

# PRZYSZŁOŚĆ ENERGOOSZCZĘDNYCH SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

## THE FUTURE OF THE ENERGY-SAVING PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Jan Zawilak, Tomasz Zawilak - Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska

*W artykule przedstawiono wyniki badań i perspektywy 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.*

*The article deals with application of permanent magnets in AC motors. They are characterized by simply construction and exploitation with direct on line start-up.. These motors have the same volume as induction motors and the can replace them simply. Running properties of the line start permanent magnet synchronous motors are presented. In comparison with induction motors they have higher efficiency, higher power factor and draw lower current.*

**Słowa kluczowe:** maszyny elektryczne, silniki synchroniczne, wzbudzenie, magnesy trwałe, sprawność

**Słowa kluczowe:** electric machines, synchronous motors, excitation, permanent magnets, efficiency

### Wstęp

Duże zużycie energii przez kopalnie węgla i 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, transportowe zainstalowanych jest wiele pomp i wentylatorów. W czynnych obecnie kopalniach miedzi czy węgla zastosowane są napędy z silnikami elektrycznymi o niezadowalającej sprawności. Najczęściej są to silniki indukcyjne. Przy dużej ilości 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, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9].

Celem pracy jest poszerzenie wiedzy nt. 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.

### Silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi

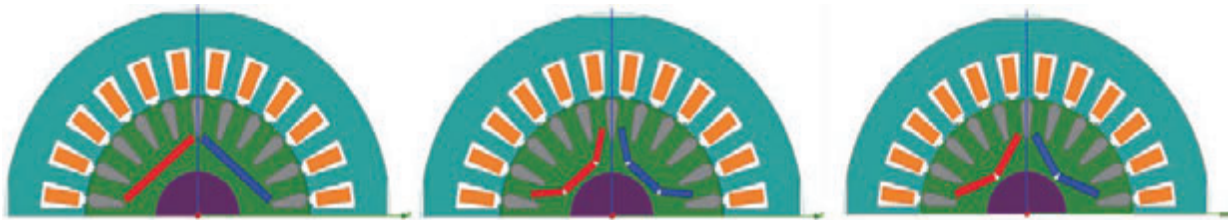
Poszukiwanie nowych struktur maszyn elektrycznych do napędów kopalnianych zdeterminowane jest postawionym celem, a mianowicie uzyskaniem napędów energooszczędnych i niezawodnych. Uzyskanie silników napędowych

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 i eksploatacja nie gorsza niż silników indukcyjnych co oznacza możliwie najprostszą konstrukcję poszukiwanych nowych struktur maszyn.

#### **Budowa silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi**

Budowa układu mechanicznego oraz stojana jest identyczna jak silnika indukcyjnego. Różnica w budowie wirnika wynika z konieczności umieszczenia 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 wytworzony jest przez uzwojenie klatkowe ułożone w wirniku podobnie 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 jest ułożenie magnesów w kształcie litery V (rys. 1). Ułożenie magnesów trwałych w wirniku ma wpływ na ich wykorzystanie (wyindukowanie



Rys. 1. Możliwości ułożenia magnesów trwałych w wirniku maszyny synchronicznej  
Fig. 1. Possibilities of the permanent magnet arrangement in the synchronous motor rotor

odpowiednio dużej siły elektromotorycznej wpływającej na współczynnik mocy), zawartość harmoniczných w polu magnetycznych (wartość współczynnika THD) oraz wartość momentu zaczepowego.

Pierwsze modele maszyn zbudowano dla małych mocy, które można 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 oraz 2, a ich charakterystyki elektromagnetyczne na rysunkach 2 oraz 3 [10].

ści) daje duże oszczędności energii elektrycznej i efekty ekonomiczne. W pracy podjęto próbę opracowania konstrukcji silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi, który bez żadnych przeróbek mógłby być zamontowany do napędu wentylatora typu WOO-200. W celu możliwości bezpośredniego porównania przebadano silnik podczas rozruchu oraz obciążenia mocą pobieraną przez wentylator rejestrując przebiegi chwilowe prądów przewodowych oraz napięcia międzyfazowe na zaciskach uzwojenia stojana dla rozruchu z obniżonym napięciem za pomocą przekształtnika napięcia (softstartu). Na szczególną uwagę zasługuje fakt zniekształcenia napięcia i prądu podczas rozruchu pokazany na rysunku 4.

