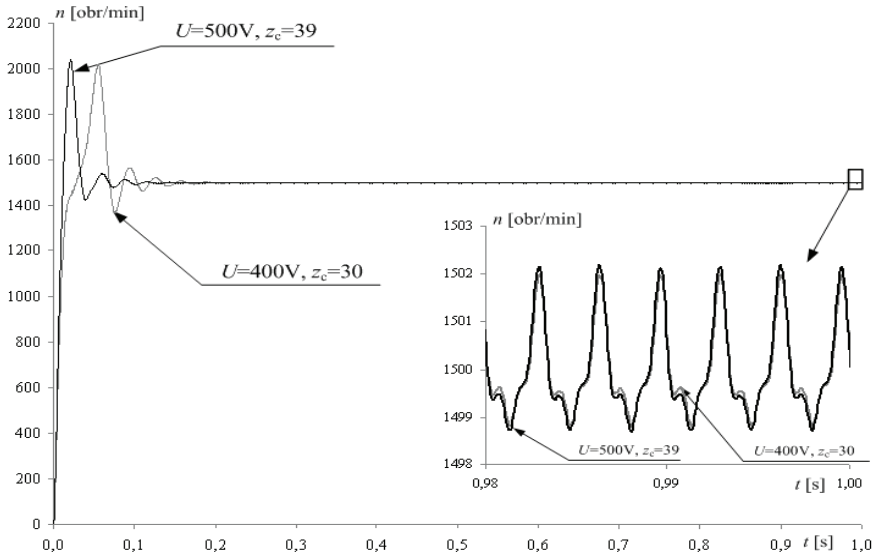
Na rysunkach 5–7 przedstawiono porównanie przebiegów momentu elektromagnetycznego, prędkości obrotowej oraz prądów w uzwojeniu stojana od chwili załączenia napięcia do chwili ustalenia się prędkości obrotowej. Dodatkowo, na tych samych rysunkach, w powiększeniu przedstawiono końcowe fragmenty zamieszczonych przebiegów. Prezentują one przebiegi uzyskane w ostatnim okresie napięcia zasilającego. Na rysunku 8 pokazano porównanie obliczonych fazowej i przewodowej sił elektromotorycznych indukowanych w uzwojeniu stojana przy znamionowej prędkości wirowania wirnika,  $n = 1500$  obr/min. Siły elektromotoryczne wyznaczono dla maszyny nieobciążonej.

Na podstawie otrzymanych przebiegów czasowych wyznaczono i zamieszczono w tabeli 1 wybrane wielkości całkowite. Zestawiono w niej wartości skuteczne napięcia fazowego  $U_f$  i prądu fazowego silnika  $I_f$ , moc mechaniczną  $P_{mech}$ , moment elektromagnetyczny  $T$ , sprawność  $\eta$ , współczynnik mocy  $\cos\phi$  oraz wartość skuteczną indukowanej przewodowej  $E_p$  i fazowej  $E_f$  siły elektromotorycznej. Wartość skuteczną prądu obliczono, jako średnią arytmetyczną wartości skutecznych trzech prądów fazowych.

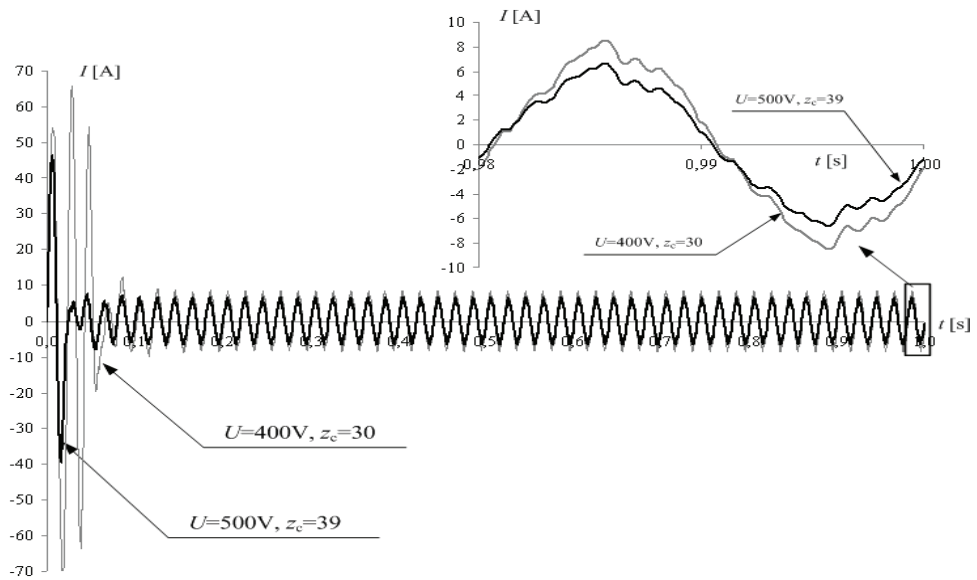
Dla porównania w tabeli 2 zestawiono parametry znamionowe silnika indukcyjnego Sg100L-4B, na bazie którego opracowano analizowany silnik LSPMSM.



