

# Czterobiegunowy jednofazowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim

Maciej Gwoździewicz, Jan Zawilak

## Wstęp: Norma IEC 60034, część 30

W lipcu 2009 roku Komisja Europejska przyjęła Rozporządzenie nr 640/2009 w sprawie wdrażania Dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady dotyczącej wymogów ekoprojektu dla silników elektrycznych. Oznacza to, że na terenie Unii Europejskiej wprowadzone zostały usankcjonowane prawnie wymogi dotyczące efektywności energetycznej sprzedawanych na rynku unijnym silników indukcyjnych zgodnie z normą Międzynarodowej Komisji Elektrotechniki IEC 60034, część 30, opracowaną w 2008 roku.

Zgodnie z ww. normą silniki elektryczne mają przypisane klasy sprawności. Symbol klasy sprawności składa się z liter IE (*international efficiency*) wraz z cyfrą. W normie rozróżnia się 3 klasy sprawności: IE1, IE2, IE3 i dodatkowo przewiduje się 4 klasę – IE4.

Norma IEC 60034, część 30, obejmuje trójfazowe jednobiegowe silniki indukcyjne, które:

- są zasilane bezpośrednio z sieci napięciem o wartości  $U_n \leq 1000$  V i częstotliwości  $f_n = 50; 60$  Hz;
- mają moc znamionową  $P_n$  od 0,75 kW do 375 kW;
- mają liczbę biegunów  $2p = 2; 4; 6$ ;
- są przeznaczone do pracy ciągłej S1 lub przerywanej S3 o cyklu pracy powyżej 80%.

Zarządzenia normy IEC 60034, część 30, obowiązują od 2011 roku. Wprowadzają one wymóg produkcji silników indukcyjnych o sprawności zgodnej z klasyfikacją IE z następującym harmonogramem:

- od dnia 16 czerwca 2011 roku silniki o mocy znamionowej w granicach 0,75–375 kW musiały odpowiadać co najmniej klasie sprawności IE2;
- od dnia 1 stycznia 2015 roku 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 układ płynnej regulacji prędkości obrotowej;
- od dnia 1 stycznia 2017 roku 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 układ płynnej regulacji prędkości obrotowej.

Nowy projekt normy IEC 60034, część 30-1, rozszerza zakres obowiązującej normy IEC 60034. Projekt normy obejmuje w swoim zakresie jednobiegowe silniki jednofazowe i wielofazowe, indukcyjne oraz synchroniczne z magnesami trwałymi o bezpośrednim rozruchu, bez względu na rodzaj ich montażu,

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań magnetowodów, właściwości eksploatacyjnych i rozruchowych czterobiegunowego jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi, o rozruchu bezpośrednim.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny, silnik jednofazowy, magnesy trwałe, duża sprawność

## 🇬🇧 FOUR-POLE LINE START SINGLE-PHASE PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

**Abstract:** The paper deals with results of investigation of four-pole single-phase line start permanent magnet synchronous motor. Magnetic core investigation, running properties and starting properties of the motor were taken into account.

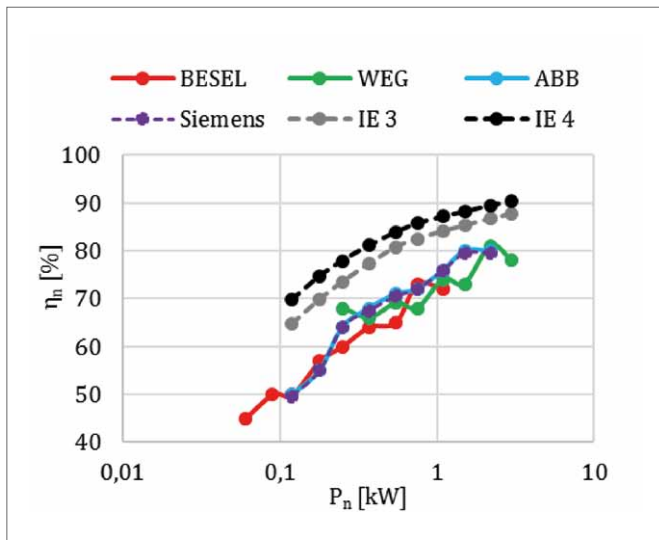
Keywords: synchronous motor, single-phase motor, permanent magnets, high efficiency

w tym motoreduktory. W przygotowaniu tej normy są części 2 i 3, które będą dotyczyć silników prądu przemiennego zasilanych z przemiennika częstotliwości.

