

Mariusz Barański, Cezary Jędrzycka, Łukasz Knypiński, Dorota Stachowiak, Wojciech Szelaąg
Politechnika Poznańska

ANALIZA WPLYWU NIESYMETRII OBWODU MAGNETYCZNEGO WIRNIKA NA PARAMETRY ROZRUCHOWE 6-BIEGUNOWEGO SILNIKA MAGNETOELEKTRYCZNEGO SYNCHRONICZNEGO

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF ASSYMETRY OF THE ROTOR MAGNETIC CIRCUIT ON THE STARTING PARAMETERS OF THE LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analizy wpływu niesymetrii obwodu magnetycznego wirnika na przebieg procesu rozruchu silnika synchronicznego magnetoelektrycznego. Rozpatrzono silnik 6 biegunowy o mocy 6,3 kW, przystosowany do rozruchu bezpośredniego i przeznaczony do napędu pompy wody. Projektując silnik przyjęto, że rdzeń pakietu stojana jest taki sam jak w seryjnie produkowanym 6 biegunowym trójfazowym silniku indukcyjnym klatkowym. Magnesy w obszarze podziałki biegunowej wirnika rozmieszczono w kształcie litery U. Celem pracy było zbadanie wpływu kształtu i niesymetrycznego rozmieszczenia prętów uzwojenia klatkowego na wybrane parametry rozruchowe silnika. W badaniach posłużono się polowo-obwodowym modelem symulacyjnym maszyny opracowanym w środowisku Maxwell i oprogramowaniem własnym. Przedstawiono wybrane rezultaty badań symulacyjnych oraz wynikające z nich wnioski. Uzyskane wyniki wykorzystano w procesie projektowania silnika prototypowego.

Abstract: In this paper, the influence of asymmetry of the magnetic circuit of the rotor on the starting properties of the line start permanent magnet synchronous motor (LSPMSM) has been studied. The 6-pole, three phase, 6 kW motor, intended to a line start and designed to drive a water pump has been considered. In design process it has been assumed that the core of the stator package is the same as in a produced series of 6-pole three-phase squirrel cage induction motor. The permanent magnets arranged in „U” shape per pole have been used. The aim of this study was to investigate the effects of the shape and asymmetrical distribution of winding cage bars on selected starting parameters of the motor. Computer simulations have been performed using field-circuit model of the motor the Maxwell software. Selected results and conclusions have been presented. The obtained results were used in the design of a prototype.

Słowa kluczowe: 6 biegunowy silnik synchroniczny magnetoelektryczny, niesymetria obwodu magnetycznego wirnika, rozruch

Keywords: 6-pole permanent magnet synchronous motor, asymmetry of rotor magnetic circuit, start-up

1. Wstęp

W napędach elektrycznych o nieregulowanej prędkości obrotowej bardzo często stosuje się silniki indukcyjne klatkowe. Spowodowane jest to niewielkimi kosztami eksploatacji, dużą niezawodnością, prostą konstrukcją i niską ceną tych silników. Maszyny indukcyjne charakteryzują się jednak mniejszą sprawnością i współczynnikiem mocy niż silniki synchroniczne [1]. Z tego względu od wielu lat prowadzone są intensywne prace badawcze nad zastosowaniem w tego typu napędach silników magnetoelektrycznych synchronicznych przystosowanych do rozruchu bezpośredniego. Rozruch taki jest realizowany poprzez załączenie napięcia sieci na uzwo-

jenia silnika. W celu minimalizacji kosztów produkcji silników synchronicznych magnetoelektrycznych o rozruchu bezpośrednim najczęściej wykorzystuje się rdzenie stojanów silników indukcyjnych. Wymiana wirnika w silniku indukcyjnym na wirnik z magnesami trwałymi, poprzez zmniejszenie dostarczanej do niego energii niezbędnej do wzbudzenia pola, prowadzi do zwiększenia jego sprawności [2]. Jednakże w celu maksymalnego wykorzystania obwodu elektromagnetycznego takiego silnika trzeba dobrać strukturę obwodu magnetycznego wirnika oraz przeprowadzić obliczenia projektowo- optymalizacyjne [2, 11].

