

*jednofazowy silnik indukcyjny, jednofazowy silnik synchroniczny,
magnesy trwałe*

Maciej GWOŹDZIEWICZ*, Paweł ZALAS*,
Mateusz MAKUCH*

DWUKIERUNKOWY, DWUBIEGUNOWY, JEDNOFAZOWY SILNIK SYNCHRONICZNY Z MAGNESAMI TRWAŁYMI – BADANIA EKSPERYMENTALNE

W artykule przedstawiono konstrukcję oraz wyniki badań eksperymentalnych prototypowego dwukierunkowego, dwubiegunowego, jednofazowego silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi. Zbadano wpływ pojemności kondensatora pracy na właściwości eksploatacyjne silnika. W zaprojektowanym i poddanym badaniom modelu silnika uzyskano znaczące ograniczenie momentu zaczepowego oraz pulsacji momentu elektromagnetycznego.

1. WSTĘP

W globalnym bilansie energetycznym szacunkowo około 70% całej energii elektrycznej w przemyśle pobierane jest przez silniki indukcyjne. Głównym celem, do którego dąży się podczas projektowania nowoczesnych konstrukcji silników elektrycznych, jest obniżenie poboru energii elektrycznej. Dokonuje się tego poprzez zmniejszenie strat powstających podczas pracy maszyn elektrycznych. W tym celu stosuje się nowoczesne materiały i rozwiązania, które poprawiają sprawność urządzeń, a co za tym idzie sprawiają, że są one bardziej energooszczędne i spełniają coraz to bardziej rygorystyczne normy i przepisy eksploatacyjne [12].

W 2009 roku zostało przyjęte przez Komisję Europejską Rozporządzenie Nr 640/2009 [4] wdrażające Dyrektywę 2005/32/EC [5] Parlamentu Europejskiego i Rady odnośnie klas efektywności energetycznej IE oraz regulacji ekologicznych dla silników elektrycznych. Wyżej wymienione rozporządzenie wprowadziło wymogi zgodnie z następującym harmonogramem:

* Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: maciej.gwozdziejewicz@pwr.edu.pl, pawel.zalas@pwr.edu.pl

- od dnia 16 czerwca 2011 r. silniki o mocy znamionowej w granicach 0,75–375 kW musiały odpowiadać co najmniej klasie sprawności IE2,
- od dnia 1 stycznia 2015 r. silniki o mocy znamionowej w granicach 7,5–375 kW muszą odpowiadać co najmniej klasie sprawności IE3 lub odpowiadać klasie sprawności IE2 oraz być wyposażone w sterownik bezstopniowy,
- od dnia 1 stycznia 2017 r. wszystkie silniki o mocy znamionowej w granicach 0,75–375 kW muszą odpowiadać co najmniej klasie sprawności IE3 lub odpowiadać klasie sprawności IE2 oraz być wyposażone w sterownik bezstopniowy.

Zmiany dotyczące metod wyznaczania sprawności silników odnoszących się do nowych standardów opisuje międzynarodowa norma IEC 60034-2-1 [15]. Oznakowanie i klasy sprawności opisuje norma IEC 60034-30 [16]. Uściśla ona 3 klasy sprawności IE1 (*Standard Efficiency*), IE2 (*High Efficiency*), IE3 (*Premium Efficiency*) i ponadto zakłada 4. klasę IE4 (*Super Premium Efficiency*) o najwyższym poziomie sprawności. Norma ta obejmuje trójfazowe, jednobiegowe silniki indukcyjne o liczbie par biegunów $2p = 2; 4$ i 6 , które zasilane są z sieci napięciem o wartości do 1 kV i częstotliwości $50; 60$ Hz. Silniki te mają moc znamionową od $0,75$ kW do 375 kW i przeznaczone są do pracy ciągłej S1 lub przerywanej S3 o cyklu pracy powyżej 80% [8, 13, 21, 30]. Nowy zarys normy IEC 60034-30-1 zakłada rozszerzenie zakresu mocy znamionowej od $0,12$ do 1000 kW, zwiększenie liczby par biegunów do $2p = 2; 4; 6$ i 8 oraz objęcie jednobiegowych silników wielofazowych (w tym jednofazowych), indukcyjnych a także synchronicznych z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (z ang. LSPMSM – *Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*). Projekt wyżej wymienionej nowej normy, a dokładniej część 30-1 zakłada, że ujęte silniki są przeznaczone do pracy ciągłej S1 dla ich mocy znamionowej, a także mogą być używane do pracy w temperaturze otoczenia od -20 °C do $+60$ °C i na wysokości do 4000 m n.p.m. [8, 10, 32].