Projekt normy IEC 60034, część 30-1, obejmuje w swoim zakresie jednobiegowe silniki prądu przemiennego, które:

- mają moc znamionową  $P_n$  od 120 W do 1000 kW;
- mają napięcie znamionowe  $U_n$  od 50 V do 1 kV;
- mają liczbę biegunów  $2p = 2; 4; 6; 8$ ;
- są przeznaczone do pracy ciągłej S1 dla ich mocy znamionowej  $P_n$ ;
- są przeznaczone do pracy w temperaturze otoczenia od  $-20^\circ\text{C}$  do  $+60^\circ\text{C}$ ;
- są przeznaczone do pracy na wysokości do 4000 m n.p.m.

Obecnie jednobiegowe jednofazowe silniki prądu przemiennego nie są ujęte w obowiązującej normie IEC 60034, część 30. Producenci jednofazowych silników prądu przemiennego nie mają w swojej ofercie wersji wysokosprawnych tego typu silników. Na rysunku 1 pokazano, że jednofazowe silniki indukcyjne produkowane przez 4 różnych producentów silników elektrycznych nie spełniają klasy sprawności IE3. Gdyby od 1 stycznia 2017 roku obowiązywał nowy projekt normy IEC 60034, część 30-1, jednobiegowe jednofazowe silniki indukcyjne o mocy znamionowej  $P_n \geq 120$  W ogólnego przeznaczenia, obecnie produkowane przez producentów maszyn elektrycznych, nie mogłyby



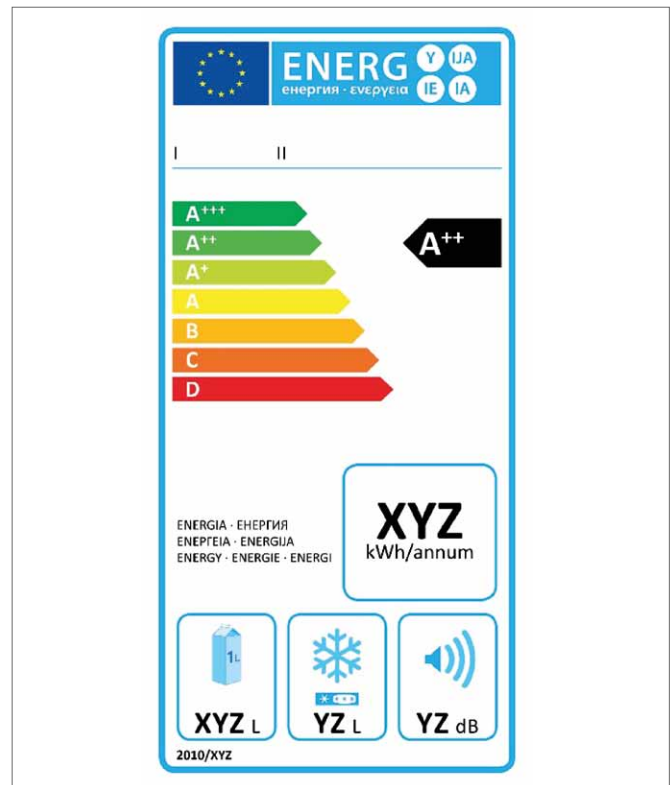
Rys. 1. Porównanie krzywych klas sprawności silników elektrycznych o  $2p=4$  i  $f_n=50$  Hz na podstawie normy IEC 60034-30 i krzywych sprawności znamionowych jednofazowych silników indukcyjnych o  $2p=4$  i  $f_n=50$  Hz różnych producentów maszyn elektrycznych

być dalej produkowane, ponieważ nie spełniałyby klasy sprawności IE3. Jedynie jednofazowe silniki prądu przemiennego na stałe wbudowane w maszynę roboczą mogłyby być produkowane i instalowane w maszynach przez nie napędzanych. Obejście tych wymagań nie spełnia jednak głównych założeń normy IEC 60034, część 30, dotyczącej sprawności silników elektrycznych.

### System etykiet efektywności energetycznej

Oprócz norm i wymogów dot. sprawności samych silników elektrycznych istnieją również programy dotyczące energochłonności całych urządzeń powszechnego użytku. W Unii Europejskiej takim programem jest system etykiet efektywności energetycznej sporządzony w 1992 roku w ramach unijnej dyrektywy ELD 92/75/WE, która od lipca 2011 roku została zastąpiona przez dyrektywę 2010/30/UE. Etykieta efektywności energetycznej zawiera informację o klasie energetycznej i podstawowych parametrach urządzenia, np. zużycia wody, poziomie hałasu. System etykiet efektywności energetycznych dotyczy urządzeń AGD (lodówki, zamrażarki, pralki, suszarki do ubrań, zmywarki, kuchenki), podgrzewaczy wody, urządzeń klimatyzacyjnych, źródeł światła, telewizorów, samochodów, opon samochodowych itp. Etykieta efektywności energetycznej urządzeń elektrycznych zawiera m.in. informację o średnim rocznym zużyciu energii elektrycznej przez dane urządzenie. Przykład etykiety efektywności energetycznej dla lodówek przedstawiono na rysunku 2.