Tab. 1. Dane znamionowe porównywanych silników: indukcyjnego (IM) i synchronicznego z magnesami trwałymi (LSPMSM)  
Tab. 1. Rated performances of the compared motors: Induction Motor (IM) and Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPMSM)

parametr	jedn.	Sh80-4B	Shm80-4B	Shm80-4B	Sh80-2A	Shm80-2A
moc znam.	kW	0,75	0,75	1,10	0,75	1,10
prędk. obr.	o/min	1390	1500	1500	2780	3000
prąd $I_1$	A	2,00	1,30	1,95	2,50	2,10
sprawność	%	75,0	89,0	86,0	74,0	86,0
$\cos\phi$	--	0,73	0,92	0,96	0,84	0,87
$M_r/M_n$	--	2,1	2,1	1,6	2,6	1,6
$M_{max}/M_n$	--	2,1	2,5	1,7	2,6	1,5
$I_r/I_n$	--	4,0	6,6	4,4	5,1	5,5

Na podstawie porównania parametrów i 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.

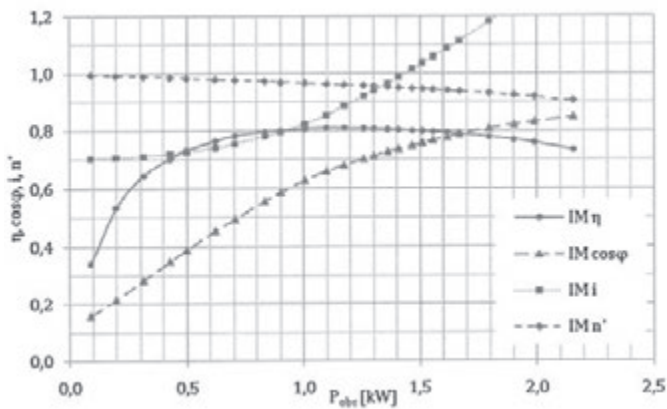
Pozytywne wyniki uzyskane na małym modelu skłoniły do opracowania konstrukcji silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi o średniej mocy znamionowej.

#### **Silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi średniej mocy**

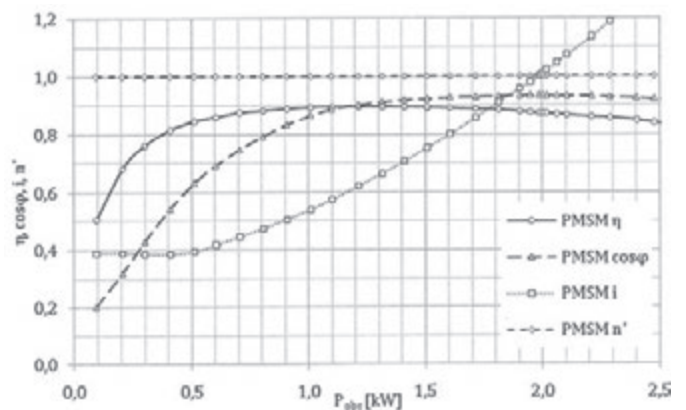
Ze względu na przewietrzanie przodków, wentylatory zainstalowane na dole kopalni pracują całą dobę. Dlatego nawet nieznaczne zmniejszenie strat (zwiększenie sprawno-

Tab. 2. Dane znamionowe porównywanych silników: indukcyjnego (IM) i synchronicznego z magnesami trwałymi (LSPMSM)  
Tab. 2. Rated performances of the compared motors: Induction Motor (IM) and Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPMSM)