Prace nad tego typu silnikami są aktualne i prowadzone od wielu lat w wielu ośrodkach

naukowych [6, 7, 8, 9], w tym przez autorów [2, 3, 4, 5, 11, 12].

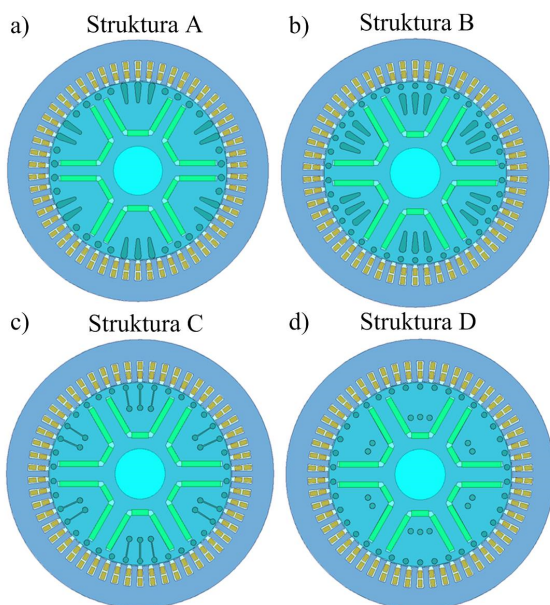
W artykule przedstawiono wyniki analizy wpływu niesymetrii obwodu magnetycznego wirnika 6 biegunowego silnika synchronicznego magnetoelektrycznego o rozruchu bezpośrednim na jego parametry funkcjonalne.

Rozpatrzono 4 struktury wirnika z magnesami rozmieszczonymi w kształcie litery U. Badano wpływ niesymetrii wirnika na wartość początkową prądu oraz momentu rozruchowego. Wielkości te obliczono w warunkach stanu ustalonego przy zahamowanym wirniku. Analizowano również wpływ położenia wirnika względem stojana na wyznaczany prąd i moment rozruchowy. Porównano uzyskane dla rozpatrywanych struktur zależności momentu elektromagnetycznego od prędkości obrotowej.

Prezentowane badania są kontynuacją prac prowadzonych w ramach realizowanego w latach 2010-2013 projektu *Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa*.

2. Struktury badanych silników

Struktury rozpatrywanych silników synchronicznych magnetoelektrycznych przystosowanych do rozruchu bezpośredniego pokazano na rys. 1.



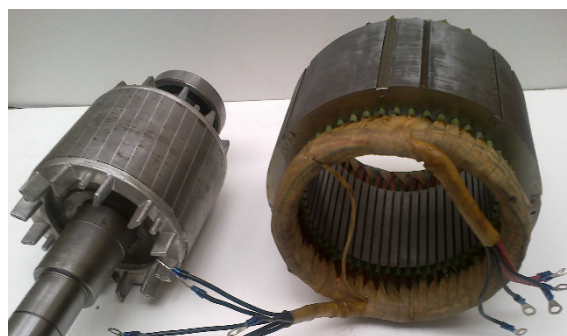
Rys. 1. Struktury rozpatrywanych silników synchronicznych magnetoelektrycznych przystosowanych do rozruchu bezpośredniego

Różnią się one kształtem i rozmieszczeniem prętów uzwojenia klatkowego. Pręty te są niesymetrycznie rozłożone względem magnesów trwałych. Do zaprojektowania tych maszyn wykorzystano program Maxwell sprzężony z oprogramowaniem własnym przeznaczonym do wyznaczania parametrów funkcjonalnych i optymalizacji silników synchronicznych magnetoelektrycznych [10].