Do tej pory normy nie uwzględniały silników o mocach mniejszych od $7,5$ kW, dlatego aktualnie produkowane silniki jednofazowe nie spełniają wymaganej sprawności według klasy IE3, jak to jest w przypadku silników trójfazowych [8, 10, 12]. Ze względu na to, że wymagania dotyczące poboru energii elektrycznej przez silniki są coraz bardziej zaostrzane, należy się spodziewać, że zapotrzebowanie na nowe energooszczędne technologie będzie wzrastało a unikalne rozwiązania takie jak silniki jednofazowe wzbudzone magnesami trwałymi bez wątpienia będą wprowadzane przez producentów maszyn elektrycznych na rynek w coraz to szerszym zakresie.

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych dwukierunkowego, jednofazowego silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi. Analizowana konstrukcja jest kolejną wersją prototypowego silnika o liczbie biegunów $2p = 2$. Konstrukcja o założonej mocy znamionowej $P_n = 1,1$ kW optymalizowana była w celu minimalizacji pulsacji momentu elektromagnetycznego oraz redukcji momentu zaczepowego podczas pracy w warunkach znamionowych. Zmianom uległa wielkość szczeliny powietrznej oraz zastosowano skos żłobków stojana.

2. BUDOWA PROTOTYPU JEDNOFAZOWEGO SILNIKA LSPMSM

Do budowy prototypu zaprojektowanego silnika wykorzystano konstrukcję mechaniczną oraz magnetowód stojana (rys. 1) jednofazowego silnika indukcyjnego masowej produkcji typu SEh 80-2B o parametrach zestawionych w tabeli 1.



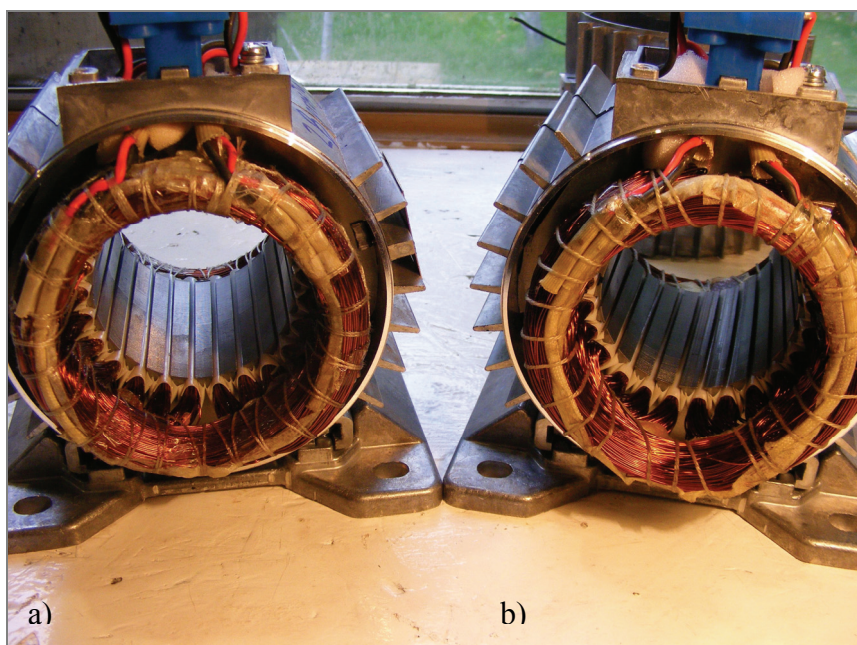
Rys. 1. Prototyp dwubiegunowego, dwukierunkowego, jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