Podstawową informacją etykiety efektywności energetycznej urządzenia elektrycznego jest jego klasa energetyczna. Klasy energetyczne przyporządkowane są skali złożonej z liter od A do G, gdzie klasa A umieszczana na zielonym pasku oznacza urządzenie najbardziej efektywne, a klasa G umieszczana na czerwonym pasku oznacza klasę najmniej efektywną. W grudniu 2010 roku wprowadzono 3 nowe klasy energetyczne A+, A++ oraz A+++ charakteryzujące urządzenia najbardziej efektywne energetycznie.



Rys. 2. Etykieta efektywności energetycznej dla lodówek

reklama

Jednofazowe silniki prądu przemiennego powszechnie występują w urządzeniach chłodniczych (napęd sprężarki czynnika chłodniczego), pralkach (napęd bębna), zmywarkach (napęd pompy wody), urządzeniach klimatyzacyjnych (napęd sprężarki czynnika chłodniczego i wentylatora). Wynika z tego, że sprawność jednofazowych silników prądu przemiennego użytych w ww. urządzeniach ma ogromny wpływ na ich klasę energetyczną. Zastosowanie energooszczędnych silników elektrycznych w urządzeniach AGD, wykorzystujących napędy elektryczne, pośrednio wpływa na ich atrakcyjność na rynku z powodu wyższej klasy energetycznej tych urządzeń, a tym samym ich mniejszej energochłonności.

Ww. programy powiązane bezpośrednio lub pośrednio ze sprawnością jednofazowych silników prądu przemiennego wskazują na zapotrzebowanie na nowe konstrukcje jednofazowych silników synchronicznych, charakteryzujące się dużą sprawnością w porównaniu do obecnych konstrukcji jednofazowych silników indukcyjnych.

Obecne osiągnięcia w budowie modeli fizycznych jednofazowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi, o rozruchu bezpośrednim, oraz wdrożenia trójfazowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi, o rozruchu pośrednim, małej i średniej mocy [8, 11], wskazują na ogromny potencjał w tego typu konstrukcjach, co jeszcze bardziej uzasadnia korzyści z rozwoju konstrukcji jednofazowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi, o rozruchu bezpośrednim.

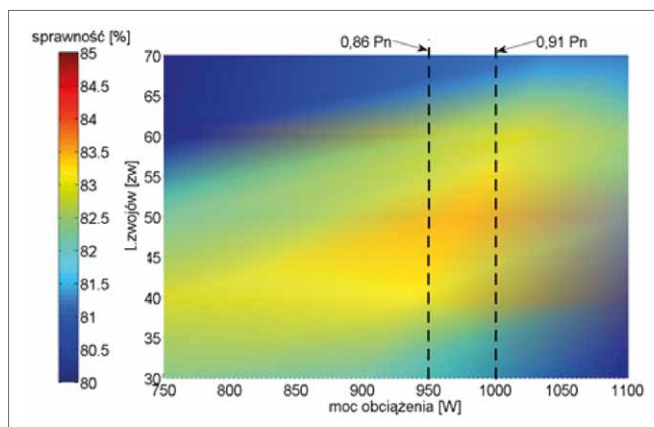
## Model polowo-obwodowy

W programie Maxwell w. 16 zaprojektowano model polowo-obwodowy jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi, o rozruchu bezpośrednim. Zaprojektowany model silnika bazuje na jednofazowym silniku indukcyjnym typu SEh 80-4B o mocy  $P_n = 0,75$  kW zasilanym napięciem  $U_n = 230$  V. Do wzbudzenia wybrano magnesy neodymowe typu N38SH o indukcji remanencji  $B_r = 1,24$  T i natężeniu koercji magnetycznej  $H_{cb} = 990$  kA/m. Metodę postępowania projektowego przedstawiono w pracach [1, 3]. Projektant korzystał również z podejścia przedstawionego w pracach [4, 5, 6, 7, 9].

W pierwszej fazie projektowania dobrano magnetowód silnika. W trakcie projektowania magnetowodu badano wpływ rozmieszczenia magnesów trwałych na SEM indukowaną od magnesów trwałych w uzwojeniu stojana i jej THD. Rozpatrywane kształty magnetowodu silnika przedstawiono na rysunku 6. Wyniki badań magnetowodów silnika pokazano na rysunku 7.

