

*jednofazowy silnik indukcyjny, jednofazowy silnik synchroniczny,
magnesy trwałe, metoda elementów skończonych*

Maciej GWOŹDZIEWICZ*
Jan ZAWILAK*

JEDNOFAZOWY SILNIK SYNCHRONICZNY Z MAGNESAMI TRWAŁYMI. KONSTRUKCJA I PARAMETRY

W artykule przedstawiono konstrukcje jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim. W programie Maxwell wersja 14 zostały zbudowane modele połowo-obwodowe jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi bazujące na konstrukcji jednofazowego silnika indukcyjnego masowej produkcji. Na podstawie otrzymanych wyników symulacyjnych wyznaczono charakterystyki obciążenia.

1. WSTĘP

Jednofazowe silniki indukcyjne są powszechnie używane w sprzętach gospodarstwa domowego oraz w przemysłowych urządzeniach małej mocy, gdzie dostęp do zasilania trójfazowego jest ograniczony. Moc znamionowa tego typu silników jest ograniczona przez prąd znamionowy gniazda jednofazowego 230 V, którego prąd znamionowy nie przekracza 16 A. Wynika stąd, że moc znamionowa silników jednofazowych nie przekracza 3 kW.

W silnikach indukcyjnych moment elektromagnetyczny powstaje dzięki poślizgowi pomiędzy wirującym polem, magnetycznym a prętami wirnika. Powoduje to straty w miedzi wirnika. Ponadto, do powstania pola magnetycznego jest potrzebny prąd magnesujący, który powoduje dodatkowe straty w miedzi stojana.

W silnikach synchronicznych pole magnetyczne jest wytworzone przez wzbudzenie elektromagnetyczne lub przez magnesy trwałe. Wynika stąd, że cały strumień magnetyczny lub jego większość może być wytworzone wewnątrz maszyny, co znacząco

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wroclaw, e-mail: maciej.gwozdziejwicz@pwr.wroc.pl, jan.zawilak@pwr.wroc.pl

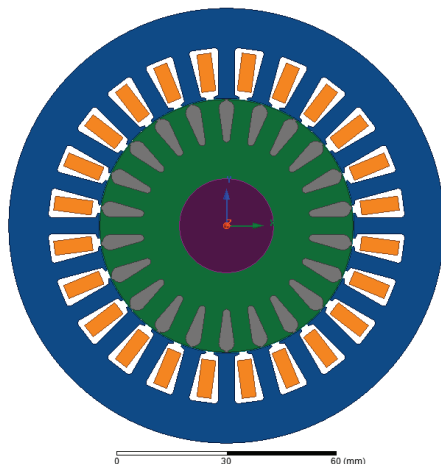
ogranicza wartość mocy biernej pobieranej przez pracujący silnik (a tym samym wartość prądu). W przypadku wzbudzenia od magnesów trwałych w silniku synchronicznym nie występują straty w miedzi wirnika w wyniku poślizgu pomiędzy wirującym polem magnetycznym a prętami wirnika lub w wyniku przepływu prądu stałego przez wzbudzenie elektromagnetyczne. Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi bez klatki wirnika ma jednak poważną wadę – nie posiada naturalnej zdolności rozruchowej, tak jak silnik indukcyjny.

Stojany silnika synchronicznego i indukcyjnego są praktycznie identyczne, więc najprostszym rozwiązaniem do uzyskania zarówno wysokiej sprawności i współczynnika mocy (zalety silników synchronicznych) oraz naturalnej zdolności rozruchowej, prostej budowy i pewności ruchu maszyny (zalety silnika indukcyjnego) w silniku prądu przemiennego jest umieszczenie magnesów trwałych wewnątrz wirnika silnika indukcyjnego zachowując klatkę wirnika [1, 2, 5]. Taki typ silnika nazywa się silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (ang. *Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*).

