

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Emil Król

# Nowoczesne silniki z magnesami trwałymi do zastosowań trakcyjnych

**Silniki z magnesami trwałymi są znane już od ponad 150 lat [1], początkowo były to głównie silniki prądu stałego z niskoenergetycznymi magnesami trwałymi. Wraz z rozwojem technologii materiałów magnetycznych, w szczególności magnesów z pierwiastków ziem rzadkich (NdFeB, SmCo) oraz rozwoju energoelektroniki zaczęto produkować silniki z wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi. Początek ekspansji silników z magnesami trwałymi z ziem rzadkich można datować na lata 90. ubiegłego wieku.**

Obecnie silniki z magnesami trwałymi zdobywają coraz większą popularność, głównie dzięki [1]:

- wysokiej sprawności w całym zakresie prędkości obrotowej;
- dużej przeciążalności momentem;
- szerokiemu zakresowi prędkości obrotowej;
- mniejszym wymiarom gabarytowym (w porównaniu do silników indukcyjnych lub silników prądu stałego);
- efektywnej regulacji prędkości obrotowej;
- dużej niezawodności ruchowej w porównaniu do silników prądu stałego (brak węzła szczotkowego).

Spośród silników z magnesami trwałymi można wyróżnić dwie podstawowe grupy:

- bezszczotkowe silniki prądu stałego (BLDC);
- silniki synchroniczne (PMSM).

Coraz to doskonalsze układy sterowania silnikami z magnesami trwałymi oraz doskonałe własności ruchowe samych silników spowodowały, iż coraz częściej silniki prądu stałego z komutatorem mechanicznym oraz asynchroniczne silniki indukcyjne wypierane są przez silniki z magnesami trwałymi [2].

## Budowa i straty silników z magnesami trwałymi

Silniki z magnesami trwałymi w większości bazują na rozkrojach blach stojanów stosowanych w silnikach asynchronicznych. Podyktowane jest to głównie względami ekonomicznymi, jak również dużą dostępnością innych części koniecznych do budowy silnika. Wirniki silników z magnesami trwałymi projektowane są indywidualnie i wykonywane jako lite lub pakietowane z blachy elektromagnetycznej.

Z uwagi na duże podobieństwo budowy pakietów blach stojana i budowy uzwojeń stojanów między silnikami z magnesami trwałymi a silnikami asynchronicznymi, straty w żelazie  $\Delta P_{Fe}$  silnika z magnesami utrzymują się na podobnym poziomie, co w silnikach asynchronicznych zasilanych z przekształtnika energoelektronicznego. Natomiast straty w uzwojeniu stojana  $\Delta P_{Cu}$  są mniejsze, ponieważ silniki z magnesami trwałymi wymagają mniejszej liczby zwojów na fazę przy takim samym napięciu zasilającym. Ze względu na brak uzwojenia w wirniku oraz na pracę synchroniczną straty w wirniku silnika z magnesami trwałymi praktycznie nie występują. Jedynym źródłem strat w wirniku są

straty dodatkowe. Suma strat poszczególnych jest w silniku z magnesami trwałymi mniejsza. Dzięki temu sprawność silnika jest wyższa, a co za tym idzie obciążenia cieplne silników z magnesami są znacznie niższe. Można zaprojektować silnik z magnesami trwałymi tak, aby utrzymać sprawność i inne parametry elektromechaniczne na podobnym poziomie, co w silnikach asynchronicznych, równocześnie zmniejszając ich gabaryty i masę. Można również zaprojektować silnik tak, aby uzyskać znacznie lepsze parametry elektromechaniczne silnika (moc, moment, przeciążalność) przy tych samych wymiarach i masie.

## Silniki z magnesami trwałymi

Silniki z magnesami trwałymi umieszczonymi na wirniku mogą pracować, w zależności od sposobu zasilania i sterowania, jako silniki:

- synchroniczne (PMSM – *Permanent Magnet Synchronous Motor*),
- bezszczotkowe prądu stałego z komutatorem elektronicznym sterowane sinusoidalnie (PMDCBMS – *Permanent Magnet Direct Current Brushless Motor with Sine Control*),
- bezszczotkowe prądu stałego z komutatorem elektronicznym sterowane trapezowo (PMDCBMT – *Permanent Magnet Direct Current Brushless Motor with Trapez Control*).

W każdym z tych przypadków właściwości elektromechaniczne napędu są inne, decyduje o tym rozkład pola magnetycznego w szczeliny silnika oraz sposób zasilania i sterowania. Rozkład pola magnetycznego w silniku powinien być przystosowany do warunków zasilania. W silnikach synchronicznych i silnikach z komutatorem elektronicznym sterowanych sinusoidalnie rozkład przestrzenny indukcji powinien być taki, aby napięcie rotacji



Silnik z magnesami trwałymi o mocy 20 kW wykonany z wykorzystaniem części standardowego silnika asynchronicznego

indukowane w uzwojeniach było zbliżone do sinusoidy, natomiast w silnikach z komutatorem elektronicznym sterowanych trapezowo napięcie rotacji powinno mieć przebieg trapezowy.

Silniki synchroniczne zasilane są napięciem o zadanej (wymuszonej) częstotliwości. Prędkość obrotową silników nastawia się poprzez zmianę częstotliwości. Zmiana napięcia, przy stałej częstotliwości ( $f = \text{const.}$ ) i stałym momencie obciążenia ( $T_{ob} = \text{const.}$ ), powoduje jedynie zmianę mocy biernej silnika. W silnikach bezszczotkowych prądu stałego komutator elektroniczny jest integralną częścią silnika, tak jak komutator mechaniczny w silnikach prądu stałego. Komutator elektroniczny jest zasilany napięciem stałym, w uzwojeniach płynie oczywiście prąd zmienny, lecz jego częstotliwość dopasowuje się do prędkości obrotowej.

Jeśli przy stałej prędkości obrotowej silnika ( $\omega_m = \text{const.}$ ) sterownik PWM (*Power Wide Modulation*) realizuje sinusoidalny przebieg prądu w uzwojeniach silnika (dotyczy wartości średniej w przedziale jednego okresu impulsowania), to silnik jest sterowany sinusoidalnie. Jeśli sterownik PWM realizuje prostokątne (trapezowe) przebiegi prądu w uzwojeniach silnika, to silnik jest sterowany trapezowo.

BOBRME Komel opracował kilka projektów silników z magnesami NdFeB, a Zakład Doświadczalny podjął ich produkcję. Produkowane są 3 typy silników z magnesami trwałymi:

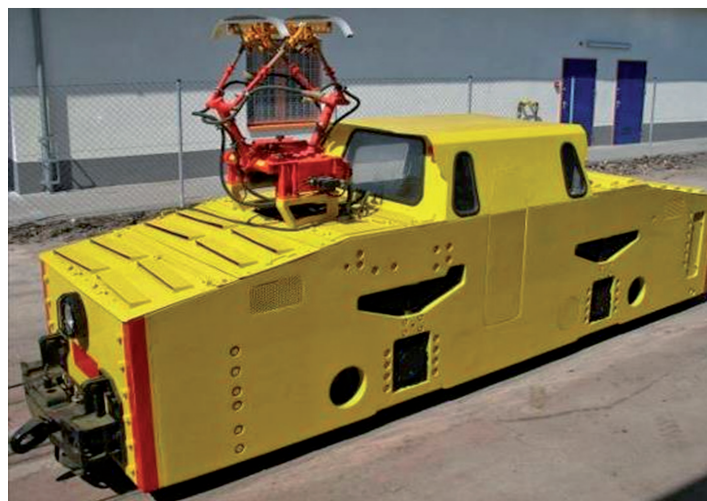
- synchroniczne z magnesami umieszczonymi na powierzchni wirnika (SMz),
- synchroniczne z magnesami umieszczonymi wewnątrz wirnika (SMw),
- prądu stałego, zwane silnikami BLDC.

### Silnik trakcyjny do lokomotywy kopalnianej

W 2005 r. w BOBRME Komel wykonano projekt i dokumentację konstrukcyjną silnika nowej generacji z magnesami trwałymi, przeznaczonego do napędu lokomotyw trakcji dołowej. Silnik typu PMPg 250L o mocy 33/60 kW jest nowoczesnym zamiennikiem stosowanego do tej pory szeregowego silnika prądu stałego LDa 327a. W porównaniu do silnika LDa 327a, silnik PMPg 250L ma większą moc w tym samym gabarycie i znacznie większą przeciążalność momentem, pozbawiony jest węzła szczotkowego, dzięki czemu uzyskuje się znaczne zwiększenie trwałości i niezawodności, skrócenie czasów przestojów, obniżenie kosztu remontów i przeglądów, a zatem znaczne obniżenie kosztów eksploatacyjnych lokomotywy. Moc znamionowa silnika zwiększono z 45/25 kW do 60/33 kW, a równocześnie zmniejszono masę silnika z 645 kg do 572 kg.



Silnik do napędu lokomotywy kopalnianej o mocy 60 kW



Lokomotywa kopalniana



Silnik typu SMz do pojazdu ELIPSA



Pojazd ELIPSA produkowany przez ZNTK Radom



## Silnik do napędu pojazdu ELIPSA

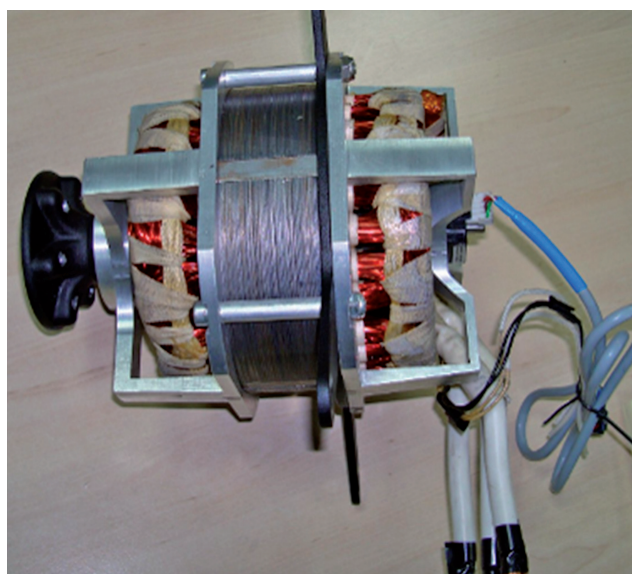
Do napędu pojazdu Elipsa zastosowano silnik prądu stałego z magnesami trwałymi typu SMzt o danych:

- moc znamionowa 2,2 kW,
- napięcie zasilania 48 V,
- prędkość obrotowa 2200 obr./min.

## Silnik z magnesami trwałymi zastosowany do napędu paralotni

Bardzo ciekawym rozwiązaniem charakteryzuje się silnik synchroniczny z magnesami trwałymi typu SMws zastosowany do napędu paralotni. Podstawowe dane silnika:

- moc znamionowa 3,0 kW,
- moc maksymalna 8,0 kW,
- napięcie zasilania 59 V,
- prędkość obrotowa 2400 obr./min.



Silnik elektryczny do napędu paralotni

## Silnik do samochodu elektrycznego „SAM”

Kolejnym nowatorskim rozwiązaniem silnika jest silnik synchroniczny z magnesami trwałymi typu SMzs do napędu samochodu elektrycznego. Silnik charakteryzuje:

