

*jednofazowy silnik indukcyjny,  
jednofazowy silnik synchroniczny  
magnesowy trwałe*

Agata PIESIEWICZ, Maciej GWOŹDZIEWICZ\*,  
Paweł ZALAS\*

## **WYSOKOSPRAWNY JEDNOFAZOWY SILNIK LSPMSM O LICZBIE BIEGUNÓW $2p = 4$ – BADANIA EKSPERYMENTALNE**

W artykule dokonano porównania wybranych właściwości eksploatacyjnych prototypowego, jednofazowego silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi z odpowiadającym mu konstrukcją mechaniczną ogólnodostępnym silnikiem indukcyjnym (identyczne wymiary gabarytowe oraz jednakowa liczba biegunów). W badaniach eksperymentalnych wykonanych na specjalnie przystosowanym stanowisku pomiarowym wykorzystano konstrukcję mechaniczną stojana silnika produkowanego seryjnie, zmianom uległ wirnik maszyny.

### 1. WSTĘP

Ogólnoswiatowy trend do zwiększania energooszczędności maszyn i urządzeń prowadzi do wzrostu zapotrzebowania na nowe konstrukcje i rozwiązania, które mają na celu polepszenie właściwości eksploatacyjnych projektowanych maszyn. Lukę na rynku energooszczędnych silników jednofazowych mogą skutecznie zapełnić jednofazowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi. Silniki synchroniczne nie są tak szeroko stosowane jak silniki indukcyjne z powodu mniej korzystnych właściwości rozruchowych. Jednofazowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o rozruchu bezpośrednim SPLSPMSM (ang. *Single Phase Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor*) charakteryzuje się jednym z najkorzystniejszych spośród elektrycznych maszyn wirujących stosunkiem uzyskiwanego momentu i mocy znamionowej do objętości maszyny, dużą przeciążalnością momentem, pracą w szerokim zakresie prędkości obrotowych (sterowanie częstotliwościowe) oraz wysoką sprawnością [6].

---

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

Ze względu na swoje właściwości eksploatacyjne silniki LSPMSM stanowią alternatywę dla silników indukcyjnych.

W artykule przedstawiono porównania wybranych właściwości eksploatacyjnych prototypowego, jednofazowego silnika synchronicznego z magnesami trwałymi z odpowiadającym mu wielkością mechaniczną silnikiem indukcyjnym na podstawie wyników przeprowadzonych badań eksperymentalnych. W przeprowadzonych badaniach wykorzystano konstrukcję mechaniczną ogólnodostępnego silnika asynchronicznego typu SEh 80-4B, którego podstawowe parametry zostały przedstawione poniżej:

- moc znamionowa  $P_n = 0,75$  kW;
- prędkość obrotowa  $n_n = 1370$  obr/min;
- napięcie  $U_n = 230$  V;
- prąd  $I_n = 4,9$  A;
- sprawność  $\eta_n = 0,73$ ;
- krotność prądu rozruchowego  $k_r = 2,5$ ;
- moment znamionowy  $M_n = 5,23$  Nm;
- moment maks./moment znam. 0,4;
- współczynnik mocy  $\cos \varphi_n = 0,92$ ;
- liczba par biegunów  $p = 2$ .

W konstrukcji mechanicznej zastosowanego silnika zmianom uległ wirnik maszyny. Badania eksperymentalne zostały przeprowadzone przy zastosowaniu dwóch różnych wirników z magnesami trwałymi osadzonymi wewnątrz magnetowodu, wyposażonych w aluminiową klatkę rozruchową. Wirniki różniły się kształtem rozmieszczenia magnesów trwałych. Moc znamionowa badanego silnika niezależnie od zastosowanego rozmieszczenia magnesów trwałych wynosiła  $P_n = 1,1$  kW. Na rysunkach 1 i 2 pokazano widoki badanych wirników.