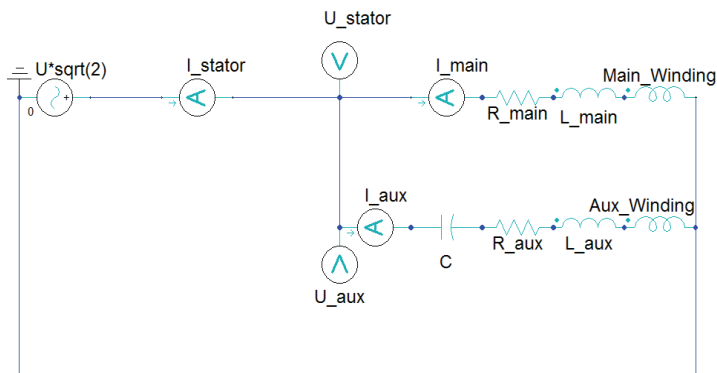
W przypadku silników trójfazowych ta operacja jest relatywnie prosta z powodu wirującego pola magnetycznego kołowego. W przypadku silników jednofazowych wirujące pole magnetyczne w szczelinie powietrznej jest polem eliptycznym, które można rozłożyć na dwie składowe wirującego pola magnetycznego: zgodną (wirującą zgodnie z kierunkiem wirowania wirnika) i przeciwną (wirująca przeciwnie do kierunku wirowania wirnika) [7]. Składowa przeciwna wirującego pola magnetycznego powoduje powstanie hamującego momentu elektromagnetycznego, co powoduje zmniejszenie sprawności i wytworzonego momentu na wale oraz zmiękczenie charakterystyki mechanicznej silnika [6]. To zjawisko powoduje duże problemy w trakcie rozruchu silnika i synchronizacji, ale można je rozwiązać dodatkowym kondensatorem rozruchowym w uzwojeniu pomocniczym silnika jednofazowego. Kondensator rozruchowy podłączony równolegle z kondensatorem pracy polepsza właściwości rozruchowe silnika, ale równocześnie powoduje pogorszenie właściwości eksploatacyjnych silnika, dlatego musi być wyłączony po rozruchu wyłącznikiem odśrodkowym lub czasowym [6, 7].

2. MODEL POLOWO-OBWODOWY

Dwuwymiarowy model polowo-obwodowy jednofazowego silnika indukcyjnego został zbudowany w programie Maxwell wersja 14. Model bazuje na jednofazowym silniku indukcyjnym masowej produkcji typu Seh 80-4B o następujących danych znamionowych: $P_n = 750$ W, $U_n = 230$ V, $I_n = 4,9$ A, $f_n = 50$ Hz, $n_n = 1370$ rpm, $\eta_n = 73\%$, $\cos\varphi = 0,92$. Część polowa modelu silnika jest pokazana na rysunku 1, natomiast część obwodowa jest pokazana na rysunku 2.



Rys. 1. Część polowa modelu
Fig. 1. Field part of the motor model

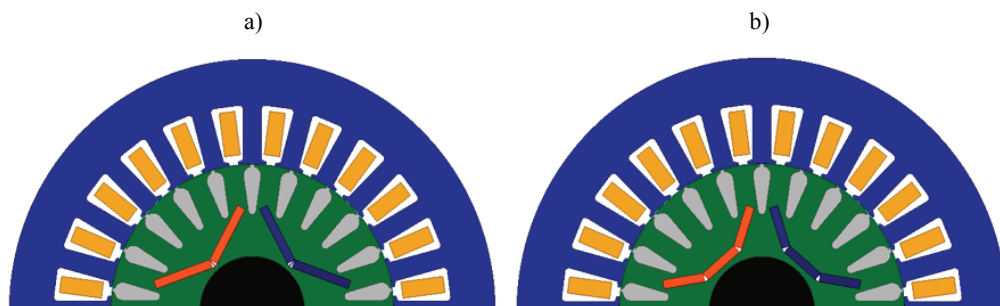


Rys. 2. Część obwodowa modelu
Fig. 2. Circuit part of the motor model

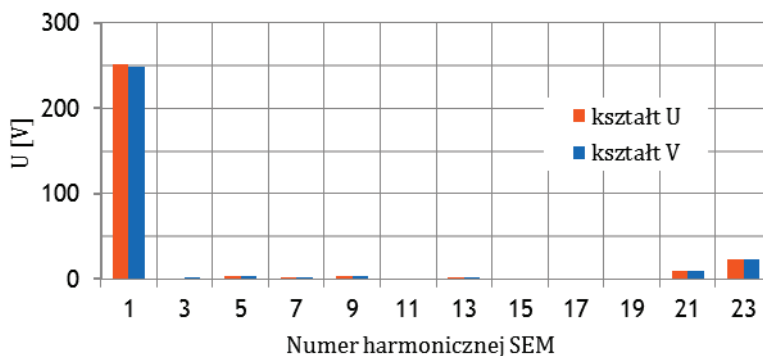
Następnie zostały zbudowane modele jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim. Magnesy neodymowe typu N45H o parametrach $B_r = 1,34$ T i $H_{cb} = 995$ kA/m zostały wybrane do wzbudzenia silnika. Magnesy umieszczono w środku wirnika pod prętami klatki wirnika. Zbadano wpływ kształtu magnesów oraz zmiany parametrów fazy pomocniczej i liczby żłobków wirnika na właściwości eksploatacyjne silnika. Blacha stojana pozostała bez zmian.

