

## Energooszczędne silniki elektryczne prądu przemiennego

*W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących zastosowania magnesów trwałych w silnikach prądu przemiennego. Istotą tych silników jest ich prosta budowa i eksploatacja, a uruchomienie odbywa się przez bezpośrednie przyłączenie do napięcia zasilającego. Maszyny te mają takie same gabaryty i mogą zastąpić silniki indukcyjne przez prostą wymianę. Pokazano charakterystyki eksploatacyjne silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi. Charakteryzują się one lepszymi parametrami eksploatacyjnymi, tj. większym współczynnikiem mocy, większym współczynnikiem sprawności oraz mniejszym prądem pobieranym z sieci.*

### 1. WSTĘP

---

Duże zużycie energii przez kopalnie węgla i rud miedzi powoduje wzrost kosztów wydobycia oraz uszczuplenia zasobów mocy w systemie elektroenergetycznym. Związane to jest jednocześnie z większym zanieczyszczeniem środowiska spowodowanym zwiększoną emisją CO<sub>2</sub>. W każdej kopalni, oprócz podstawowych maszyn i urządzeń, takich jak maszyny wydobywcze i transportowe, zainstalowanych jest wiele pomp i wentylatorów. W czynnych obecnie kopalniach rud miedzi czy węgla zastosowane są napędy z silnikami elektrycznymi o niezadowalającej sprawności. Najczęściej są to silniki indukcyjne. Przy dużej liczbie tego typu urządzeń o pracy ciągłej już niewielka poprawa sprawności napędu sumarycznie pozwoli na duże oszczędności energii. Dlatego wiele ośrodków badawczych zajmuje się poszukiwaniami nowych, energooszczędnych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn elektrycznych [1-8].

Celem artykułu jest poszerzenie wiedzy na temat energooszczędnych układów napędowych z silnikami elektrycznymi o nowych strukturach obwodów magnetycznych wzbudzanych magnesami trwałymi, których wdrożenie pozwoli na znaczne zmniejszenie zużycia energii. Napędy mają być dostosowane do pracy w warunkach kopalnianych.

### 2. SILNIKI SYNCHRONICZNE WZBUDZANE MAGNESAMI TRWAŁYMI

---

Poszukiwanie nowych struktur maszyn elektrycznych do napędów kopalnianych zdeterminowane jest postawionym celem – chęcią uzyskania napędów energooszczędnych i niezawodnych. Uzyskanie silników napędowych o sprawności większej niż sprawność obecnie stosowanych energooszczędnych silników indukcyjnych wymaga użycia w ich strukturach nowoczesnych materiałów, a w szczególności magnesów trwałych. Ponadto silniki powinny być przystosowane do zmiennego trybu pracy napędów np. wentylatorów i pomp, czyli umożliwiać skokową lub ciągłą regulację prędkości obrotowej, pozwalającą na racjonalizację zużycia energii. Niezawodność silników powinna być nie mniejsza, a eksploatacja nie gorsza niż w przypadku silników indukcyjnych, co oznacza możliwie najprostszą konstrukcję poszukiwanych nowych struktur maszyn.

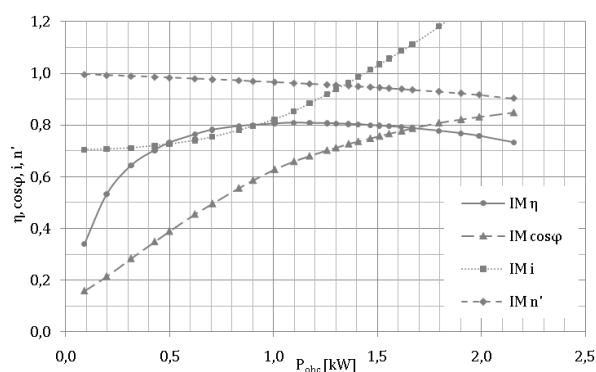
#### 2.1. Porównanie silników synchronicznych z magnesami trwałymi oraz indukcyjnych

Budowa układu mechanicznego oraz stojana jest identyczna, jak silnika indukcyjnego. Różnica w budowie wirnika wynika z konieczności umieszcze-

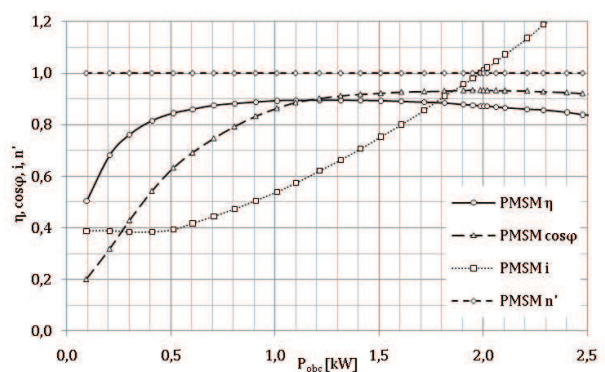
Tabela 1.