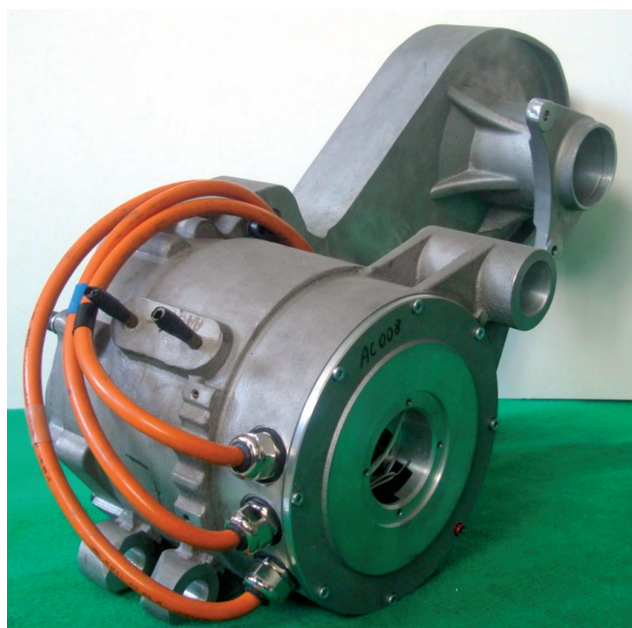
- moc znamionowa 12 kW,
- moc chwilowa 20 kW,
- napięcie zasilania 135 V,
- prędkość obrotowa 0–7000 obr./min.

## Porównanie silnika z magnesami trwałymi i silnika asynchronicznego

Do porównania wykorzystano górniczy silnik asynchroniczny chłodzony wodą o mocy 85 kW i silnik z magnesami trwałymi



Paralotnia z napędem elektrycznym



Napęd samochodu elektrycznego



Samochód elektryczny „SAM”

o identycznych gabarytach również chłodzony wodą, z wirnikiem typu IPM (*Interior Permanent Magnet*, magnesy umieszczone wewnątrz wirnika). Silniki oprócz różnych wirników, różniły się również uzwojeniem stojana. Silnik z magnesami wymagał mniejszej liczby zwojów szeregowych na fazę, dzięki czemu była możliwość wykonania uzwojenia większą liczbą drutów równoległych, co uwidacznia się w rezystancji fazowej silnika oraz mniejszych stratach mocy w uzwojeniu stojana  $\Delta P_{Cu}$ . Przy pracy z obciążeniem znamionowym (85 kW), obciążenie cieplne silnika z magnesami trwałymi było znacznie niższe niż analogicznego silnika asynchronicznego, co przekłada się na większą żywotność izolacji i podzespołów silnika.

Silnik z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika (IPM) ma dwie składowe momentu synchronicznego:

- moment od magnesów;
- moment reluktancyjny.

Maksymalna wartość wypadkowego momentu synchronicznego silnika IPM jest znacznie wyższa, niż maksymalna wartość momentu asynchronicznego (momentu krytycznego) silnika indukcyjnego o tych samych wymiarach części czynnych obwodu elektromagnetycznego. Aby w pełni wykorzystać moment reluktancyjny i moment od magnesów, należy silnik IPM zasilic z przekształtnika z zaimplementowanym algorytmem umożliwiającym nastawianie kąta fazowego położenia wskazu prądu stojana względem osi magnetycznej  $d$  wirnika [3].

W tabelach 1 i 2 zestawiono porównawczo obliczone parametry omawianych silników, indukcyjnego oraz silnika z magnesami trwałymi IPM, przy założeniu, że silnik indukcyjny jest zasilany sinusoidalną falą napięcia, a silnik IPM sinusoidalną falą prądu.

W tabeli 3 zestawiono wyniki obliczeń i gabaryty silników różnych typów: silnika z magnesami trwałymi, silnika indukcyjnego asynchronicznego i silnika indukcyjnego synchronizowanego.

## Podsumowanie

Silniki z magnesami trwałymi mają bardzo dobre właściwości regulacyjne i cechują się dużą sprawnością. Niestety w kraju nadal są bardzo rzadko stosowane w przemyśle. Wszędzie tam, gdzie głównym kryterium doboru silnika jest cena, silniki z magnesami przegrywają na starcie z silnikami asynchronicznymi.

Obecne konstrukcje silników z magnesami trwałymi są ściśle dedykowane dla konkretnego napędu, gdzie najczęściej parametrem priorytetowym jest masa silnika lub gęstość mocy z jednostki objętości. Aby w pełni wykorzystać możliwości silnika z magnesami trwałymi, silnik powinien być zasilony z dedykowanego do niego przekształtnika energoelektronicznego.

Sprawność silników asynchronicznego i silników z magnesami trwałymi zasilanych z przekształtnika energoelektronicznego zależy w dużej mierze od jakości (kształtu) napięcia i prądu, jakim przekształtnik zasila dany silnik.

Mimo wyższej ceny sądzimy, że przyszłość napędów elektrycznych o regulowanej prędkości obrotowej w niedługim czasie będzie opierała się głównie na maszynach z magnesami trwałymi. Ten fakt dodatkowo dopinguje do pracy nad tymi maszynami.

Silniki z magnesami małej i średniej mocy nie stanowią już problemu dla Ośrodka KOMEL zarówno pod kątem projektowym, jak i podstawowej technologii wykonawczej. Kolejnym etapem prac są maszyny dużej mocy.

Tabela 1

### Porównanie wyników obliczeń silnika asynchronicznego i silnika synchronicznego z magnesami trwałymi (dla takiej samej mocy znamionowej)

Parametr	Silnik		
	asynchroniczny	PMSM	
$P_1$	[kW]	91,8	88,7
$P_n$	[kW]	<b>85,0</b>	<b>85,0</b>
$U_n$	[V]	480,0	480,0
$I_n$	[A]	130,0	128,0
$n$	[obr./min]	1470,0	1500,0
$f$	[Hz]	50,0	50,0
$\eta$	[%]	<b>92,6</b>	<b>95,8</b>
Masa miedzi uzw. stojana	[kg]	39,0	36,0
$\Delta P_{Cu}$	[kW]	4,2	1,1
$\Delta P_m$	[kW]	1,0	1,0
$\Delta P_{Fe}$	[kW]	1,2	1,2
$\Delta P_d$	[kW]	0,4	0,4
$\Sigma \Delta P$	[kW]	6,8	3,7



Silnik górniczy o mocy 85 kW

Tabela 2

### Porównanie wyników obliczeń silnika asynchronicznego i silnika synchronicznego z magnesami trwałymi dla sumy strat jak w silniku asynchronicznym

Parametr	Silnik		
	asynchroniczny	PMSM	
$P_1$	[kW]	91,8	140,0
$P_n$	[kW]	<b>85,0</b>	<b>135,0</b>
$U_n$	[V]	480,0	480,0
$I_n$	[A]	130,0	195,0
$n$	[obr./min]	1470,0	1500,0
$f$	[Hz]	50,0	50,0
$\eta$	[%]	<b>92,6</b>	<b>96,5</b>

Tabela 3

### Porównanie parametrów obliczeniowych różnych typów silników o mocy 1250 kW

Parametr	PMSM	Indukc.	SAS1832s	
$P_n$	[kW]	1250,0	1250,0	1250,0
$U_n$	[V]	6000,0	690,0	6000,0
$I_n$	[A]	180,0	1746,0	144,0
$n$	[obr./min]	187,5	185,6	187,5
$f$	[Hz]	37,5	50,0	50,0
$\eta$	[%]	<b>96,4</b>	<b>93,6</b>	<b>93,4</b>
$D_s$	[mm]	1250,0	1640,0	2860,0
$L_{Fe}$	[mm]	1050,0	1050,0	1520,0

## Literatura

- [1] Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [2] Rossa R., Król E.: *Modern electric machines with permanent magnets*. Przegląd Elektrotechniczny 12/2008.
- [3] Rossa R.: *Zastosowanie metody polowo-obwodowej do obliczania parametrów silników synchronicznych z magnesami trwałymi przy pracy synchronicznej*. Zeszyty problemowe BOBRME Komel 72/2005.

Jakub Bernatt

Stanisław Gawron

Emil Król

Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL  
info@komel.katowice.pl

Referat wygłoszony na Konferencji MET 2009 w Gdańsku, przekazany do publikacji przez organizatorów konferencji.