3. WPŁYW KSZTAŁTU MAGNESÓW TRWAŁYCH NA SEM

Zbadano wpływ kształtu ułożenia magnesów trwałych na SEM. Zbadano 2 podstawowe kształty – w kształcie litery U i V. Żłobki wirnika pozostały bez zmian. Przekroje modeli są pokazane na rys. 3. Badania wykonano dla stanu jałowego dla pracy prądnicowej silnika. Analiza harmoniczných SEM jest przedstawiona na rys. 4.



Rys. 3. Magnesy trwałe ułożone w kształcie litery: a) V oraz b) U
Fig. 3. Permanent magnets embedded in: a) V and b) U shape

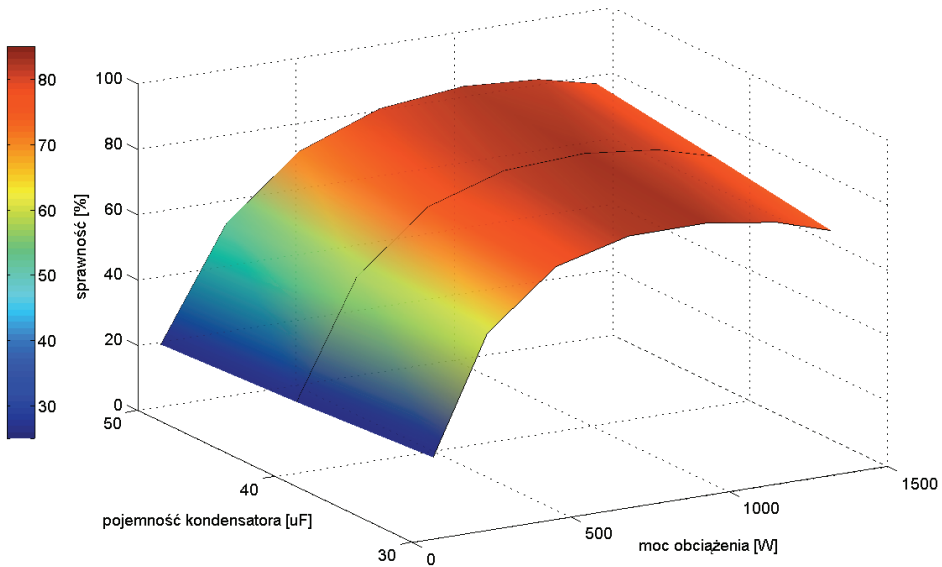


Rys. 4. Analiza harmoniczných SEM
Fig. 4. Harmonic analysis of the EMF

Z opracowanych badań wynika, że wpływ kształtu ułożenia magnesów trwałych na SEM jest pomijalny, dlatego do dalszych badań zostały wzięte pod uwagę tylko magnesy trwałe ułożone w kształcie literki V z powodu prostszej konstrukcji i mniejszej liczby magnesów trwałych użytych do wykonania silnika.