W procesie projektowania przyjęto, że w stojanie zostanie wykorzystany rdzeń trójfazowego, sześciobiegunowego silnika indukcyjnego klatkowego typu TMPB 6,3/6 o mocy 6,3 kW (rys. 2), przeznaczonego do napędu pompy wody. Silnik ten jest przystosowany do zasilania z sieci o częstotliwości 60 Hz przy napięciu: a) 240 V i połączeniu uzwojeń stojana w podwójny trójkąt, b) 480 V i połączeniu uzwojeń

uzwojeń w trójkąt pojedynczy. W rdzeniu stojana silnika indukcyjnego znajdują się 54 żłobki półzamknięte, a w wirniku 38 żłobków skoszonych (rys. 2). Średnica zewnętrzna rdzenia stojana wynosi 240 mm, średnica zewnętrzna wirnika 164,3 mm, a długość pakietów jest równa 115 mm.

Przy projektowaniu silników synchronicznych przystosowanych do rozruchu bezpośredniego o strukturach jak na rys. 1 przyjęto, że połączone w trójkąt uzwojenia fazowe stojana są zasilane z sieci o napięciu 400 V i częstotliwości 50 Hz.

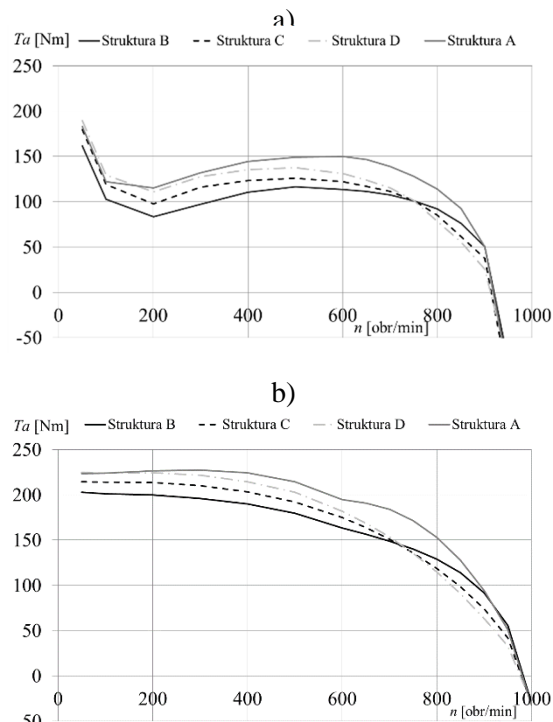


Rys. 2. Stojan i wirnik silnika indukcyjnego

W artykule ograniczono się do analizy wpływu niesymetrii obwodu magnetycznego zastosowanych wirników na parametry rozruchowe silników. Analizę przeprowadzono z uwzględnieniem i pominięciem magnesów trwałych w wirniku.