W zaprojektowanym i poddanym badaniom modelu dwubiegunowego, dwukierunkowego silnika LSPMSM zmianę kierunku wirowania uzyskuje się przez przełączenie kondensatora do uzwojenia głównego lub pomocniczego stojana [7]. Silnik taki zasilany jest przewodem 4-żyłowym (2 żyły fazowe, 1 neutralna, 1 ochronna). W badanym silniku prototypowym uzwojenia są wyprowadzone do tabliczki zaciskowej, dlatego zmianę kierunku można dokonać poprzez fizyczną (ręczną) zmianę konfiguracji połączeń uzwojeń silnika przy odłączonym napięciu. Zmianę kierunku wirowania można również uzyskać stosując przełącznik automatyczny lub za pomocą sterujących układów elektronicznych opartych na elementach półprzewodnikowych. W modelu silnika zostały na nowo zaprojektowane i nawinięte uzwojenie główne oraz pomocnicze w postaci drutów miedzianych o odpowiednio dobranych przekrojach (rys. 2). Uzyskane w trakcie pomiarów parametry znamionowe analizowanego modelu silnika z magnesami trwałymi przedstawiono w tabeli 1. Pomiary były wykonywane w układzie z uzwojeniem pomocniczym kondensatorowym oraz dodatkowym równoległe

włączonym kondensatorem rozruchowym (odłączanym po rozruchu). Parametry znamionowe przedstawione w tabeli 1 zostały wyznaczone przy najbardziej korzystnej wartości kondensatora pracy.

Tabela 1. Parametry znamionowe badanego silnika synchronicznego oraz silnika asynchronicznego

Typ silnika		IM	LSPMSM
P_n	W	1100	1100
U_n	V	230	230
I_n	A	7,00	6,50
f_n	Hz	50	50
M_n	N·m	3,78	3,50
n_n	obr/min	2780	3000
η_n	%	72	81
$\cos\varphi$	–	0,97	0,92



Rys. 2. Widok stojana z nawiniętymi uzwojeniami badanego silnika synchronicznego: bez skosu żłobków (a) oraz ze skosem (b)

Rdzeń wirnika badanego jednofazowego silnika LSPMSM składa się z pakietu blach (rys. 3). Wewnątrz rdzenia umieszczone są płytkowe magnesy trwałe w kształ-

cie liter VVV a sposób ich rozmieszczenia pokazano na rysunku 1 oraz 3. Do budowy wirnika użyto magnesów neodymowych N38SH charakteryzujących się indukcją re-manencji $B_r = 1,24$ T oraz natężeniem koercji magnetycznej $H_{cB} = 990$ kA/m. Klatka rozruchowa wirnika odlana jest z aluminium w postaci prętów, zwartych na końcu za pomocą pierścienia zwierającego o odpowiednio dobranym przekroju poprzecznym oraz kształcie umożliwiającym osadzenie magnesów trwałych.



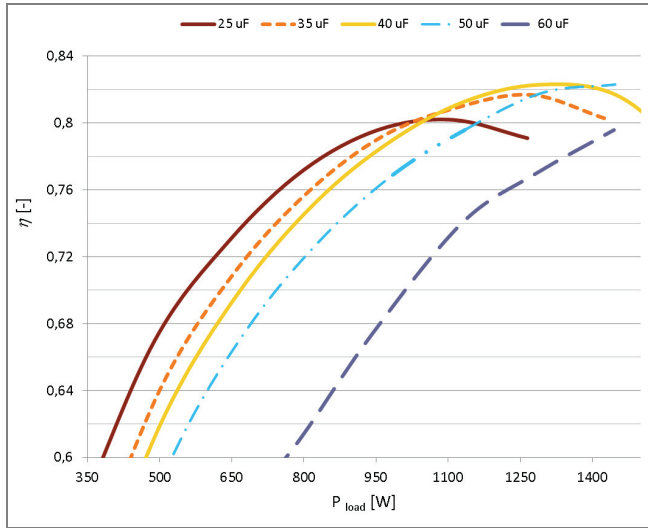
Rys. 3. Rozmieszczenie magnesów trwałych w wirniku badanego silnika synchronicznego