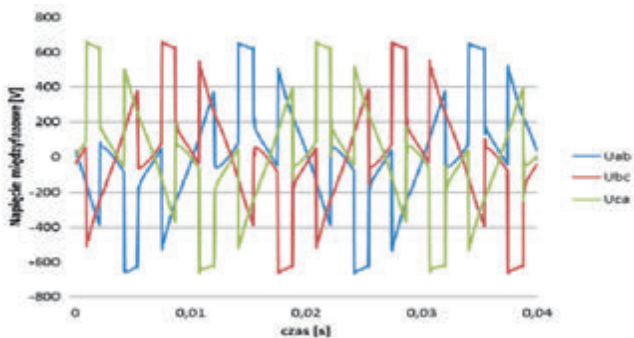
parametr	jednostka	IM	LSPMSM
moc znamionowa	kW	1,5	2,0
napięcie znamionowe	V	400	400
prąd znamionowy	A	3,5	3,5
sprawność	--	0,78	0,87
współczynnik mocy	--	0,79	0,94
prędkość obrotowa	1/min	1410	1500
moment znamionowy	N·m	10,2	12,7
moment rozruchowy $M_r/M_n$	--	2,5	1,2
prąd rozruchowy $I_r/I_n$	--	5,3	5,1



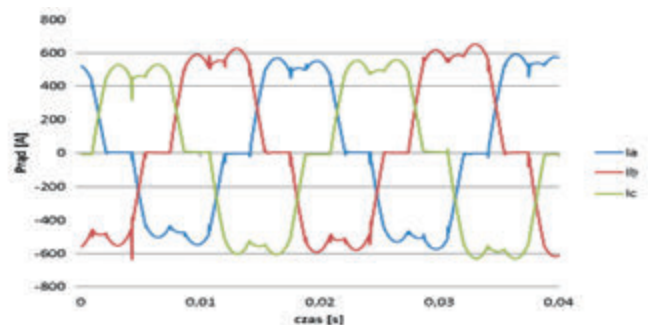
Rys. 2. Charakterystyki elektromechaniczne silnika indukcyjnego  
Fig. 2. Running properties of the Induction Motors



Rys. 3. Charakterystyki elektromechaniczne silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (LSPMSM)  
Fig. 3. Running properties of the Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPMSM)



Rys. 4. Wykres chwilowych wartości napięć międzyfazowych i prądów pobieranych z sieci przez silnik indukcyjny w czasie rozruchu przy zasilaniu z przekształtnika napięcia  
Fig. 4. Graph showing the phase-phase voltages and line currents drawn by the induction motor supplied by the main supply or by the frequency inverter during the motor start-up.



Na podstawie zarejestrowanych wartości napięć i prądów wyznaczono następujące wielkości silnika podczas obciążenia wentylatorem (tab. 3).

Na podstawie pomierzonych i obliczonych wielkości silnika typu Sg 355M8A o mocy znamionowej P=160 kW można stwierdzić, że w miejscu zainstalowania wentylatora jest on obciążony mocą zaledwie **66,4 kW** tj. **41,5%** mocy znamionowej. Skutkuje to tym, że współczynnik sprawności wynosi **92,6%** i niekorzystna jest relacja między mocą czynną a bierną tj. współczynnik mocy wynosi **0,62**.

Tab. 3. Parametry silnika o mocy znamionowej 160 kW podczas obciążenia wentylatorem typu WOO -200B

Tab. 3. The 160 kW motor parameters during load by the fan type WOO-200B

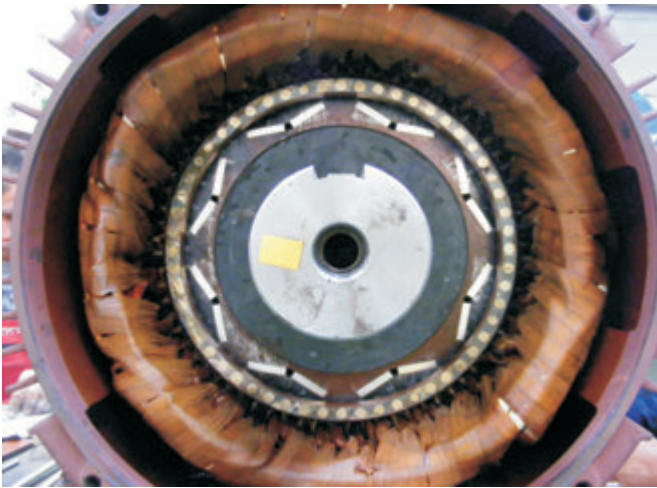
wielkość	jednostka	wartość
napięcie zasilania (skuteczne)	V	525
prąd pobierany z sieci (skuteczny)	A	126
moc czynna pobierana z sieci	kW	71
moc bierna pobierana z sieci	kVAr	90
moc pozorna pobierana z sieci	kVA	114,5
współczynnik mocy	---	0,62
współczynnik sprawności	%	92,6
moc oddawana	kW	66,4

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. 5).