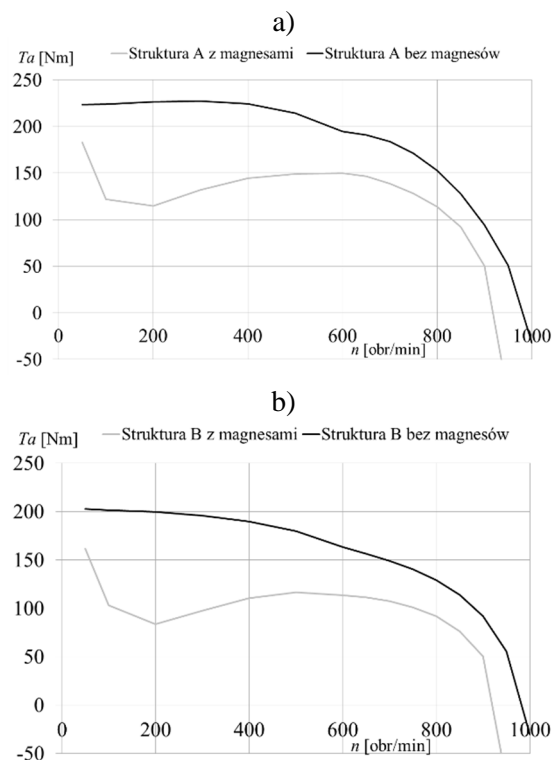
3. Rezultaty badań

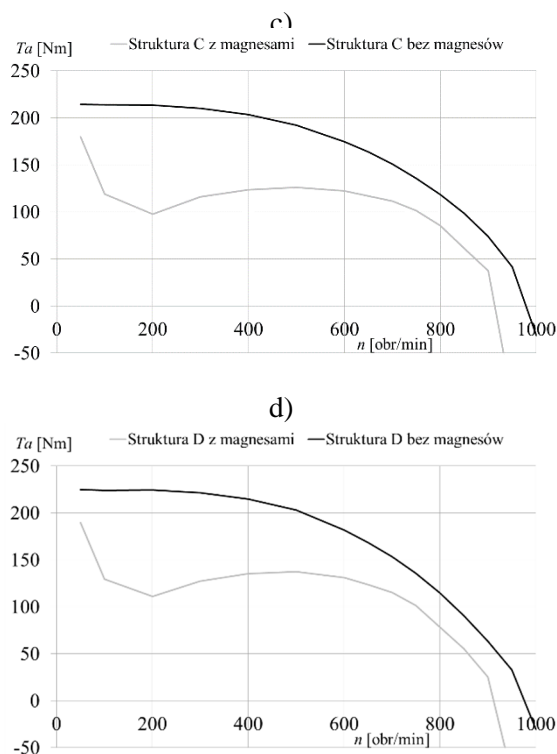
Uzyskane w wyniku obliczeń zależności momentu elektromagnetycznego od prędkości obrotowej dla silników o konstrukcjach pokazanych na rys. 1 zestawiono na rys. 3. W szczególności na rys. 3a pokazano charakterystyki wyznaczone przy założeniu, że w wycięciach w rdzeniu wirnika umieszczone są magnesy trwałe, a na rys. 3b rezultaty obliczeń otrzymane po wyjęciu magnesów. W celu uzyskania tych charakterystyk, dla zadanych wartości prędkości obrotowej wirnika, wyznaczano przebieg momentu elektromagnetycznego po załączeniu napięcia na uzwojenia silnika. Następnie na podstawie analizy przebiegu momentu, po zaniku stanu nieustalonego związanego z załączeniem napięcia, określano średnią wartość momentu elektromagnetycznego. Wyznaczenie wartości średniej, ze względu na obecność w momencie elektromagnetycznym oprócz momentów asynchronicznych momentów synchronicznych spowodowanych niesymetrią obwodu magnetycznego oraz obecnością magnesów trwałych nastęrcza wiele problemów. Trudno jest bowiem dla tak złożonej struktury i skomplikowanej interakcji momentów składowych określić a priori okres zmian momentu, a więc i przedział czasu, dla którego uśrednia się moment. Ponadto określenie wartości momentu, dla tych prędkości wirowania wirnika, które odpowiadają częstotliwościom pasożytniczych momentów synchronicznych, utrudnia zależność wartości momentu synchronicznego od kąta obciążenia wewnętrznego dla danej harmonicznej rozkładu pola. Metodologię oraz problemy związane z wyznaczaniem wartości średniej momentu elektromagnetycznego przedstawiono w pracy [11]. Pomińnięcie w badaniach symulacyjnych strumienia pochodzącego od magnesów trwałych zmniejsza udział momentów pasożytniczych i umożliwia dokładniejszą analizę momentu asynchronicznego. W pracy [12] wykazano, że wyznaczony przy braku w wirniku magnesów uśredniony moment elektromagnetyczny można wykorzystać dla potrzeb projektowania i estymowania parametrów rozruchowych silnika.



Rys. 3. Moment elektromagnetyczny w funkcji prędkości obrotowej – struktura z magnesami (a), struktura bez magnesów (b)

Dodatkowo, na rysunkach 4a-d porównano dla każdej z rozpatrywanych konstrukcji moment elektromagnetyczny wyznaczony przy uwzględnieniu i przy pominięciu magnesów trwałych.