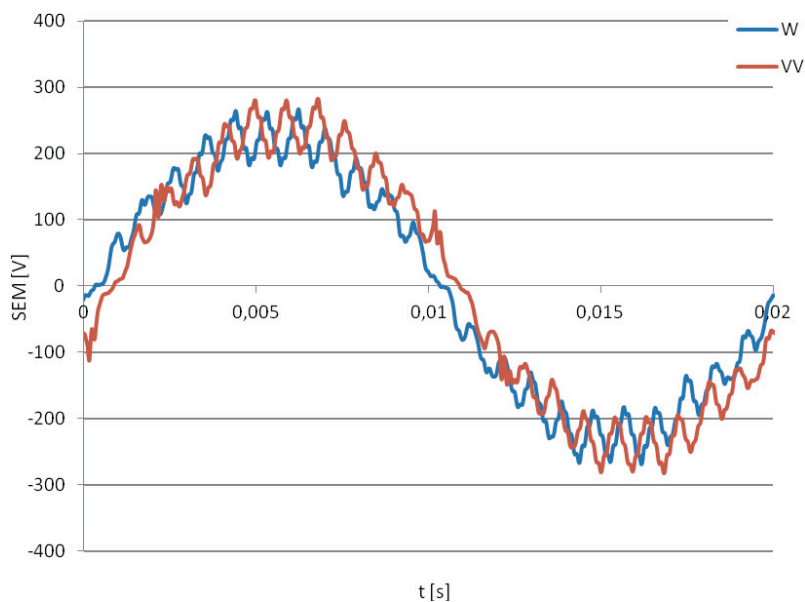


Rys. 1. Wirnik nr 1 – rozmieszczenie magnesów w układzie W

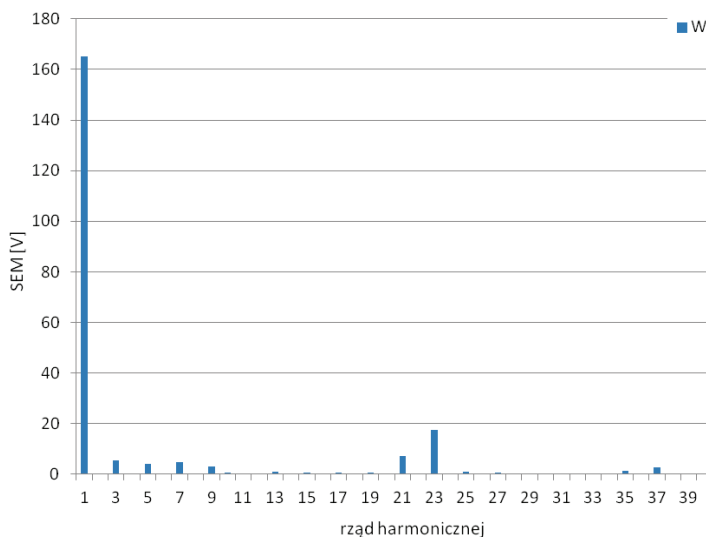


Rys. 2. Wirnik nr 2 – rozmieszczenie magnesów w układzie VV

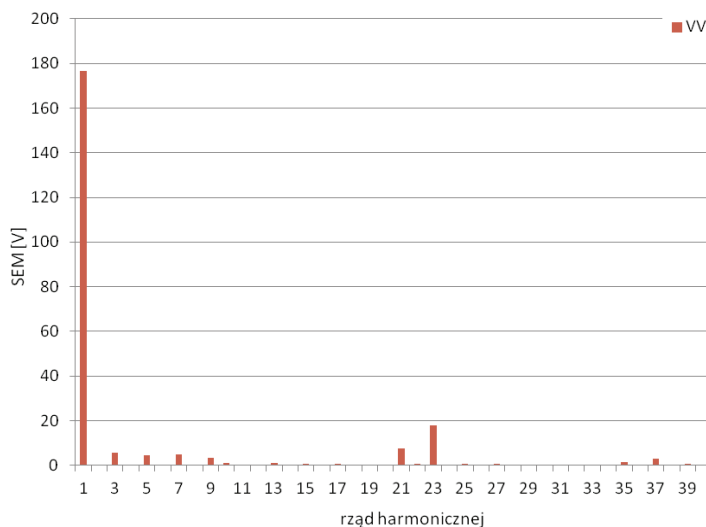
W celu wyznaczenia wpływu kształtu rozmieszczenia magnesów trwałych na przebieg, amplitudę oraz zawartość harmoniczną w sile elektromotorycznej indukowanej w uzwojeniach silnika od magnesów trwałych wykonano odpowiednie badania pomiarowe. Wyniki pomiarów SEM pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Przebieg indukowanej siły elektromotorycznej SEM przy rozmieszczeniu magnesów trwałych w układzie W oraz VV



Rys. 4. Wyniki analizy harmoniczych SEM indukowanej w uzwojeniach badanego silnika z magnesami trwałymi w układzie W



Rys. 5. Analiza harmoniczych SEM indukowanej w uzwojeniu badanego silnika z magnesami trwałymi w układzie VV