W następnym etapie projektowania dobrano parametry uzwojenia głównego i pomocniczego stojana. W trakcie projektowania badano wpływ liczby zwojów uzwojenia stojana, pojemności kondensatora pracy na właściwości silnika. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rysunku 3.

Na podstawie wyników badań modelu polowo-obwodowego jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi zbudowano model fizyczny tego typu silnika. Wirnik silnika pokazano na rysunku 4. Złożony model fizyczny silnika przedstawiono na rysunku 5. Zbudowany model silnika ma 2 kondensatory: pracy i rozruchowy, oraz wyłącznik odśrodkowy rozłączający kondensator rozruchowy w trakcie rozruchu.



Rys. 3. Wpływ liczby zwojów uzwojenia pomocniczego  $z_{aux}$  na sprawność jednofazowego PMSM



Rys. 4. Wirnik jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi



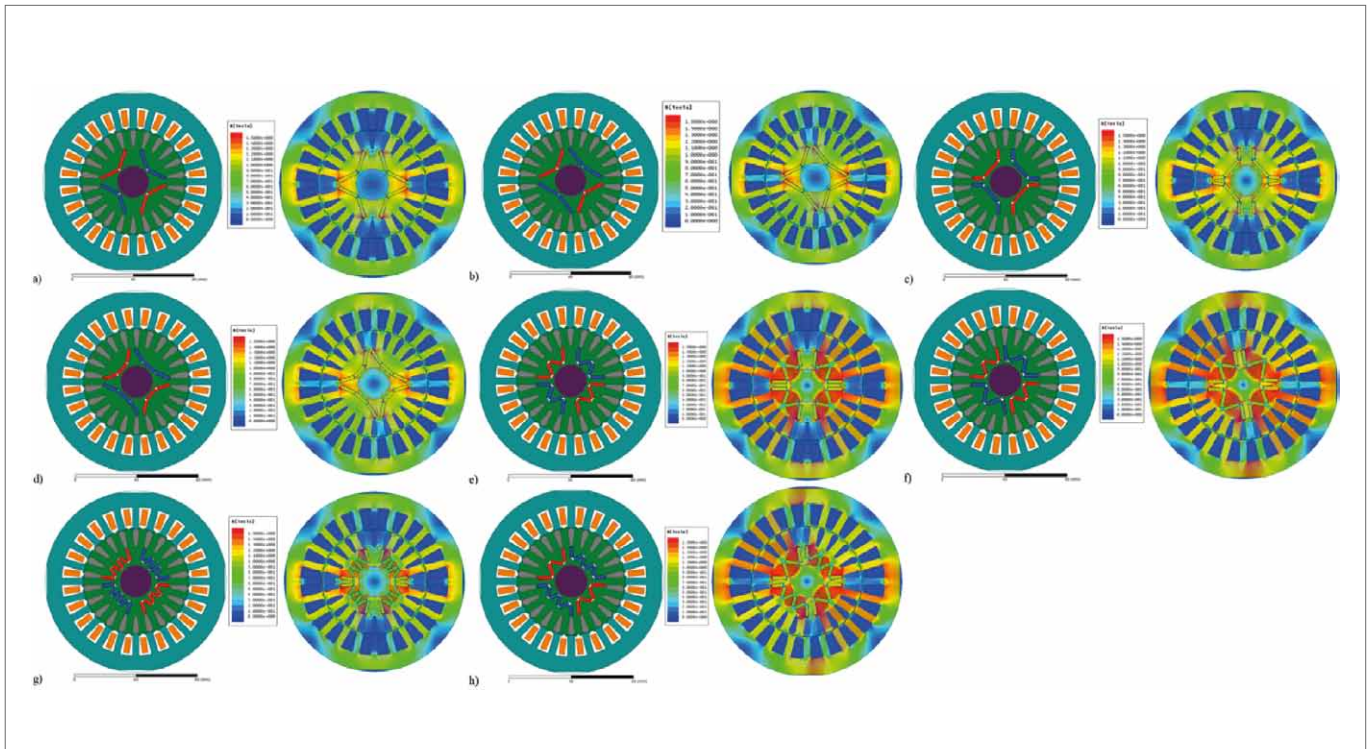
Rys. 5. Jednofazowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim

## Badania eksperymentalne właściwości eksploatacyjnych

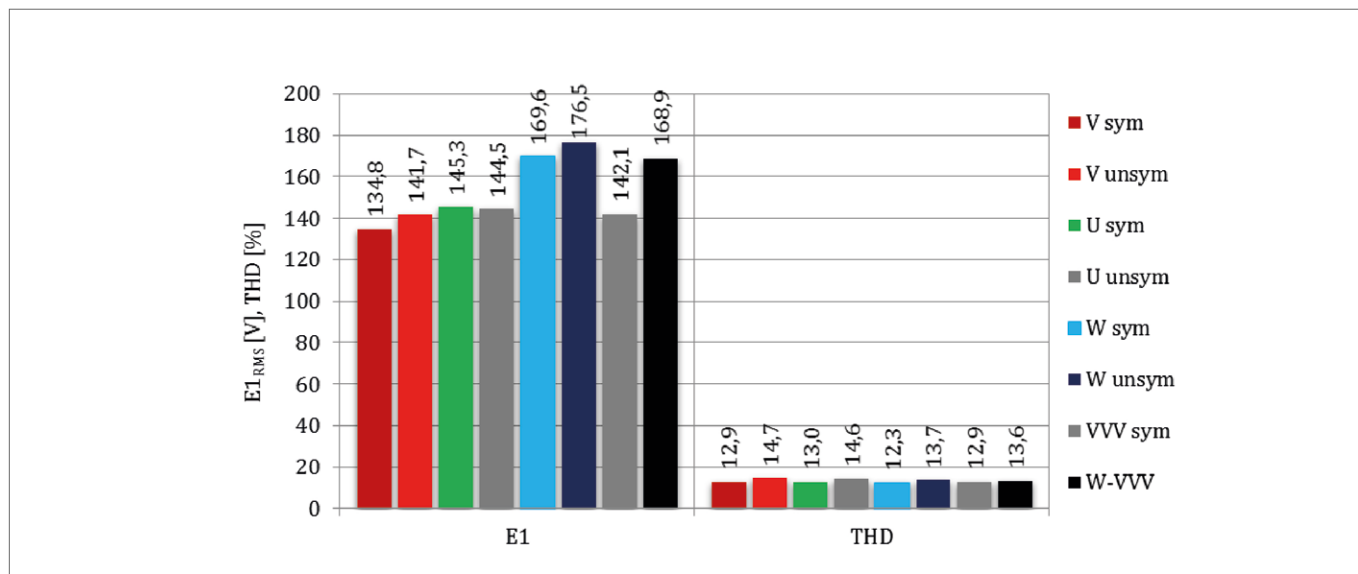
W badaniach eksperymentalnych określono wpływ pojemności kondensatora pracy na właściwości eksploatacyjne silnika. Wyniki badań przedstawiono na rysunkach 8 i 9.

Dla założonej mocy znamionowej badanego silnika  $P_n = 1,1$  kW optymalna wartość pojemności kondensatora pracy wynosi  $C_{run} = 50$   $\mu$ F.

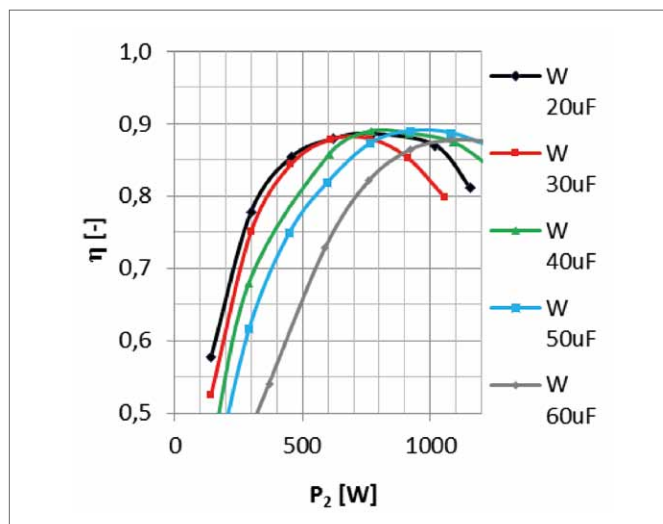




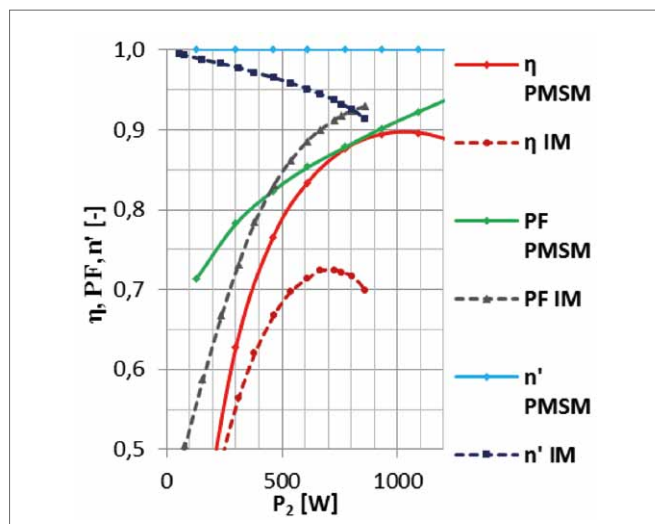
**Rys. 6.** Kształty magnetowodów i rozkłady pola magnetycznego w jednofazowym silniku PMSM z wirnikiem: a) Vsym; b) Vunsym; c) Usym; d) Uunsym; e) Wsym; f) Wunsym; g) VVVsym; h) W-VVV