Rys. 4. Moment elektromagnetyczny w funkcji prędkości obrotowej – struktura A (a), struktura B (b), struktura C (c) i struktura D (d)

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć wpływ momentu hamującego generowanego przez magnesy trwałe na zależność momentu elektromagnetycznego od prędkości. Charakterystyczne „siodło”, tj. obniżenie momentu obserwuje się dla prędkości z przedziału od 100 do 300 obr/min. Zakładając, że proces wpadu w synchronizm, tj. przejście od prędkości pod-synchronicznej do synchronicznej, rozpoczyna się przy prędkości $n=800$ obr/min można stwierdzić, że największą wartość momentu dla tej prędkości uzyskuje się dla struktury A. Moment elektromagnetyczny dla $n=800$ obr/min wynosi odpowiednio: 114 Nm dla struktury A, 92 Nm (struktura B), 85 Nm (struktura C) oraz 78 Nm (struktura D). Parametr $\delta_{\%T}$ określający w procentach względną zmianę momentu elektromagnetycznego w odniesieniu do momentu 114 Nm (konstrukcja A) dla struktur B, C, D przy $n=800$ obr/min zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Względna procentowa zmiana momentu elektromagnetycznego dla $n=800$ obr/min

	Struktura B	Struktura C	Struktura D
$\delta_{\%T}$	19,30%	25,44%	31,58%

W celu porównania wartości początkowych momentu i prądu rozruchowego dla rozpatrywanych silników synchronicznych o rozruchu bezpośrednim w tabeli 2 zestawiono wartości analizowanych parametrów. Prąd i moment rozruchowy wyznaczano przy zahamowanym wirniku.

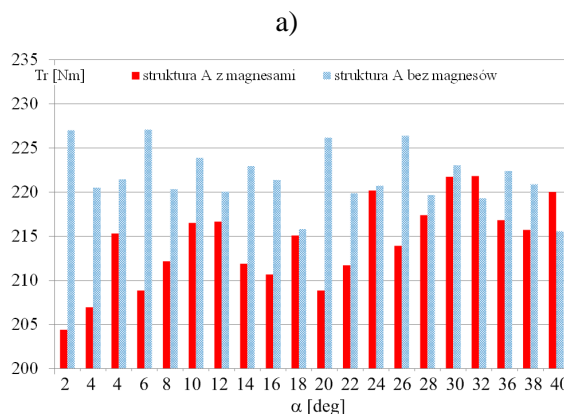
Tabela 2. Moment i prąd rozruchowy analizowanych struktur

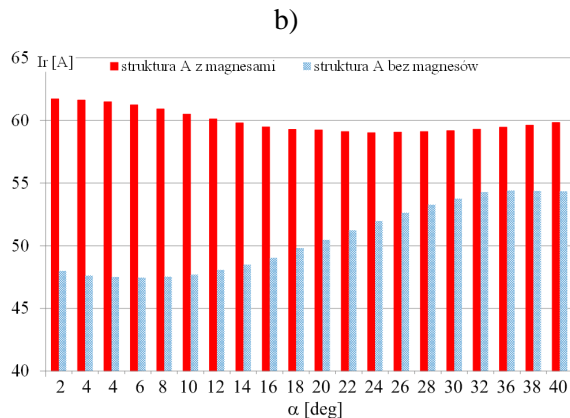
Struktura	z magnesami		bez magnesów	
	T_r	I_r	T_r	I_r
A	214	61,81	216	48,44
B	187	58,53	201	46,88
C	208	58,98	214	46,17
D	218	59,68	224	46,92

Największą wartością momentu początkowego charakteryzuje się struktura D. Wartość ta jest większa od wartości momentu rozruchowego odpowiednio: o 1,83% dla struktury A, 14,22% dla struktury B oraz o 4,58% dla struktury.

Na podstawie analizy zestawionych wyżej wyników obliczeń stwierdzono, że najlepszymi parametrami rozruchowymi cechuje się konstrukcja A (rys.1.a). Z tego względu w dalszych badaniach skupiono się na silniku o strukturze A.

Na rysunku 5a-b porównano obliczone wartości początkowego momentu (rys. 5a) oraz prądu (rys. 5b) rozruchowego w funkcji zmiany położenia wirnika względem stojana. Obliczenia przeprowadzono przy zahamowanym wirniku i zachowaniu tej samej wartości napięcia zasilającego uzwojenie stojana. Położenie wirnika α zmieniano w obszarze podziałki biegunowej stojana co 2 deg. Dla kolejnych położenia wirnika zmienia się wartość momentu i prądu rozruchowego.