Przebiegi indukowanych sił elektromotorycznych mają zbliżony kształt (rys. 3). W przypadku wirnika z magnesami trwałymi w układzie VV SEM osiąga maksymalną amplitudę o wartości 285,3 V, a dla rozmieszczenia w układzie W – 267,5 V. Dla

obydwu wirników zbadano zawartość wyższych harmoniczných i zgodnie z zależnością 1 obliczono wartość współczynnika THD.

$$\text{THD}_{[\%]} = \frac{\sqrt{\sum_2^{40} (E_k)^2}}{E_1}, \quad (1)$$

gdzie:  $E_k$  – wartość skuteczna napięcia  $k$ -tej harmoniczných,  $E_1$  – wartość skuteczna napięcia pierwszej harmoniczných.

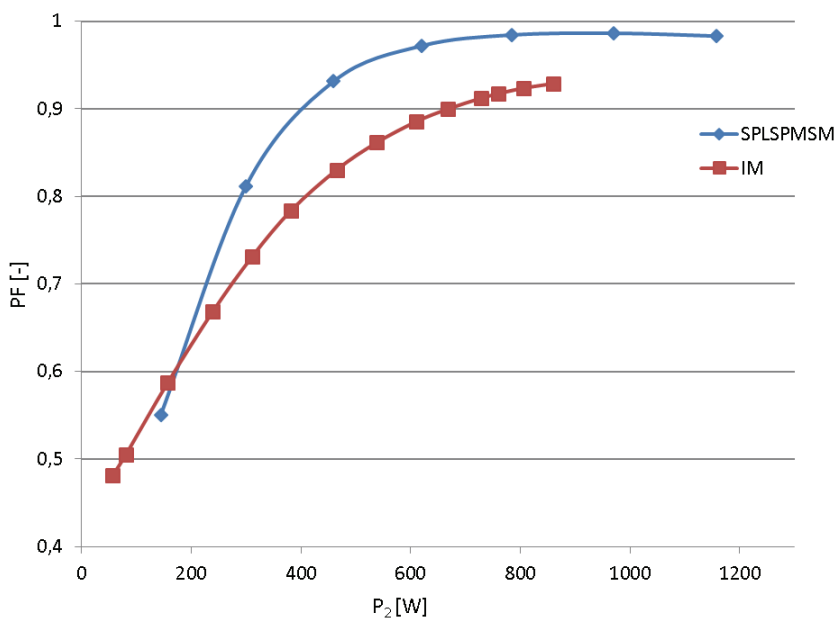
Dla wirnika nr 1 (układ W) współczynnik THD SEM wynosi 9,09%, a dla wirnika nr 2 (układ VV) wynosi 8,87%.

## 2. WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNE BADANYCH SILNIKÓW

Dzięki zastosowaniu magnesów trwałych silnik SPLSPMSM rozwija większą moc przy tych samych gabarytach, co silnik indukcyjny, osiągając jednocześnie wyższą sprawność oraz współczynnik mocy. W silnikach indukcyjnych do powstania pola magnetycznego potrzebny jest prąd magnesujący, powodujący dodatkowe straty w miedzi stojana [4]. Ma to bezpośredni wpływ na sprawność silnika. 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. Dzięki temu silniki SPLSPMSM charakteryzują się lepszymi właściwościami eksploatacyjnymi od silników indukcyjnych asynchronicznych. Technologia wykonania stojanów silników SPLSPMSM jest analogiczna do technologii stosowanej w przypadku silników indukcyjnych, przez co ten etap technologii produkcji silnika nie musi być opracowywany na nowo [5]. Zastosowanie magnesów trwałych ogranicza pobór mocy biernej, a tym samym wartość pobieranego prądu [4]. Wśród wad silników SPLSPMSM należy wymienić generowanie wyższych harmoniczných – silnik pobiera prąd odkształcony. Jest to spowodowane odkształceniem pola magnetycznego. Może to prowadzić do przeciążeń przewodów neutralnych, wzrostu strat w transformatorach oraz zakłóceń w pracy odbiorników elektronicznych [3]. Większa, w porównaniu z silnikami indukcyjnymi, zawartość wyższych harmoniczných momentu elektromagnetycznego może być źródłem większych drgań i hałasu maszyny [1]. Ze względu na moment hamujący generowany przez magnesy trwałe, wypadkowy moment rozruchowy silnika SPLSPMSM jest mniejszy niż w silniku indukcyjnym, co ogranicza jego stosowanie do napędów wymagających niewielkiego momentu rozruchowego w początkowej fazie tego procesu. Rozruch silnika SPLSPMSM jest dłuższy niż silnika indukcyjnego ale wartości ich prądów rozruchowych są zbliżone.