4. WPŁYW PARAMETRÓW FAZY POMOCNICZEJ NA WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNE SILNIKA

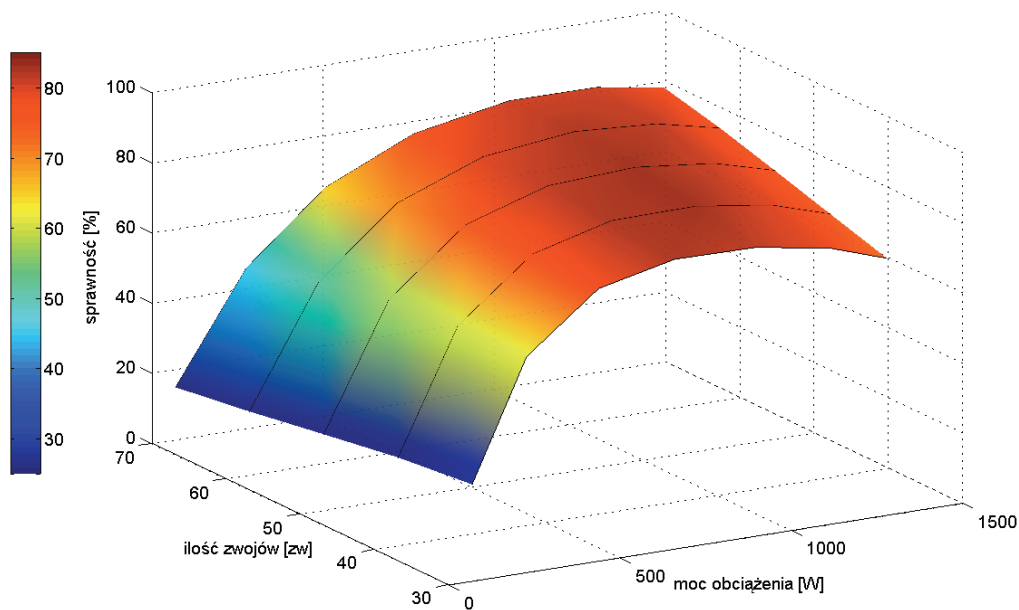
Jednofazowy silnik indukcyjny, na którym bazuje jednofazowy silnik synchroniczny, posiada liczbę zwojów w zezwoju uzwojenia głównego $N_{\text{main}} = 68$ zwojów, liczbę zwojów w zezwoju uzwojenia pomocniczego $N_{\text{aux}} = 94$ zwojów i pojemności kondensatora pracy $C_{\text{pracy}} = 20 \mu\text{F}$. W trakcie badań jednofazowego silnika synchronicznego zmieniano liczbę zwojów w zezwoju uzwojenia pomocniczego N_{aux} i pojemność kondensatora C_{pracy} . Wpływ ww. zmian na przebieg sprawności silnika jest przedstawiony na rys. 5 i rys. 6.



Rys. 5. Zależność przebiegu sprawności od pojemności kondensatora C_{pracy} dla liczby zwojów w zezwoju uzwojenia pomocniczego $N_{\text{aux}} = 50$ zwojów

Fig. 5. Motor Efficiency in load power and run capacitor capacitance domain for $N_{\text{aux}} = 50$ turns

Z opracowanych badań wynika, że liczba zwojów w zezwoju uzwojenia pomocniczego N_{aux} oraz pojemność kondensatora pracy C_{pracy} ma znaczący wpływ na przebieg sprawności jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi. Z publikacji [1, 2, 4] wynika, że silniki synchroniczne z magnesami trwałymi charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami eksploatacyjnymi i równocześnie kiepskimi właściwościami rozruchowymi, przez co ich typowym zastosowaniem są napędy pomp i wentylatorów.



Rys. 6. Zależność przebiegu sprawności od liczby zwojów w zezwoju w uzwojeniu pomocniczym dla kondensatora pracy $C_{pracy} = 40 \mu\text{F}$

Fig. 6. Motor Efficiency in load power and number of auxiliary winding turns domain for $C_{run} = 40 \mu\text{F}$

Silnik do napędu pompy lub wentylatora dobiera się z zapasem 10–15% zgodnie ze wzorem (1)

$$P_{motor} = k \cdot \frac{Q \cdot \Delta p}{\eta}, \quad (1)$$

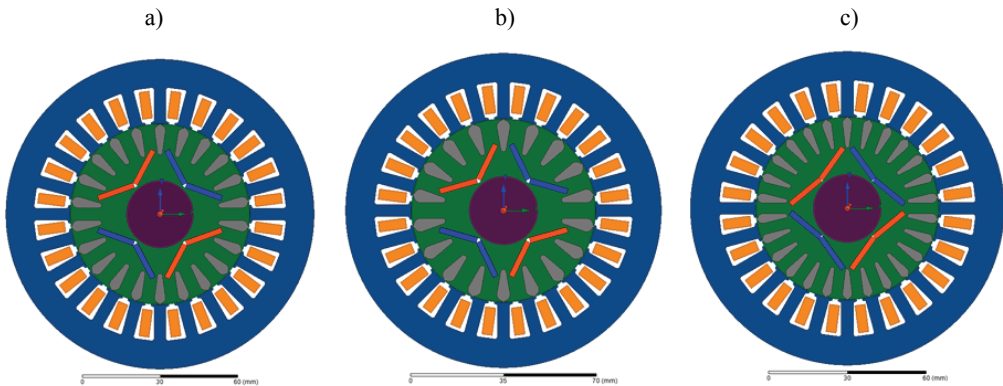
gdzie: P_{motor} – moc znamionowa silnika, k – współczynnik zapasu ($k = 1.1$ – 1.15), Q – wydatek, Δp – spręż, η – sprawność wentylatora/pompy.