Parametry silnika synchronicznego napędzającego wentylator typu WOO 200 (rys. 6) zestawiono w tabeli 4. Charakterystyki sprawności, współczynnika mocy oraz prądu pobieranego z sieci silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi pokazano na rysunkach 7 i 8.

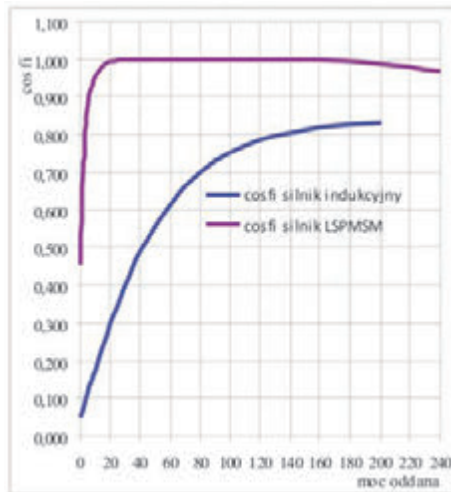
Na podstawie porównania charakterystyk silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi można stwierdzić, że:

- 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).



Rys. 5. Wirnik silnika synchronicznego z magnesami trwałymi o mocy  $P=160$  kW

Fig. 5. Rotor of the LSPMSM with rated power  $P_n=160$  kW



Rys. 7. Charakterystyki współczynnika mocy w funkcji obciążenia silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi

Fig. 7. Induction Motor and Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPMSM) power factor against the load power

Tab. 4. Parametry silnika synchronicznego z magnesami trwałymi dla obciążenia znamionowego  $P_n=160$  kW

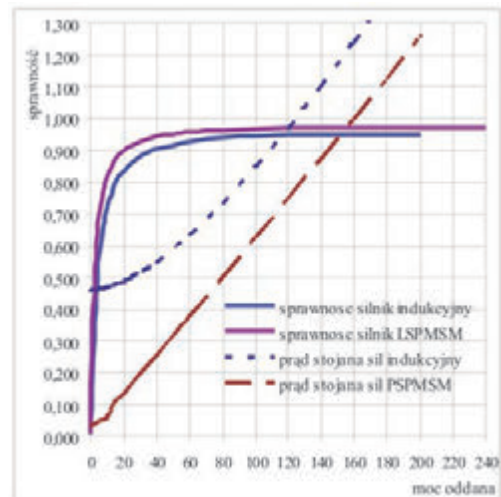
Tab. 4. The parameters of the permanent magnet synchronous motor for the rated load power  $P_n=160$  kW

wielkość	jednostka	wartość
napięcie zasilania (skuteczne)	V	500
prąd pobierany z sieci (skuteczny)	A	190
moc czynna pobierana z sieci	kW	164,5
moc bierna pobierana z sieci	kVAr	14,1
moc pozorna pobierana z sieci	kVA	164,6
współczynnik mocy	---	0,996
współczynnik sprawności	%	97,2
moc oddawana	kW	160



Rys. 6. Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o mocy  $P=160$  kW z wentylatorem typu WOO 200B

Fig. 6. The 160 kW permanent magnet synchronous motor with the fan type WOO 200B



Rys. 8. Charakterystyki współczynnika sprawności i prądu stojana w funkcji obciążenia silnika indukcyjnego i synchronicznego z magnesami trwałymi

Fig. 8. Induction Motor and Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor (LSPMSM) efficiency factor and current against the load power

## Wnioski

Przedstawione wyniki badań pozwalają 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 1 000 kW.