### 3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

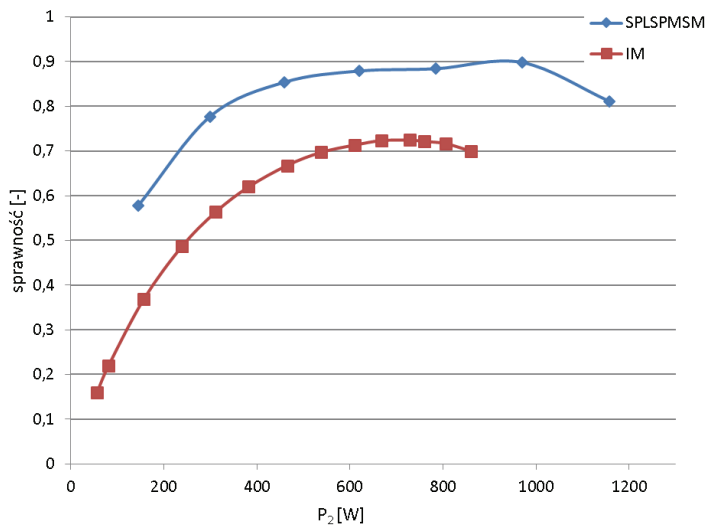
W celu porównania właściwości eksploatacyjnych badanych silników jednofazowych wykonano odpowiednie badania eksperymentalne wykorzystując specjalnie przystosowane do tego stanowisko pomiarowe. Rysunki 6–8 przedstawiają porównanie przebiegów wybranych wielkości badanego silnika SPLSPMSM z magnesami trwałymi rozmieszczonymi w kształcie litery W z odpowiadającym mu silnikiem indukcyjnym SEh80-4B. Obydwa silniki pracowały z kondensatorem pracy o pojemności 20  $\mu\text{F}$ .



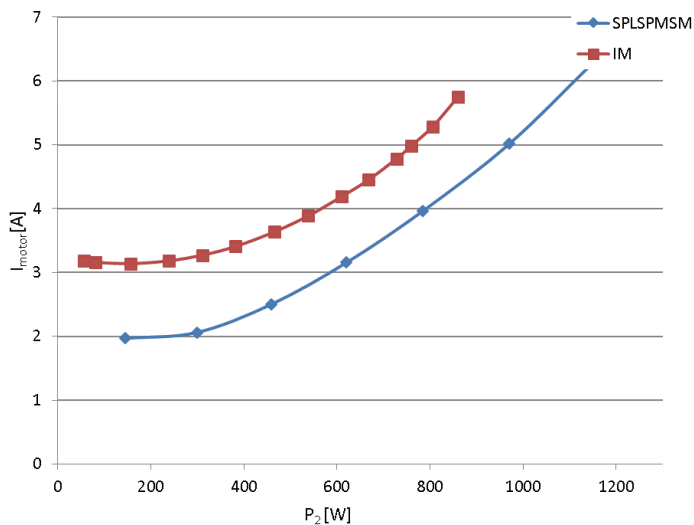
Rys. 6. Zależność współczynnika mocy PF od obciążenia silnika SPLSPMSM oraz silnika indukcyjnego

Analiza wyników wykonanych pomiarów wykazała, że współczynnik mocy PF jest istotnie większy dla silnika SPLSPMSM (rys. 6). Przy mocy znamionowej silnika indukcyjnego równej 750W, jego współczynnik mocy przyjmuje wartość 0,92, podczas gdy dla silnika SPLSPMSM znamionowy współczynnik mocy wynosi 0,98.

Sprawności znamionowe badanych silników to odpowiednio 73% dla silnika indukcyjnego i 84% dla silnika SPLSPMSM w ich znamionowych punktach pracy (rys. 7). Zastosowanie magnesów trwałych w wirniku silnika SPLSPMSM znacząco zwiększyło jego sprawność w stosunku do silnika indukcyjnego. Obydwa silniki osiągają dużo niższą wartość sprawności w dolnym zakresie obciążenia.



Rys. 7. Zależność sprawności  $\eta$  od obciążenia silnika SPLSPMSM oraz silnika indukcyjnego



Rys. 8. Zależność prądu pobieranego przez silnik  $I_{motor}$  od obciążenia silnika SPLSPMSM oraz silnika indukcyjnego

Wyniki pomiarów badanych silników wykazały, że w ich znamionowych punktach pracy prąd fazy głównej jest wyższy w przypadku silnika SPLSPMSM, natomiast prąd fazy pomocniczej jest większy w przypadku silnika indukcyjnego. Wartość wypadkowego, znamionowego prądu pobieranego przez silnik jest większa dla silnika SPLSP

MSM i wynosi około 6 A, a dla silnika indukcyjnego około 5 A (rys. 8). W tabeli 1 zamieszczono porównanie wybranych właściwości badanych silników jednofazowych.

Tabela 1. Porównanie wybranych właściwości badanego silnika SPLSPMSM z silnikiem indukcyjnym

Typ silnika		SPLSPMSM	IM
Właściwości rozruchowe	długość czasu rozruchu	dłuższy rozruch	krótszy rozruch
	prąd rozruchowy	porównywalna wartość prądu rozruchowego	
Właściwości eksploatacyjne	sprawność	80–90%	70–80%
	pobór mocy biernej	mniejszy pobór mocy biernej	większy pobór mocy biernej
	stosunek uzyskiwanej mocy i momentu do objętości maszyny	najlepszy spośród wszystkich maszyn wirujących	
	generowanie wyższych harmonicznych	zdecydowanie większe niż w silniku indukcyjnym	
Inne	cena	droższy	stosunkowo tani
	zastosowanie (uniwersalność)	ograniczone zastosowanie	bardzo uniwersalny

#### 4. WNIOSKI

Analiza wyników wykonanych badań eksperymentalnych wykazała, że badany prototypowy silnik SPLSPMSM charakteryzuje się lepszymi właściwościami eksploatacyjnymi, a gorszymi rozruchowymi. Ze względu na swoje właściwości, badany silnik z magnesami trwałymi może z powodzeniem pracować w układach napędowych pomp i wentylatorów [2], gdzie jego nienajlepsze właściwości rozruchowe nie będą stanowiły istotnej wady, a właściwości eksploatacyjne: wysoka sprawność oraz współczynnik mocy i mały pobór mocy biernej, okażą się istotnymi zaletami. Do pracy w napędach wymagających większych momentów rozruchowych, o częstych rozruchach, z pewnością bardziej korzystny jest wybór silnika indukcyjnego. Cena magnesów trwałych, a co za tym idzie – wyższa cena silników SPLSPMSM w stosunku do silników indukcyjnych, może z pozoru stanowić ich wadę, ale jest to inwestycja, która zwróci się w czasie zależnym od częstotliwości użytkowania maszyny.

#### LITERATURA

- [1] ANTAL L., ZAWILAK T., *Porównanie silnika indukcyjnego z silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 58, Studia i Materiały, Nr 25, Wrocław 2005, 212–221.
- [2] BARAŃSKI M., JĘDRYCZKA C., MIKOŁAJEWICZ J., SZELAĞ W., *Analiza silnika synchronicznego o rozruchu bezpośrednim i magnesach w wirniku rozłożonych w kształcie litery U*, Prace Na-



- ukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 66, Studia i Materiały, Nr 32, Wrocław 2012, 78–85.
- [3] GWOŹDZIEWICZ M., *Ograniczanie wyższych harmonicznych w silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi*, *Interdyscyplinarność badań naukowych 2012*, praca zbiorowa pod red. Jarosława Szreka, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012, 217–222.
- [4] GWOŹDZIEWICZ M., ZAWILAK J., *Jednofazowy silnik synchroniczny z magnesami trwałymi. Konstrukcja i parametry*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 65, Studia i Materiały, Nr 31, Wrocław 2011, 24–34.
- [5] KISIELEWSKI P., ZALAS P., *Zastosowanie magnesów trwałych w silnikach elektrycznych małej mocy*, *Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych*, PEMINE, Ryto, 25–27 maja 2011, Masz. Elektr. Zesz. Prob. BOBRME Komel, nr 91, 109–112.
- [6] ZALAS P., *Magnesy trwałe w wirniku silnika synchronicznego małej mocy*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 65, Studia i Materiały, Nr 31, Wrocław 2011, 99–106.

HIGH EFFICIENCY SINGLE-PHASE LINE START PMSM  
WITH NUMBER OF POLES  $2p = 4$   
– EXPERIMENTAL RESULTS

The paper presents a comparison of selected running properties of a prototype, single-phase synchronous motor with permanent magnets with a corresponding induction motor (the same dimensions and the same number of poles). In experimental studies performed on a specially adapted test bench the mechanical construction of the stator of the series production motor was used.