Wynika stąd, że silnik napędzający pompę lub wentylator pracuje w zakresie (0,86–0,91) jego mocy znamionowej P_n . Na podstawie ww. założeń przyjęto kryterium doboru parametrów fazy pomocniczej polegające na uzyskaniu maksymalnej sprawności silnika w zakresie (0,86–0,91) P_n . Jako moc znamionową przyjętą wartość mocy $P_n = 1100 \text{ W}$, która stanowi kolejną wartość mocy w typoszeregu silników względem mocy 750 W, ponieważ na podstawie [1, 2, 4] wynika, że silniki synchroniczne z magnesami trwałymi mają większą moc znamionową niż odpowiadające im silniki indukcyjne.

Na podstawie przyjętego kryterium wyznaczono liczbę zwojów w zezwoju uzwojenia pomocnicznego $N_{aux} = 50$ zwojów oraz pojemność kondensatora pracy $C_{pracy} = 40 \mu F$, dla których jednofazowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi osiąga maksimum sprawności. Do dalszych badań wzięto pod uwagę silnik z ww. parametrami fazy pomocniczej.

5. WPŁYW LICZBY ŻŁOBKÓW WIRNIKA NA WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNE SILNIKA

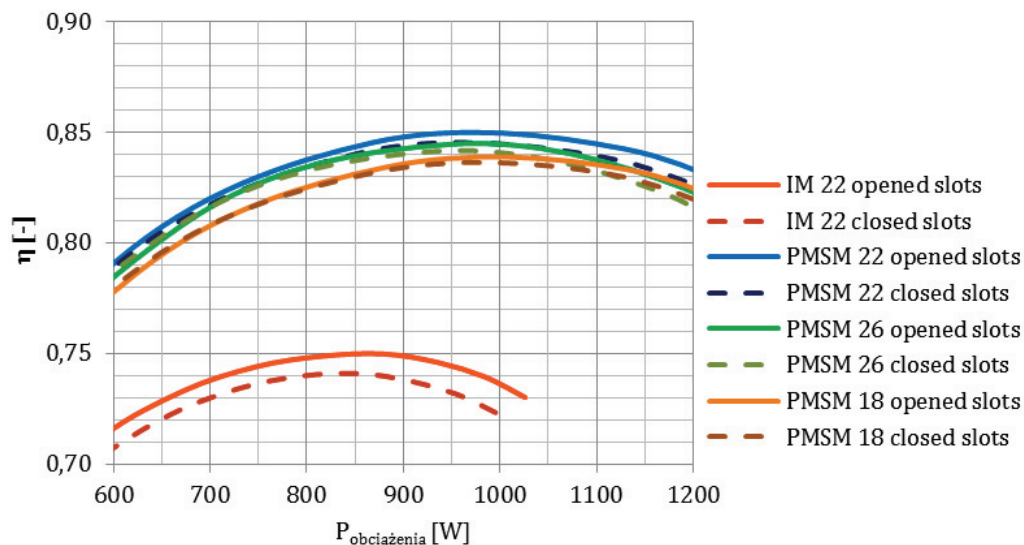
Jednofazowy silnik indukcyjny, na którym bazuje jednofazowy silnik synchroniczny, posiada wirnik z 22 zamkniętymi żłobkami. Zbadano wpływ zmiany liczby żłobków wirnika na właściwości eksploatacyjne jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim. Zbudowano modele jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi z 18, 22 oraz 26 żłobkami wirnika. Żłobki wirnika zostały zaprojektowane tak, aby sumaryczna szerokość zębów wirnika oraz sumaryczny przekrój żłobków wirnika pozostały bez zmian w celu zachowania wartości indukcji magnetycznej w zębach wirnika oraz ilości aluminium tworzącego obwód klatki wirnika. Magnesy trwałe zostały ułożone w wirniku tak, aby zachować minimalne odległości od żłobków wirnika i od wału ze względów mechanicznych. Dodatkowo zbadano wpływ otwarcia żłobków wirnika stosując otwarcie o szerokości 1 mm. Przekroje modeli są przedstawione na rys. 7.