3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

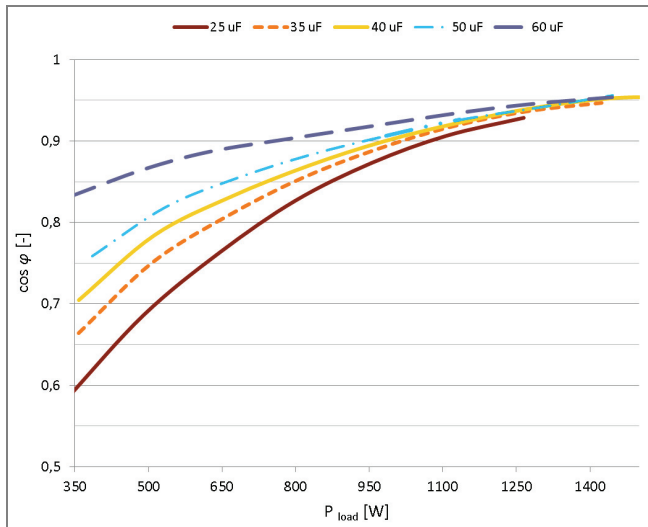
Badania eksperymentalne wykonano na specjalnie przystosowanym do tego stanowisku pomiarowym wyposażonym w układ napędowy, w którym regulację wartości momentu obciążenia silnika zapewniał serwomotor firmy LENZE, typu MCS14P32. Podczas realizacji badań dwukierunkowego, jednofazowego silnika z magnesami trwałymi o prędkości synchronicznej 3000 obr/min, został określony wpływ pojemności kondensatora pracy na przebiegi charakterystyk sprawności, współczynnika mocy i prądu w funkcji obciążenia silnika. Przebiegi wyznaczonych eksperymentalnie charakterystyk w funkcji zmiany obciążenia dla różnych wartości kondensatora pracy przedstawiono na rysunkach 4–7.

Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że zwiększanie pojemności kondensatora pracy powoduje przesuwanie się maksimum na wykresie sprawności w kierunku większych mocy obciążenia (rys. 4). Przy zwiększaniu pojemności kondensatora pracy zwiększa się hałas silnika w stanie jałowym. Spowodowane to jest składową

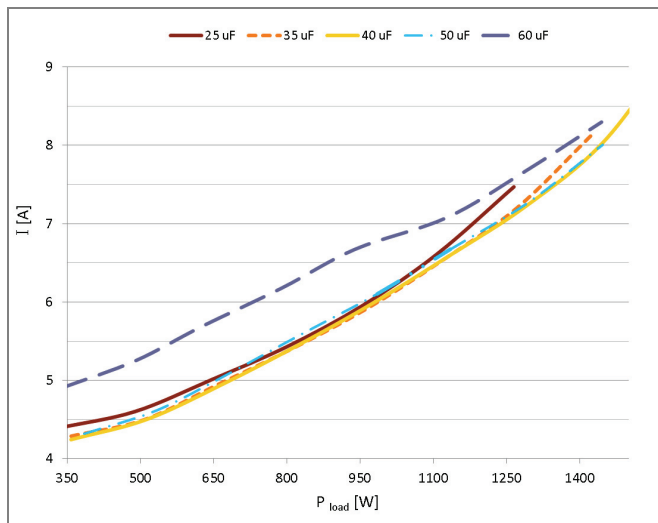
przeciwną wirującego pola magnetycznego. Pojemność kondensatora pracy o wartości $C_p = 40 \mu\text{F}$ przyjęto jako znamionową, ponieważ wówczas hałas oraz drgania generowane przez silnik w stanie jałowym były najmniejsze a jednocześnie miał on dobre właściwości eksploatacyjne.



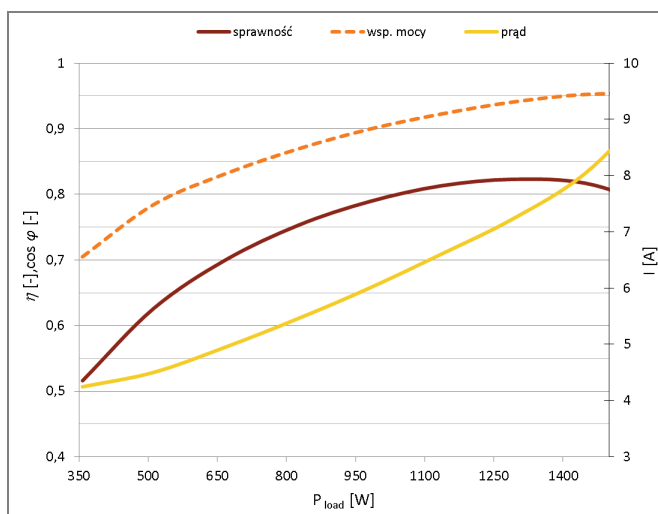
Rys. 4. Wpływ wartości pojemności kondensatora pracy na kształt przebiegu charakterystyki sprawności w funkcji obciążenia badanego jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi



Rys. 5. Wpływ wartości pojemności kondensatora pracy na zmianę współczynnika mocy w funkcji obciążenia badanego jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi



Rys. 6. Wpływ wartości pojemności kondensatora pracy na wartość prądu pobieranego z sieci podczas pracy w funkcji obciążenia badanego silnika

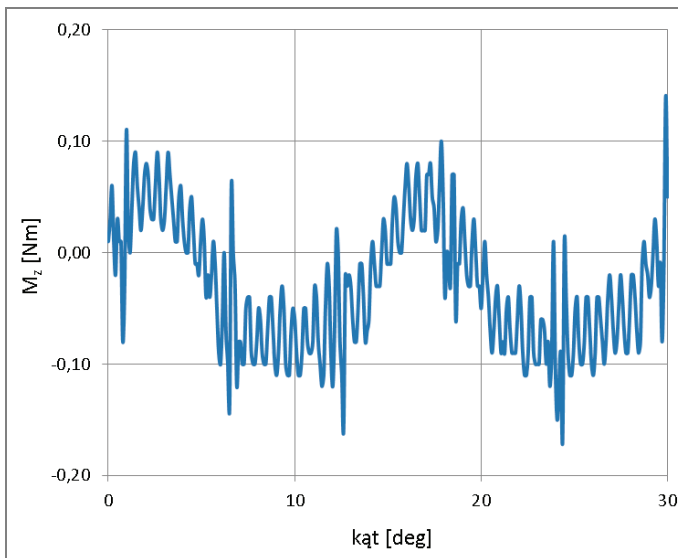


Rys. 7. Charakterystyka elektromechaniczna badanego silnika jednofazowego dla pojemności kondensatora pracy $C_p = 40 \mu\text{F}$

Maksimum sprawności badanego silnika $\eta_{\max} = 82,3\%$ występuje (rys. 4) dla obciążenia silnika mocą $P_{load} = 1,3$ kW. Wraz ze wzrostem pojemności kondensatora pracy C_p wartość współczynnika mocy rośnie (rys. 5) oraz zmniejsza się stromość charakterystyki dla coraz to większych wartości mocy P_{load} . Dla wartości $C_p = 40 \mu\text{F}$ nie tylko uzyskuje

się najwyższą sprawność (rys. 4), ale również prąd pobierany z sieci przez silnik jest najmniejszy (rys. 6, 7), przy założonej mocy znamionowej $P_n = 1,1$ kW.

Podczas badań eksperymentalnych został wyznaczony moment zaczepowy będący składową pulsacji momentu elektromagnetycznego. Duże pulsacje momentu mogą negatywnie wpływać na pracę układu napędowego poprzez generowanie drgań oraz powodować głośną pracę silnika [3]. Znamionowy moment badanego silnika przy założonej wartości mocy znamionowej $P_n = 1,1$ kW wynosi $M_n = 3,5$ Nm. Pulsacje momentu zaczepowego, wyznaczone eksperymentalnie, występują w zakresie $\pm 0,15$ Nm (rys. 8), co stanowi 4,28% znamionowego momentu elektromagnetycznego. Jest to stosunkowo niewielka wartość. Małe pulsacje momentu zaczepowego w badanym silniku zostały uzyskane odpowiednim doбором, pod względem geometrycznym, kształtu rozmieszczenia magnesów trwałych. Na moment zaczepowy ma również znaczący wpływ zastosowanie skosu żłobków stojana (rys. 2).



Rys. 8. Zależność momentu zaczepowego M_z od kąta położenia wirnika badanego jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi

4. WNIOSKI

Zaprojektowany dwukierunkowy, dwubiegowy, jednofazowy silnik wzbudzany magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim posiada dobre właściwości eksploatacyjne w porównaniu z odpowiadającym mu silnikiem indukcyjnym. Zastosowanie magnesów trwałych pozwoliło na uzyskanie większej sprawności oraz mniejszego

poboru prądu z jednofazowej sieci zasilającej. Odpowiednio dobrana pojemność kondensatora pracy zapewnia uzyskanie dobrych właściwości eksploatacyjnych minimalizując drgania oraz hałas generowany podczas pracy maszyny. Poprzez odpowiednio dobrany kształt rozmieszczenia magnesów trwałych wewnątrz pakietowanego rdzenia wirnika oraz zastosowanie skosu żłobków stojana znacząco zredukowano pulsacje momentu silnika i ograniczono wartość momentu zaczepowego. Uzyskane wyniki badań eksperymentalnych zachęcają do dalszych prac nad konstrukcją badanego silnika, ukierunkowanych na poprawę jego parametrów.

LITERATURA

- [1] CIURYS M., DUDZIKOWSKI I., *Analiza wpływu wymiarów i kształtu magnesów trwałych na moment elektromagnetyczny bezszczotkowego silnika prądu stałego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 65, Studia i Materiały, Nr 25, Wrocław 2005.
- [2] Commission Regulation (EC) No. 640/2009 of 22 July 2009 Implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for electric motors, Official Journal of the European Union 23.7.(2009).
- [3] Directive 2005/32/EC of the European Parliament and Council of 6 July 2005 establishing a framework or the setting of ecodesign requirements for energy-using products and amending Council Directive 92/42/EEC and Directives 96/57/EC and 2000/55/EC of the European Parliament and of the Council.
- [4] GWOŹDZIEWICZ M., ZAWILAK J., *Czterobiegunowy jednofazowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim*, Napędy i Sterowanie, nr 4, kwiecień 2014.
- [5] GWOŹDZIEWICZ M., ZAWILAK J., *Jednofazowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o liczbie par biegunów $p = 3$* , Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 3/2014 (103).
- [6] GWOŹDZIEWICZ M., ZAWILAK J., *Porównanie jednofazowego silnika indukcyjnego i jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. Badania eksperymentalne*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 1/2013 (98).
- [7] GWOŹDZIEWICZ M., ZAWILAK J., *Dwukierunkowy jednofazowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 69, Studia i Materiały, Nr 33, Wrocław 2013, 408–412.
- [8] HAŁOŃ R., DUKALSKI P., POPRAWSKI W., *Silnik napędzający oszczędność*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 2/2013 (99).
- [9] IEC 60034-2-1. Edition 1.0 2007-09. International Standard. *Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from test (excluding machines for traction vehicles)*.
- [10] IEC 60034-30. Edition 1.0 2008-10. International Standard. *Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE-code)*.
- [11] LISZKA S., ZIELIŃSKI T., *Energooszczędne silniki elektryczne niskiego napięcia*, rozdział 1, *Silniki niskiego napięcia -wprowadzenie*, Fundacja na rzecz Efektywnego Wykorzystania Energii FEWE, PEMP, Katowice 2009, 4–14.
- [12] ZAPAŚNIK R., *Przełomowe zmiany w podejściu do silników indukcyjnych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 87/2010.
- [13] ZAWILAK T., NIEWIARA M., *Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie wentylatora dużej mocy*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 2/2014 (102).

TWO-DIRECTIONAL TWO-POLE SINGLE PHASE LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR – EXPERIMENTAL RESULTS

The paper presents a construction and results of experimental investigation of a prototype two-directional, two-pole, single-phase line start permanent magnet synchronous motor. Influence of the running capacitor capacitance on the motor running properties was investigated. In designed and tested the motor model achieved a significant reduction of the cogging torque and the electromagnetic torque pulsations.