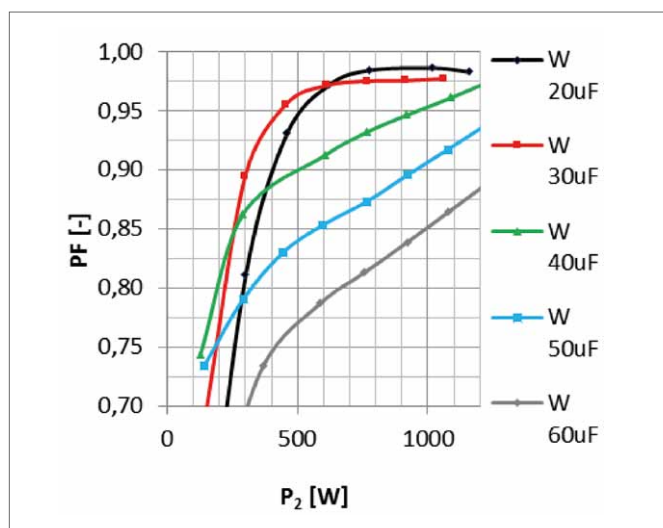
Rys. 7. Wpływ konstrukcji wirnika jednofazowego PMSM Sehm 80-4B na wartość indukowanej siły elektromotorycznej, od magnesów trwałych, i jej współczynnik THD



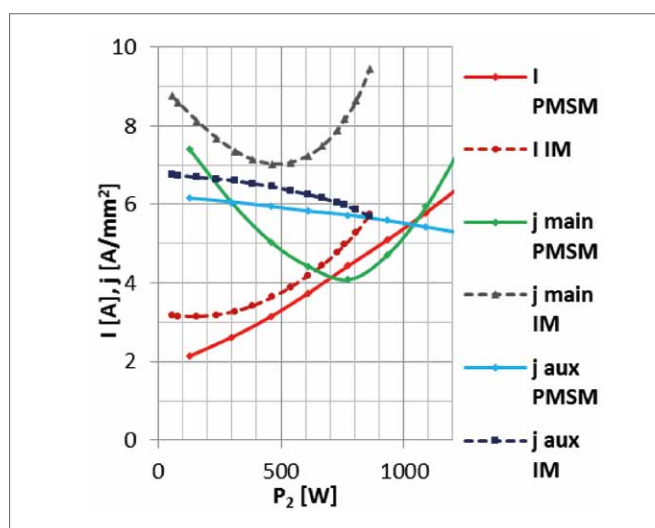
Rys. 8. Wpływ pojemności kondensatora pracy na przebieg sprawności w funkcji obciążenia jednofazowego PMSM



Rys. 10. Porównanie przebiegów prędkości obrotowej, współczynnika mocy, sprawności w funkcji obciążenia silnika PMSM oraz IM

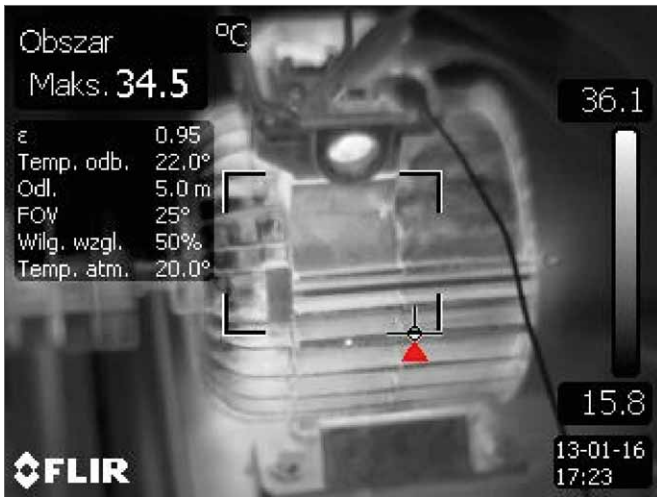


Rys. 9. Wpływ pojemności kondensatora pracy na współczynnik mocy w funkcji obciążenia jednofazowego PMSM



Rys. 11. Porównanie przebiegów prądów stojana, gęstości prądów uzwojenia głównego i gęstości prądów uzwojenia pomocniczego silników PMSM oraz IM

EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA



Rys. 12. Termogram silnika PMSM obciążonego mocą  $P_n = 1,1 \text{ kW}$

Wykonany model silnika z magnesami trwałymi przebadano, a wyniki porównano z odpowiadającym mu jednofazowym silnikiem indukcyjnym (rys. 10, 11, 12 oraz tabela 1).