Rys. 5. Wartość początkowa momentu (a) i prądu (b) rozruchowego w funkcji zmian położenia wirnika dla silnika z magnesami i z pominięciem magnesów

4. Wnioski

Przeprowadzona analiza wpływu niesymetrii obwodu magnetycznego wirnika silnika magnetoelektrycznego synchronicznego z magnesami trwałymi na przebieg procesu rozruchu pozwoliła na wyselekcjonowanie struktury wirnika charakteryzującej się najlepszymi parametrami rozruchowymi. Zaobserwowano znaczny wpływ początkowego położenia kąтового wirnika, kształtu i rozmieszczenia prętów uzwojenia wirnika na wartości początkowe momentu i prądu rozruchowego. Obliczenie momentu elektromagnetycznego w całym zakresie zmian prędkości pozwoliło oszacować jego wartość przy prędkości wpadu w synchronizm. Widoczny jest wpływ początkowego położenia wirnika na wartość momentu i prądu rozruchowego. Przeprowadzone badania pozwoliły wyselekcjonować struktury6 biegunowego silnika synchronicznego magnetoelektrycznego o rozruchu bezpośrednim charakteryzującej się najlepszymi parametrami rozruchowymi. Ponadto przeprowadzono również analizę wpływu na proces rozruchu momentu oporowego oraz momentu bezwładności obciążenia. Rezultaty badań symulacyjnych wytypowanego silnika dla ustalonego stanu pracy będą prezentowane w kolejnych publikacjach autorów. Aktualnie trwają prace nad budową prototypu rozpatrywanego silnika.

5. Literatura

[1] Zawilak T., Antal L.: *Porównanie silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim - badania ekspery-*

mentalne. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne nr 77, 2007, wyd. BOBRME Komel, s. 277-282.

[2] Łyskawiński W., Idziak P., Barański M., Szelaż W.: *Analysis of power parameters of the squirrel cage motor and LSPMSM motor with U-shaped magnets*, Proceedings of XXIII Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits, July 2-4, 2014, Pilsen, Czech Republic, pp 25-26.

[3] 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.

[4] Barański M., Idziak P., Królikowski W., Łyskawiński W.: *Analiza stanów pracy silników indukcyjnego i synchronicznego magneto-elektrycznego o rozruchu bezpośrednim*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 99, 2013, wyd. BOBRME Komel, s. 227-232.

[5] Idziak P., Barański M., Łyskawiński W., Kowalski K., *Ocena wybranych parametrów energetycznych modelowych silników prądu przemiennego małej mocy o różnych konstrukcjach wirnika*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne nr 100, 2013, wyd. BOBRME Komel, s. 53-57.

[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] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] Ł. Knypiński, L. Nowak, *Two stage optimization of the PMSM with excitation system composed of different material*, Computer Applications in Electrical Engineering, Vol. 11, pp. 148 – 158, 2013.

[11] C. Jędrzycka, R.M. Wojciechowski, A. Demenko, *Finite element analysis of the asynchronous torque in LSPMSM with non-symmetrical squirrel cage winding*, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics (IJAEM), 2014, Vol. 46, No 2, pp. 367–373.

[12] C. Jędrzycka, R.M. Wojciechowski, A. Demenko, *Influence of squirrel cage geometry on the*

synchronisation of the line start permanent magnet synchronous motor, IET Science, Measurement & Technology 2015, Vol. 9, No 2, pp. 197–203.

Autorzy

dr inż. Mariusz Barański, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3A, Mariusz.Baran-ski@put.poznan.pl

dr inż. Cezary Jędrzycka, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3A, cezary.jedr-zycka@put.poznan.pl

mgr inż. Łukasz Knypiński, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3A, lukasz.knypin-ski@put.poznan.pl

dr inż. Dorota Stachowiak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3A, dorota.stacho-wiak@put.poznan.pl

prof. dr hab. inż. Wojciech Szeląg, Politechnika Poznańska, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, 60-965 Poznań, ul. Piotrowo 3A, wojciech.sze-lag@put.poznan.pl