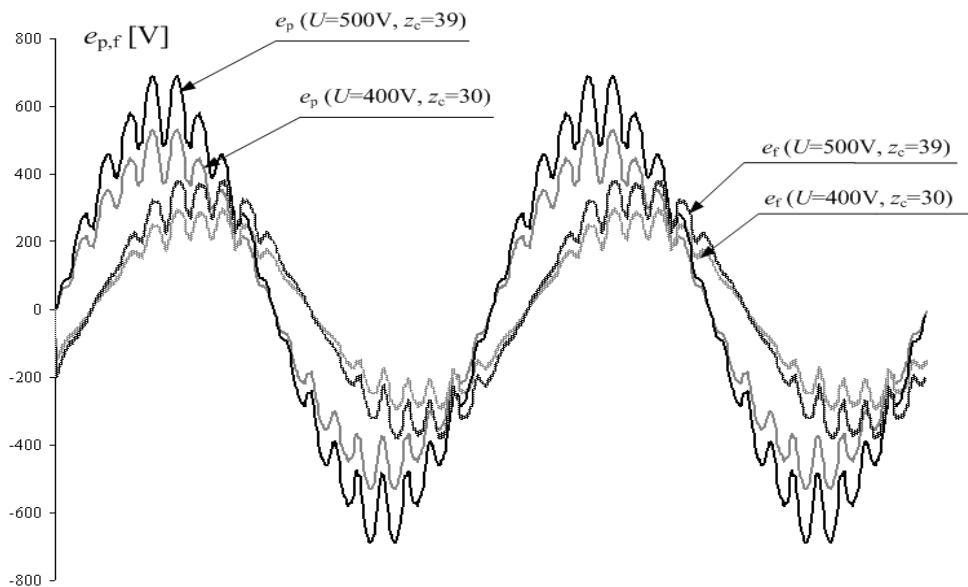
Rys. 5. Obliczone przebiegi momentu elektromagnetycznego  
Fig. 5. Calculated electromagnetic torque waveforms



Rys. 6. Obliczone przebiegi prędkości obrotowej  
Fig. 6. Calculated rotor speed waveforms



Rys. 7. Obliczone przebiegi prądu  $I$  wybranej fazy uzwojenia stojana  
 Fig. 7. Calculated phase current waveforms



Rys. 8. Fazowa  $e_f$  i przewodowa  $e_p$  siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu stojana przy  $n = 1500$  obr/min

Fig. 8. Induced electromotive force  $e_f$  and  $e_p$  (back emf) in stator winding at  $n = 1500$  rpm

Tabela 1. Wybrane parametry funkcjonalne w stanie pracy ustalonym  
Table 1. Selected functional parameters in steady state

	$z_c$	$U_f$ [V]	$I_f$ [A]	$P_{mech}$ [W]	$T$ [Nm]	$\eta$ [%]	$\cos\varphi$ [-]	$E_p$ [V]	$E_f$ [V]
$U=400V$	30	231	5,49	3447,42	21,94	0,909	0,996	331,21	191,35
$U=500V$	39	289	4,25	3439,85	21,89	0,930	0,998	430,77	248,86

Tabela 2. Wybrane parametry funkcjonalne referencyjnego silnika indukcyjnego Sg100L-4B  
Table 2. Selected functional parameters of reference asynchronous motor Sg100L-4B

	$z_c$	$U_f$ [V]	$I_f$ [A]	$P_{mech}$ [W]	$T$ [Nm]	$\eta$ [%]	$\cos\varphi$ [-]
$U=400V$	30	231	6,6	3000	20,15	0,81	0,81

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano silnik synchroniczny magnetoelektryczny przystosowany do rozruchu własnego o magnesach trwałych rozmieszczonych w wirniku w kształcie litery U. Przy budowie silnika modelowego wykorzystano podzespoły silnika indukcyjnego klatkowego typu Sg100L-4B. Sparаметryzowany model symulacyjny silnika opracowano w programie Maxwell. Wykorzystano go do analizy procesu rozruchu i stanu pracy ustalonego silnika. Przedstawiono wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych. Rozpatrzono m.in. wpływ wartości napięcia zasilającego oraz liczby zwojów uzwojenia fazowego na wybrane przebiegi wielkości elektrycznych i mechanicznych. Zestawiono wybrane parametry całkowite charakteryzujące stan pracy ustalonej.

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć niewielki wpływ napięcia zasilania (przy odpowiednio dobranej liczbie zwojów cewek uzwojeń fazowych) na przebieg procesu rozruchu. Wykonane badania symulacyjne wykazały, że wirniki silnika przystosowanego do pracy przy napięciu 400V, jak i silnika o napięciu znamionowym 500 V w wyniku przeprowadzenia rozruchu bezpośredniego bez problemu uzyskały prędkość synchroniczną. Natomiast obliczone na podstawie modelu połowobwodowego parametry funkcjonalne tych silników, tj. współczynnik mocy i sprawność są znacząco wyższe od parametrów funkcjonalnych klasycznego silnika indukcyjnego. Ponadto na podstawie przeprowadzonej analizy zawartości wyższych harmonicznych w przebiegach prądów fazowych silników uzyskanych dla ustalonego stanu pracy wyznaczono współczynnik THDi. Jego wartość dla obu rozważanych wariantów silników magnetoelektrycznych synchronicznych była mniejsza od 8,5%.

Należy jednak zwrócić uwagę na to, że parametry obciążenia przyjęte w obliczeniach (relatywnie mały moment bezwładności oraz wentylatorowy przebieg charakterystyki mechanicznej obciążenia) ułatwiają proces rozruchu i synchronizacji silnika. Z tego względu w kolejnym etapie prac Autorzy planują analizować proces rozruchu dla znacznie większych momentów bezwładności oraz pomiarową weryfikację otrzymanych wy-

ników. Wnioski wynikające z tych badań będą wykorzystane w procesie projektowych obliczeń optymalizacyjnych silnika LSPMSM o nowej strukturze wirnika.

Praca została zrealizowana w ramach projektu nr POIG.01.01.02-00-113/09 „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa”.

#### LITERATURA

- [1] MILLER T.J.E., POPESCU M., COSSAR C., MCGILP M.I., STRAPPAZZON G., TRIVILLIN N., SANTAROSSA R., *Line start permanent magnet motor: singlephase steady-state performance analysis*, IEEE Trans. Ind. Appl., 2004, Vol. 40, No. 2, 516–525.
- [2] POPESCU M., MILLER T., *Line start PM motor: single phase starting performance analysis*, IEEE Trans., IA-39, 2003, No. 4, 1021–1030.
- [3] GWOŹDZIEWICZ M., ZAWILAK J., *Influence of the rotor construction on the single-phase line start permanent magnet synchronous motor performances*, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 NR 11/2011.
- [4] ZAWILAK T., ANTAL L., *Porównanie silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim – badania eksperymentalne*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 77/2007, 277–282.
- [5] JAŹDŻYŃSKI W., BAJEK M., *Obliczenia analityczne silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim(LSPMSM) z pominięciem zjawisk nieliniowych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 83/2009, 73–76.
- [6] TAKEGAMI T., TSUBOI K., HASEGAWA M., HIROTSUKA I., NAKAMURA M., *Calculation method for asynchronous starting characteristics of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor*, International Conference on Electrical machines and Systems (ICEMS), 10–13 Oct. 2010, 1137–1142.
- [7] JIAN L., SONG J., CHO Y., *High performance Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor for pumping system*, International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 4–7 July 2010, 1308–1313.
- [8] FEI, W., LUK, P., 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 Transaction on Magnetics, Issue 10, 4724–4727.
- [9] LI M., LOWTHER D.A., *Global and distributed torque calculations using the CDSA approach*, Archives of Electrical Engineering, 2011, Vol. 60(4), 459–471.
- [10] Raport zadania 8B – Baza wiedzy projektu NGNiPW POIG.01.01.02-00-113/09 <http://www.ngn.put.poznan.pl/BazaWiedzy/> (dostęp z dnia 15.03.2012)

#### ANALYSIS OF LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH U-SHAPED MAGNETS ROTOR

In the paper transients under starting process and steady states of line start permanent magnet synchronous motor have been analyzed. Computer simulations have been performed using field-circuit model of the LSPMSM elaborated in the Maxwell environment. The structure of the rotor with permanent magnets arranged in “U” shape per pole has been used. It was assumed that the stator is made on the basis of mass-produced 3-phase, 4-pole, 3 kW squirrel-cage induction motor. The influence of supply voltage and coils turn number of the stator phase winding on the starting and functional parameters in steady state of the motor have been investigated. Selected results and conclusions have been presented.