Na podstawie wykonanych pomiarów można stwierdzić, że jednofazowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (PMSM) ma znacznie lepsze właściwości eksploatacyjne niż odpowiadający mu jednofazowy silnik indukcyjny (IM). Moc znamionowa  $P_n$  jest większa o 47%, sprawność o 17%. Wartości współczynników mocy silników są zbliżone. Prąd pobierany przez silnik PMSM jest większy o 18% niż prąd pobierany przez silnik IM. Uzwojenie silnika PMSM dobrano w taki sposób, że gęstości prądów w uzwojeniu fazy głównej i pomocniczej są mniejsze niż w silniku IM. Z tego powodu temperatury silnika PMSM są znacznie niższe niż w silniku IM. Przeciążalność obu silników jest porównywalna i to ona stanowi główne ograniczenie mocy znamionowej silnika typu PMSM.

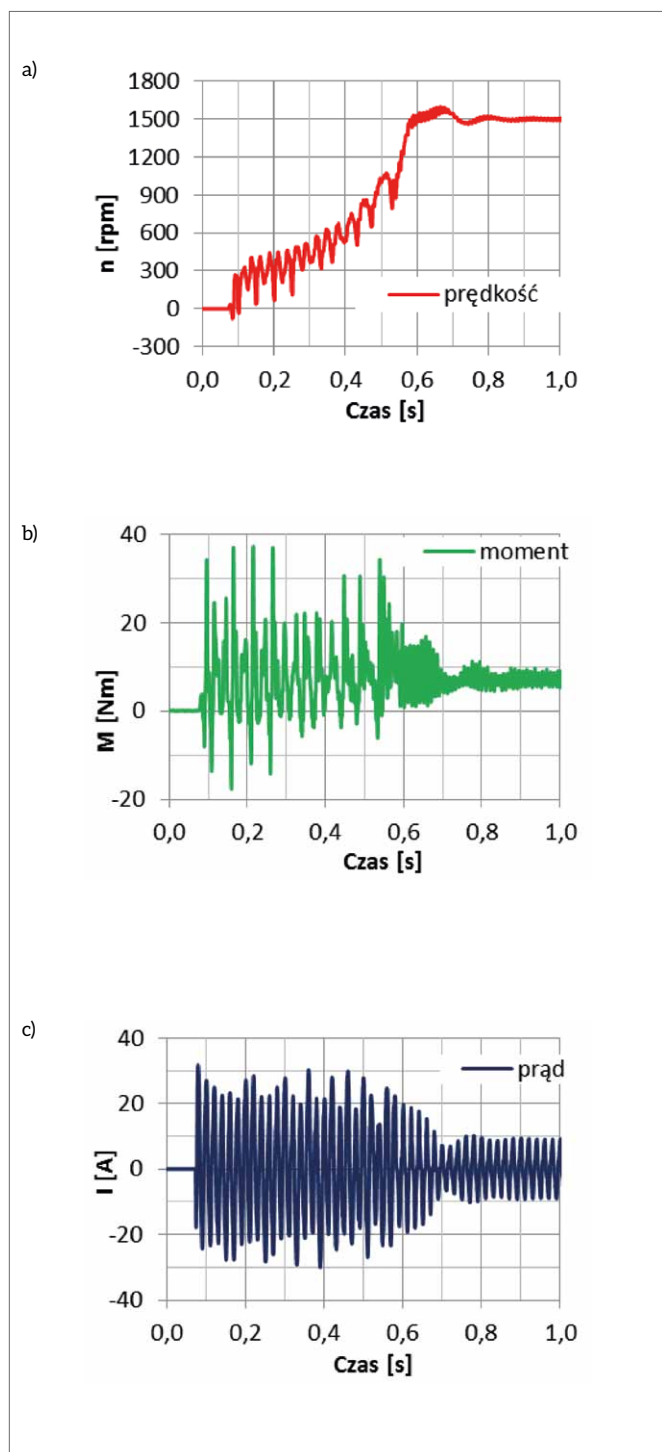
Tabela 1. Porównanie parametrów silnika z magnesami trwałymi oraz indukcyjnego

Wielkość	Jednostka	IM	PMSP
P	W	750	1100
n	obr/min	1400 var	1500 const
$\eta$	%	72,5	89,5
PF	-	0,915	0,920
I	A	4,9	5,8
$j_{\text{main}}$	A/mm <sup>2</sup>	8,1	6,0
$j_{\text{aux}}$	A/mm <sup>2</sup>	6,2	5,4
$\Delta T_{\text{obudowa}}$	K	45,3	20,3
$\Delta T_{\text{uzwojenie}}$	K	51,5	26,3
$M_{\text{max}}/M_n$	-	1,34	1,37