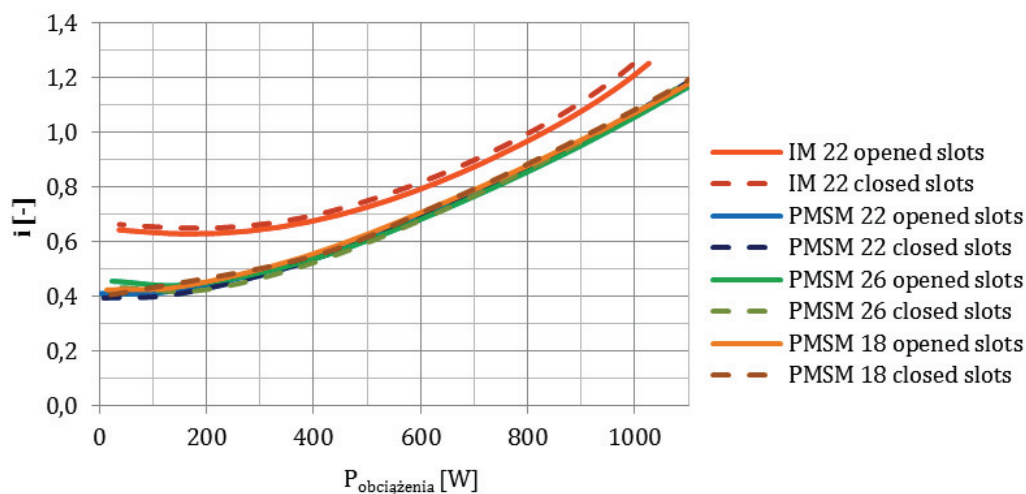
Rys. 7. Jednofazowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi z:
a) 22, b) 18, c) 26 żłobkami w wirniku

Fig. 7. Single-phase permanent magnet synchronous motor with:
a) 22, b) 18, c) 26 rotor slots

Otrzymane rezultaty badań są przedstawione na rys. 8, 9 i w tab. 1.



Rys. 8. Przebieg krzywych sprawności względem obciążenia dla badanych silników
 Fig. 8. Motor efficiency curves for induction motor and for permanent magnet synchronous motor with various rotor constructions



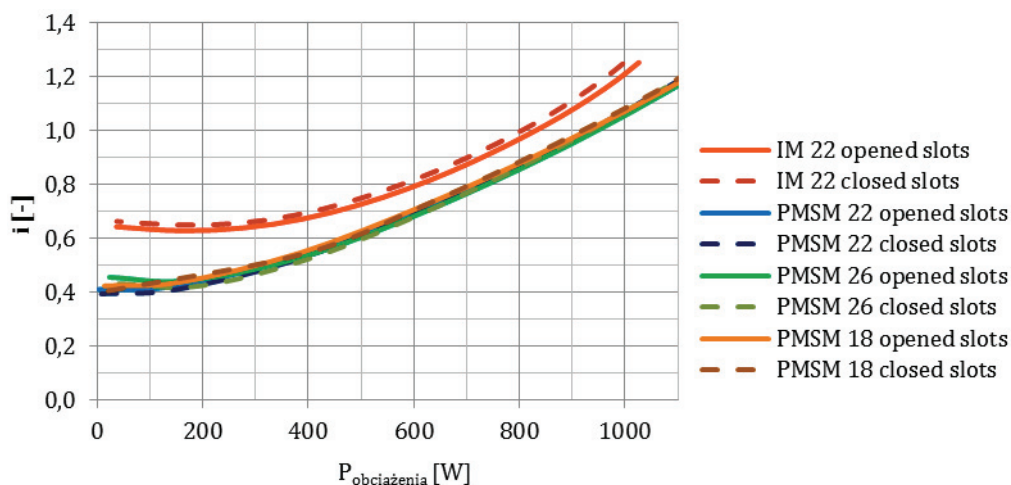
Rys. 9. Przebieg krzywych prądu względem obciążenia dla badanych silników
 Fig. 9. Motor current curves for induction motor and for permanent magnet synchronous motor with various rotor constructions

Tabela 1. Właściwości jednofazowych silników indukcyjnych (IM)
i synchronicznych z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim (PMSM)