**Dane znamionowe porównywanych silników:  
indukcyjnego (IM) i synchronicznego z magnesami trwałymi (LSPMSM) [9]**

Parametr	jednostka	IM	LSPMSM
moc znamionowa	kW	1,5	2,0
napięcie znamionowe	V	400	400
prąd znamionowy	A	3,5	3,541
sprawność	–	0,78	0,872
współczynnik mocy	–	0,79	0,935
prędkość obrotowa	1/min	1410	1500
moment znamionowy	N×m	10,16	12,74
moment rozruchowy $M_r/M_n$	–	2,5	1,16
prąd rozruchowy $I_r/I_n$	–	5,3	5,1



Rys. 1. Charakterystyki elektromechaniczne silnika indukcyjnego [9]



Rys. 2. Charakterystyki elektromechaniczne silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (LSPMSM) [9]

nia magnesów trwałych. Ponieważ przyjęto, że silniki tego typu mają być uruchamiane przez bezpośrednie włączenie do sieci zasilającej, to ich rozruch odbywa się przez wytworzenie momentu asynchronicznego. Moment ten wygenerowany jest przez uzwojenie klatkowe ułożone w wirniku w sposób podobny, jak w silniku indukcyjnym. Dobór uzwojenia klatkowego umożliwiający kompensację momentu hamującego od magnesów trwałych (liczba i wymiary prętów uzwojenia) jest przedmiotem wielu prac [m.in. 10].

Ze względów konstrukcyjnych, a przede wszystkim technologicznych, jednym z korzystniejszych rozwiązań jest ułożenie magnesów w kształcie litery V (rys. 1).

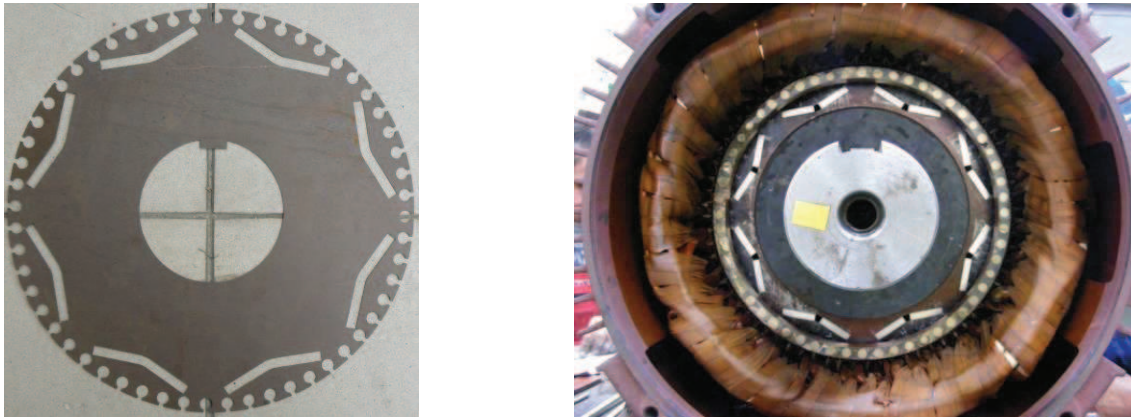
Pierwsze modele maszyn zbudowano dla małych mocy. Można je wykonać niewielkim nakładem środków finansowych, a także zbadać w warunkach laboratoryjnych. Wykorzystano konstrukcję mechaniczną oraz magnetowód stojana typowego silnika indukcyjnego. W silniku tym wymieniono wirnik, w którym umieszczono magnesy trwałe. Porównanie parametrów silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi zestawiono w tabeli 1., a ich charakterystyki elektromagnetyczne przedstawiono na rysunkach 1. i 2. [9].