### Badania eksperymentalne właściwości rozruchowych silników

Badania symulacyjne silnika PMSM wykazały, że do rozruchu tego typu silnika niezbędny jest kondensator rozruchowy o pojemności znacznie większej od pojemności kondensatora pracy. Jest to główną wadą silnika PMSM w porównaniu do silnika IM. Przed badaniami eksperymentalnymi założono, że kondensator rozruchowy należy wyłączyć po synchronizacji np. przełącznikiem czasowym. W trakcie badań eksperymentalnych silnika z wyłącznikiem odśrodkowym okazało się, że wyłącznik odśrodkowy odłączający kondensator rozruchowy w trakcie rozruchu jest wystarczający, ponieważ silnik po wyłączeniu kondensatora rozruchowego synchronizuje się.

Przykładowy rozruch silnika PMSM z kondensatorem pracy  $C_{\text{run}} = 50 \mu\text{F}$  oraz kondensatorem rozruchowym  $C_{\text{start}} = 100 \mu\text{F}$  wyłączanym przez wyłącznik odśrodkowy pokazano na rysunku 13.



Rys. 13. Przebieg: a) prędkości obrotowej; b) momentu; c) prądu w czasie rozruchu silnika SPLSPMSM obciążonego momentem znamionowym

## Wnioski

Możliwe jest zbudowanie jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim. Silnik tego typu ma znacznie lepsze właściwości eksploatacyjne niż odpowiadający mu jednofazowy silnik indukcyjny.

W tym samym kadłubie silnik typu PMSM w porównaniu do silnika IM ma znacznie większą moc i sprawność oraz znacznie mniejsze przyrosty temperatur.

Silnik typu PMSM w porównaniu do silnika typu IM charakteryzuje się gorszymi właściwościami rozruchowymi – wyma-

ga dodatkowego kondensatora rozruchowego, o pojemności znacznie większej od pojemności kondensatora pracy, wraz z wyłącznikiem.

## Literatura

- [1] GWOŹDZIEWICZ M., ZAWILAK J.: *Influence of the permanent magnets arrangement on the single-phase line start permanent magnet synchronous motor performances*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, 2012.
- [2] GWOŹDZIEWICZ M., ZAWILAK J.: *Influence of the rotor construction on the single-phase line start permanent magnet synchronous motor performances*. „Przegląd Elektrotechniczny” 10/2011.
- [3] GWOŹDZIEWICZ M., ZAWILAK J.: *Jednofazowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim. Konstrukcje magnetowodu*. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne”, 95/2012.
- [4] KURIHARA K., KUBOTA T., NITAWAKI D.: *Rotor Design for High Starting Performance of a Self-Starting Single-Phase Permanent-Magnet Motor*. „Przegląd Elektrotechniczny” 7b/2012.
- [5] KURIHARA K., WAKUI G., KUBOTA T.: *Steady-state performance analysis of permanent magnet synchronous motors including space harmonics*. IEEE Transactions on Magnetics Vol. 30, no 3, 1994.
- [6] LIANG F., LEE B.H., JUNG-PYO H., HYUK N.: *Estimation of Magnet Reduction in Single-Phase Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor*, Industry Applications Society Annual Meeting, 2009. IAS 2009. IEEE.
- [7] LIN D., ZHOU P., LAMBERT N.: *Starting Winding Optimization in Single-Phase*. Electrical Machines (ICEM), XIX International Conference, 2010.
- [8] LU Q., HUANG X., YE Y., FANG Y.: *Experiment and analysis of high power line-start PM motor*. „Przegląd Elektrotechniczny” 2/2012.
- [9] OKA M., KAWANO M., SHIMADA K., KAI T., ENOKIZONO M.: *Evaluation of the Magnetic Properties of the Rotating Machines for the Building Factor Clarification*. „Przegląd Elektrotechniczny” 9b/2011.
- [10] POPESCU M., MILLER T.J.E., MCGILP M.I.: *Torque behavior of 1-phase permanent magnet AC motor*, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Volume: 21, 2006.
- [11] ZAWILAK J., ZAWILAK T.: *Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności*. „Przegląd Elektrotechniczny” 1/2014.

mgr inż. Maciej Gwoździewicz –  
e-mail: maciej.gwozdziwicz@pwr.wroc.pl;  
prof. Jan Zawilak – e-mail: jan.zawilak@pwr.wroc.pl,  
Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej

artykuł recenzowany