Table 1. Single-phase induction motor and permanent magnet synchronous motor parameters

Silnik	P	η	$\cos\varphi$
	W	%	–
IM 22 otwarte żłobki	750	74,3	0,97 ind.
IM 22 zamknięte żłobki		73,5	0,96 ind.
PMSM 22 otwarte żłobki	1100	84,5	0,97 poj.
PMSM 22 zamknięte żłobki		83,9	0,98 poj.
PMSM 26 otwarte żłobki		83,7	0,98 poj.
PMSM 26 zamknięte żłobki		83,2	0,98 poj.
PMSM 18 otwarte żłobki		83,5	0,98 poj.
PMSM 18 otwarte żłobki		83,2	0,98 poj.

Sprawność jednofazowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi jest znacznie większa od sprawności odpowiadającym im jednofazowych silników indukcyjnych z powodu o wiele niższych strat w miedzi wirnika, co jest zaprezentowane na rys. 10.



Rys. 10. Straty w miedzi wirnika względem obciążenia dla badanych silników
Fig. 10. Rotor copper loss for induction motor and for permanent magnet synchronous motor
with various rotor constructions

Jednofazowe silniki z otwartymi żłobkami wirnika uzyskują większą sprawność niż jednofazowe silniki z zamkniętymi. Jednofazowe silniki indukcyjne pobierają moc bierną, natomiast jednofazowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi produkują

moc bierną. Otwarcie żłobków wirnika ma wpływ na strumień rozproszenia wirnika co skutkuje powiększonym poborem mocy biernej (w przypadku jednofazowych silników indukcyjnych) lub zmniejszoną produkcją mocy biernej (w przypadku jednofazowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi).

6. WNIOSKI

Otwarcie żłobków wirnika w jednofazowych silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi ma znaczący wpływ na właściwości eksploatacyjne silnika. Stosowanie otwartych żłobków wirnika powoduje powiększenie sprawności silnika oraz ograniczenie strumienia rozproszenia wirnika a tym samym lepsze sprzęgnięcie się strumienia wirnika ze strumieniem stojana. W ten sposób magnesy trwałe są lepiej wykorzystane, co ma duże znaczenie z powodu relatywnie ich wysokiej ceny.

Liczba żłobków wirnika w jednofazowych silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi powinna być zbliżona do liczby żłobków stojana i być od niej mniejsza w celu zminimalizowania strat mocy.

Artykuł opracowano w ramach projektu „Przedsiębiorczy doktorant – inwestycja w innowacyjny rozwój regionu” (Program Operacyjny Kapitał Ludzki, Priorytet VIII Regionalne Kadry Gospodarki, Działanie 8.2 Transfer Wiedzy, Poddziałania 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji). Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

LITERATURA

- [1] 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, Vol. 45, Iss. 10, 2009, p. 4724–4727.
- [2] FENG X., LIU L., KANG J., ZHANG Y., *Super premium efficient line start-up permanent magnet synchronous motor*, 2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), Rome, Italy, 6–8 September 2010, p. 1–6.
- [3] ZHONG H., WANG X., WANG D., *Analysis and Design of a New Type High-efficiency Single-phase Induction Motor Based on Negative Sequence Magnetic Field Compensation*, Electrical Machines and Systems, 2008, ICEMS 2008.
- [4] GWOŹDZIEWICZ M., ANTAL L., *Investigation of line start permanent magnet synchronous motor and induction motor properties*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 64, Studia i Materiały, Nr 30, 2010, s. 13–20.
- [5] LIN D., ZHOU P., LAMBERT N., *Starting Winding Optimization in Single-Phase*, Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International Conference.
- [6] GWOŹDZIEWICZ M., ZAWILAK J., *Single-phase line star permanent magnet synchronous motor*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne 2011.
- [7] YANG G., MA J., SHEN J.X., WANG Y., *Optimal design and experimental verification of a line-start permanent magnet synchronous motor*. 2008. ICEMS 2008. International Conference on Electrical Machines and Systems, 2008, p. 3232–3236.

SINGLE-PHASE LINE START PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR. CONSTRUCTION AND PARAMETERS

The paper deals with construction of single-phase line start permanent magnet synchronous motor. Circuit-field single-phase line start permanent magnet synchronous motor model based on the mass production single-phase induction motor was applied in Maxwell ver. 14 program. Various rotor constructions were taken into account. Influence of the rotor construction on the motor properties was examined.