Na podstawie porównania parametrów oraz charakterystyk silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi można stwierdzić, że:

- zwiększa się moc znamionową uzyskiwaną z tej samej objętości maszyny,
- kompensuje się moc bierną pobieraną z sieci (zwiększa współczynnik mocy),
- współczynnik mocy jest stały w dużym zakresie obciążenia,
- zwiększa się współczynnik sprawności,
- sprawność jest stała w dużym zakresie zmian obciążenia.

Pozytywne wyniki uzyskane na małym modelu skłoniły do opracowania konstrukcji silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi o średniej mocy znamionowej.

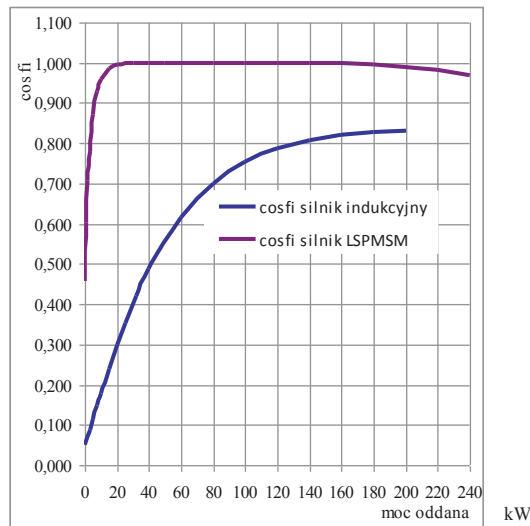
W celu umożliwienia porównania uzyskanych efektów wykorzystano konstrukcję mechaniczną oraz stojan kompletny (magnetowód z uzwojeniem) typowego silnika indukcyjnego o mocy znamionowej  $P=160$  kW. W silniku tym zastosowano wirnik z uzwojeniem klatkowym prętowym wykonanym technologią spawania (rys. 3).



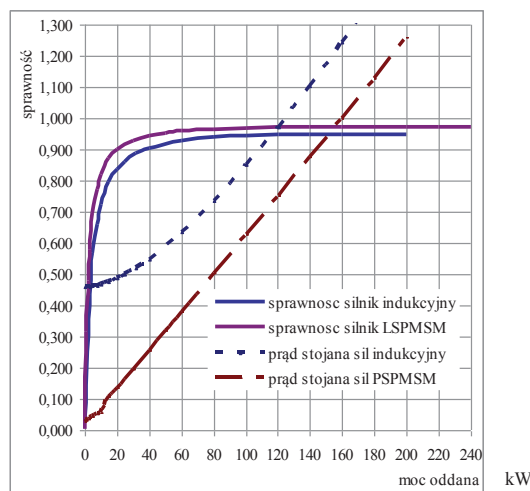
Rys. 3. Wirnik silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o mocy  $P=160$  kW [11]

Charakterystyki sprawności współczynnika mocy oraz prądu pobieranego z sieci silnika indukcyjnego

i synchronicznego z magnesami trwałymi zestawiono na rysunkach 4. i 5.



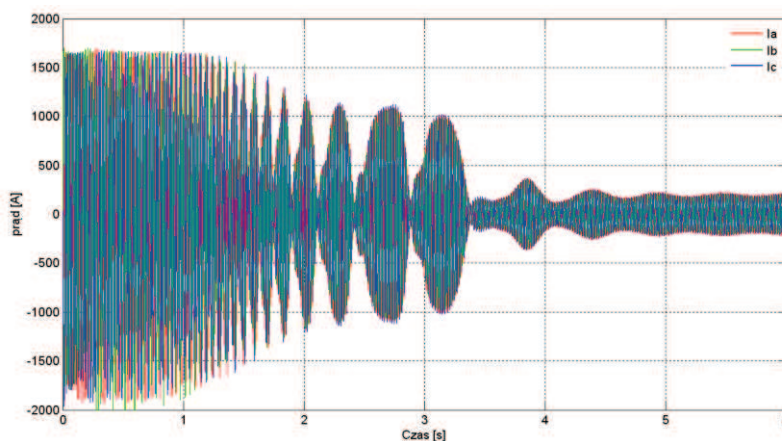
Rys. 4. Charakterystyki współczynnika mocy w funkcji obciążenia silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi [11]



Rys. 5. Charakterystyki współczynnika sprawności i prądu stojana w funkcji obciążenia silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi [11]



Rys. 6. Fotografia wentylatora z silnikiem wzbudzonym magnesami trwałymi [11]



Rys. 7. Wykres prądu pobieranego z sieci podczas rozruchu silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (skuteczna wartość prądu)  $I_r=1190\text{ A}$ ,  $I_r=5,8 I_n$  [11]

## 2.2. Badanie asynchronicznego rozruchu i synchronizacji silników z magnesami trwałymi

Zbudowany silnik synchroniczny z magnesami trwałymi zamontowano jako napęd wentylatora typu WOO (rys. 6), a następnie przeprowadzono rozruch przez bezpośrednie włączenie go do sieci. Zmierzony przebieg prądu pobieranego z sieci pokazano na rysunku 7.

Na podstawie wykonanych pomiarów prądu rozruchowego można stwierdzić, że silnik z magnesami trwałymi i uzwojeniem klatkowym w wirniku (rys. 3) może być uruchomiony przez bezpośrednie włączenie do napięcia sieci – ma klasyczny przebieg w czasie i osiąga prędkość synchroniczną. Z kolei w wyniku porównania charakterystyk silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi (rys. 4 i 5) dowiedziono, iż:

- kompensuje się moc bierną pobieraną z sieci (zwiększa współczynnik mocy z 0,822 do 0,998),
- współczynnik mocy jest praktycznie stały w całym zakresie zmian obciążenia,
- zwiększa się współczynnik sprawności (z 0,950 do 0,973),
- sprawność jest praktycznie stała w całym zakresie zmian obciążenia,
- zmniejsza się prąd znamionowy pobierany z sieci (z 235,7 A do 189,6 A).

## 3. WNIOSKI

Na podstawie przedstawionych wyników badań można stwierdzić, że możliwe jest zbudowanie silników prądu przemiennego o większej sprawności od obecnie oferowanych silników indukcyjnych energooszczędnych. Wymaga to zastosowania

magnesów trwałych do ich wzbudzenia. Zmniejszenie prądu magnesującego polepsza współczynnik mocy oraz zmniejsza prąd pobierany z sieci zasilającej.

Na podstawie doświadczeń eksperymentalnych można stwierdzić, że silniki takie mogą być budowane w pełnym zakresie mocy znamionowych. Zdobyte doświadczenia z silnikiem o średniej mocy ( $P=160$  kW) upoważniły do podjęcia prac nad budową silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o mocy większej niż 1000 kW. Silnik taki został zaprojektowany, a wyniki będą opublikowane w najbliższym czasie.

#### Literatura

1. Aliabad A. D., Mirsalim M., Ershad N. F., Line-Start Permanent-Magnet Motors: *Significant Improvements in Starting Torque, Synchronization and Steady-State Performance*, IEEE Transactions on Magnetics, volume 46, issue 12, 2010, p. 4066-4072.
2. Cistelecan M. V., Popescu M., Melcescu L., Tudorache T.: *Three phase line start claw poles permanent magnet motor with pole changing winding*, Power Electronics, Electrical Drives, 2008, SPEEDAM 2008, International Symposium on Automation and Motion, 2008, p. 245-249.
3. 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, volume 45, issue 10, 2009, p. 4724-4727.
4. 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.
5. 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.
6. Qin Fen Lu, Yun Yue Ye: *Design and Analysis of Large Capacity Line-Start Permanent-Magnet Motor*, IEEE Transactions on Magnetics, volume 44, issue 11, part 2, 2008, p. 4417-4420.
7. Qing Zhao, Xiulian Wang, Shenbo Yu, Dong Zhang, Zhongliang An, Renyuan Tang: *Study and design for large line-start permanent magnet synchronous motors*, Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems, 2003, ICEMS 2003, volume 1, 2003, p. 132-133.
8. Qu Fengbo, Li Zhipeng, Cheng Shukang, Li Weili: *Calculation and simulation analysis on starting performance of the high-voltage line-start PMSM*, (ICCASM), 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling, volume 3, 2010, p. V3-198 - V3-202.
9. Zawilak T., Antal L.: *Porównanie silnika indukcyjnego oraz synchronicznego z magnesami trwałymi i rozruchem bezpośrednim – badania eksperymentalne*, Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe, 2007 nr 77, s. 277-282.
10. Zawilak T.: *Wykorzystanie efektu wypierania prądu w rozruchu bezpośrednim maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych PWr., nr 66 SiM nr 32, 2012 . s. 105-111.
11. Zawilak J.: Opracowania własne.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów