

Ignacy DUDZIKOWSKI,  
Valdemar STACHOWIAK

Instytut Układów Elektromaszynowych  
Politechniki Wrocławskiej

## ANALIZA PORÓWNAWCZA PARAMETRÓW MASZYN PRĄDU STAŁEGO WZBUDZANYCH MAGNESAMI TRWAŁYMI

**Streszczenie.** Zamieszczone wyniki obliczeń silników prądu stałego o mocach 0,8; 3,7; 7,5; 22 i 50 kW wzbudzanych ferrytowych magnesami trwałymi oraz magnesami z metali pierwiastków ziem rzadkich. Porównano parametry obliczonych maszyn z parametrami aktualnie produkowanych maszyn wzbudzanych elektromagnetycznie o tych samych mocach i napięciu zasilania. Opracowano analizę porównawczą mas, objętości, kosztów wytwarzania i kosztów eksploatacji obliczonych maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi oraz maszyn produkowanych o wzbudzeniu elektromagnetycznym. Analiza dotyczy maszyn budowy zamkniętej przeznaczonych do pracy ciągłej zasilanych napięciem  $U = 220$  V.

### 1. WSTĘP

W ostatnich latach w Polsce rozwinęła się produkcja mikromaszyn prądu stałego wzbudzanych magnesami ferrytowymi. Ich produkcja osiąga rocznie kilka milionów sztuk. Produkowane są również na licencji firmy H.K.Porter maszyny specjalne do napędu posuwu obrabiarek [6]. Brak jest natomiast produkcji maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi, przeznaczonych do ogólnego zastosowania. Tymczasem na świecie produkowane są silniki prądu stałego o mocy dochodzącej do kilkuset kW. Silniki prądu stałego, wzbudzone magnesami trwałymi o mocy do 10 kW, produkowane są od 1963 r. Od 1973 r. producenci oferują silniki na napięciu 230 V o mocy do 100 kW [4]. Silniki wzbudzone magnesami trwałymi nadają się szczególnie do współpracy z regulowanymi prostownikowymi źródłami zasilania. Wynika to z możliwości ograniczenia prądu rozruchowego i tym samym uniknięcia niebezpieczeństwa rozmagnesowania. Należy także podkreślić łatwość regulacji i liniowość charakterystyk momentu i prędkości w funkcji prądu.

W niniejszej pracy zamieszczone wyniki elektromagnetycznych obliczeń silników o mocy 0,8; 3,7; 7,5; 22 i 50 kW wzbudzanych anizotropowymi magnesami ferrytowymi oraz magnesami z metali pierwiastków ziem rzadkich ( $\text{CeMmG}_{0,5}$ ). Porównano objętości, masy materiałów elektromagnetycznie czynnych i koszty produkcji maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi z parametrami aktualnie produkowanych maszyn o tych samych mocach, napięciach i prędko-

kościach znamionowych, wzbudzanych elektromagnetycznie. Analizę kosztów wytwarzania ograniczono do maszyn o mocy 0,8 - 7,5 kW.

## 2. WŁASNOŚCI WSPÓLCZESNYCH MATERIAŁÓW MAGNETYCZNIE TWARDYCH

Współcześnie, wiele firm produkuje różnorodne gatunki magnesów. Magnesy te podzielić można na cztery grupy: magnesy typu Alnico, magnesy ferrytowe, magnesy z metali pierwiastków ziem rzadkich oraz ze stopu Pt-Co.

Tablica I

Porównanie parametrów i cen magnesów różnych gatunków [1,5]

Lp.	Materiał	$B_r$ T	$H_0$ kA/m	$(BH)_{max}$ kJ/m <sup>3</sup>	Cena SFr/kg	Uwagi
1	Ferryt strontu	0,2-0,39	132-263	8-27	3-5	koszt materiału i produkcji
2	Alnico	0,6-1,3	45-116	10-56	10-300	-"-
3	PtCo	0,6	364	64	35000- -40000	-"-
4	CeMMCo <sub>5</sub>	0,78	536	108	50	koszt materiału
5	SmCo <sub>5</sub>	0,87	680	144	800	-"-

W tablicy I zestawiono parametry i ceny (we frankach szwajcarskich) różnych gatunków magnesów. Z porównania danych wynika, że magnesy ferrytowe są około 40 razy tańsze od magnesów typu Alnico. Z kolei magnesy z pierwiastków ziem rzadkich są 2-5 razy droższe od Alnico. Nie dotyczy to magnesu CeMMCo<sub>5</sub><sup>x</sup>, który mając korzystniejsze parametry od Alnico jest trzykrotnie tańszy od tego materiału. Według Jokscha [5] najbardziej obiektywnym wskaźnikiem ekonomicznym jest cena magnesu na jednostkę strumienia magnetycznego. Również pod tym względem magnesy ferrytowe są najtańsze. Ich koszt jest 20 razy niższy od magnesów Alnico i 60 razy od magnesów z materiału SmCo<sub>5</sub>. Pod względem wymagań technicznych najbardziej miarodajne są dwa parametry: natężenie koeroji  $H_0$  i iloczyn  $(BH)_{max}$ . Magnesy ferrytowe mają natężenie koeroji kilkakrotnie większe niż Alnico, zaś iloczyn  $(BH)_{max}$  porównywalny. Dobre parametry i własności fizyczne, niska cena oraz prostoliniowość charakterystyki odmagnesowania  $B = f(H)$  zdecydowały o tym, że od 1970 r. faworyzowanymi przez producentów maszyn są magnesy ferrytowe. Ich rola będzie się utrzymywać lub nawet wzrastać. Wynika

<sup>x</sup> MM - metal mieszany - stop będący mieszaniną pierwiastków ziem rzadkich

Tablica II

Wyniki obliczeń maszyn wzbudzonych magnesami trwałymi oraz dane produkcyjnych maszyn o wzbudzeniu elektromagnetycznym

A - wzbudzenie elektromagnetyczne, B - wzbudzenie magnesem ferrytowym, C - wzbudzenie magnesem Ce/HfCo<sub>5</sub>

Lp.	Wielkość	Wymiar	Moc maszyn [kW]														
			0,8			3,7			7,5			22			50		
			A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	P		0,8	0,8	0,8	3,7	3,7	3,7	7,5	7,5	7,5	22	22	22	50	50	50
2	U	V	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220	220
3	I	A	4,74	4,51	4,1	19,4	18,4	18,7	39,3	36,8	37,9	115,6	113,6	110	254	250	245
4	n	1/min	3000	2980	2994	2920	2970	3068	2970	2961	2996	650	670	649	575	578	575
5	n	%	76,6	80,4	87,8	84,7	91,5	89,8	86,7	92,5	90	86,5	88	90,7	90	91,5	92,6
6	Rodzaj pracy	-	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1	S1
7	Klasa izolacji	-	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B	B
8	B <sub>f</sub>	T	-	0,38	0,65	-	0,36	0,68	-	0,37	0,68	-	0,32	0,74	-	0,33	0,67
9	ΣΔP	W	252	194,8	110,6	668	34,3	422	982	600	838	3434	3008	2266	5870	4623	3989
10	D <sub>21</sub>	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	0,5	0,4	0,34	1,44	1,0	1,05	3,82	2,67	2,17	14,4	29,4	17,8	40,5	90,7	60
11	D <sub>23</sub>	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	6,83	2,47	1,55	15,5	7,33	2,75	33,2	10,2	6,1	96	72	45	320	229	178
12	G <sub>Co</sub>	kg	2,98	1,24	0,83	10,0	3,06	2,06	23,6	7,2	3,04	83,2	35	13,0	351	72,7	31,6
13	G	kg	16,07	6,09	5,69	53	13,69	10,8	87,2	24,9	20,8	369,7	193,4	168,2	1067	607	535
14	Δt <sup>o</sup>	°C	-	50	55	-	52	58	-	60	55	-	90	99	-	51	58

Tablica III

Zestawienie kosztów maszyny o mocy 7,5 kW wzbudzonej elektromagnetycznie i magnesami ferrytowymi

Lp.	Szt.	Nazwa zespołu lub części	Wzbudzenie elektromagnet.			Wzbudzenie magnesami trwałymi		
			materiał	robocizna	razem	materiał	dobocizna	razem
1	1	Kadłub	610,87	37,44	648,31	51	37	88
2	4	Biegun główny uzwoj.	1186,80	76,24	1263,04	-	-	-
3	4	Biegun z magnesów trwałych	-	-	-	508	10	518
4	4	Biegun komutacyjny uzwojony	630,24	25,84	656,08	-	-	-
5	1	Wymiennik ciepła	135,80	2,99	138,79	27	4	31
6	1	Tarcza łożyskowa pK	145,00	7,98	152,98	55	6	61
7	1	Tarcza łożyskowa K	130,00	8,29	138,29	50	7	57
8	1	Uzwojenie wirnika	563,95	19,50	583,45	703	20	723
9	1	Pakiet wirnika	873,60	34,32	907,92	611	31	642
10	1	Komutator	707,75	57,47	765,22	315	28	343
11	-	Zespoły i części wspólne	1157,85	180,35	1338,20	1158	180	1338
Maszyna kompletna			6281,86	450,42	6732,28	3478	323	3801
					100%			56%

Tablica IV

Koszty wytwarzania maszyn wzbudzanych elektromagnetycznie (A) i magnesami ferrytowymi (B)

Koszty	Dane maszyny		0,8 kW		3,7 kW		7,5 kW	
	A	B	A	B	A	B	A	B
Materiały	1589,5	1096	2941,6	2160	6281,8	3478		
Robocizna	211,3	180	318	223	450,4	323		
Maszyna kompletna	1800,8	1276	3259,6	2383	6732	3801		
	100%	71%	100%	73%	100%	56%		

to stąd, że surowce do ich produkcji są powszechnie dostępne, a niezależnie od fluktuacji cen materiałów na rynkach światowych, ceny żelaza i miedzi stale rosną [7] w stosunku do cen magnesów ferrytowych. Należy także zwrócić uwagę na zwiększające się znaczenie magnesów z metali pierwiastków ziem rzadkich, szczególnie w zastosowaniu do maszyn, w których głównym wymaganiem jest minimalna masa i objętość, a koszty wytwarzania mają znaczenie drugorzędne.

### 3. WYNIKI ELEKTROMAGNETYCZNYCH OBLICZEŃ SILNIKÓW WZBUDZANYCH MAGNESAMI TRWAŁYMI

Obliczenia wykonano dla silników budowy zamkniętej o mocach 0,8...50 kW, przeznaczonych do pracy ciągłej o napięciu znamionowym 220 V. Napięcie zasilania, moce, prędkości znamionowe i klasa izolacji obliczanych maszyn z magnesami trwałymi są takie same jak produkowanych aktualnie i porównywanych maszyn wzbudzanych elektromagnetycznie. W obliczeniach silników wzbudzanych magnesami ferrytowymi korzystano z katalogowych magnesów firmy Philips [8] oraz z magnesów stosowanych w licencyjnym silniku firmy H.K. Porter.

W tabelicy II zamieszczono wyniki obliczeń elektromagnetycznych maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi oraz dane produkowanych maszyn o wzbudzeniu elektromagnetycznym. Projektowane maszyny miały konstrukcję z magnesem stanowiącym biegun bez-nabiegownika. Obliczenia obwodu magnetycznego wykonano według sposobu przedstawionego w pracy [2]. Porównywane maszyny wzbudzone magnesami trwałymi nie były optymalizowane.

W tabelicy III zamieszczono zestawienie kosztów produkcji maszyny o mocy 7,5 kW dla obydwóch rodzajów wzbudzenia, a w tabelicy IV podano koszty materiałów i koszty robocizny pozostałych maszyn. Analizę kosztów wytwarzania ograniczono do maszyn o zakresie mocy 0,8...7,5 kW. Analizę tę opracowano w Zakładzie Maszyn Komutatorowych Branżowego Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Maszyn Elektrycznych w Katowicach w trakcie realizacji wspólnej pracy [3] z Instytutem Układów Elektromaszynowych Politechniki Wrocławskiej. Koszty wytwarzania maszyn wzbudzanych magnesami trwałymi określono dla warunków zakładu produkującego maszyny o wzbudzeniu elektromagnetycznym.

### 4. ANALIZA WYNIKÓW

W tabelicy V porównano główne parametry, wymiary i masy porównywanych maszyn. Jak wynika z porównania zastosowanie magnesów ferrytowych w maszy-

Tablica IV

Porównanie parametrów, wskaźników olejorowych i objętościowych maszyn o tej samej mocy przy różnym wzbudzeniu  
 A - wzbudzenie elektromagnetyczne, B - wzbudzenie magnetycznym, C - wzbudzenie magnetycznym z  $CeMCo_5$

Lp.	Wielkość	Moc maszyny [kW]														
		0,8			3,7			7,5			22			50		
		B/A	C/A	C/B	B/A	C/A	C/B	B/A	C/A	C/B	B/A	C/A	C/B	B/A	C/A	C/B
1	Zmiana sprawności $k_{\eta} = \eta/\eta_0$	1,05	1,146	1,09	1,08	1,06	0,98	1,07	1,04	0,97	1,02	1,05	1,04	1,02	1,03	1,02
2	Zmniejszenie objętości $(D^2 \cdot l)$ $k_V = \frac{D^2 \cdot l}{D_0^2 \cdot l_0}$	0,36	0,23	0,627	0,47	0,18	0,375	0,31	0,18	0,598	0,75	0,468	0,625	0,71	0,556	0,777
3	Zmniejszenie masy materiałów elektromagnetycznych $k_G = \frac{G'}{G}$	0,38	0,35	0,934	0,26	0,2	0,788	0,29	0,24	0,834	0,52	0,454	0,87	0,57	0,50	0,88
4	Zmniejszenie masy miedzi $k_{Cu} = \frac{G'_{Cu}}{G_{Cu}}$	0,416	0,28	0,669	0,31	0,2	0,673	0,30	0,13	0,423	0,41	0,15	0,37	0,21	0,09	0,43

mach prądu stałego w porównaniu z maszynami wzbudzanymi elektromagnetycznie daje następujące korzyści:

- sprawność maszyn wzrasta o 2...8%,
- masa miedzi zmniejsza się o 58...79%,
- masa materiałów czynnych elektromagnetycznie (bez komutatora) ulega zmniejszeniu o 43...74%,
- objętość zewnętrzna zmniejsza się o 25...64%,
- koszt wykonania maszyn w zakresie mocy 0,8...7,5kW zmniejsza się o 29...46%.

Zmniejszają się koszty eksploatacji maszyny na skutek zwiększenia sprawności; np. dla maszyny o mocy 3,7 kW oszczędność energii w ciągu 5000 godzin pracy wynosi 1625 kWh, co stanowi około 50% kosztów produkcji maszyny.

Z porównania parametrów maszyn wzbudzanych magnesami ferrytowymi i magnesami z metali pierwiastków ziem rzadkich wynika, że zastosowanie tych ostatnich daje następujące efekty:

- objętość zewnętrzna ulega zmniejszeniu o 32...62%,
- masa materiałów czynnych elektromagnetycznie (bez komutatora) ulega zmniejszeniu o 7...21%,
- masa miedzi ulega zmniejszeniu o 33...49%,
- przyrost sprawności jest stosunkowo mały lub nawet występuje jej zmniejszenie na skutek wzrostu strat w żelazie,
- wstępnie oszacowany koszt maszyn wzbudzanych magnesami z metali pierwiastków ziem rzadkich (dla zakresu mocy 0,8...7,5 kW) jest około 40...50% wyższy od kosztu maszyn wzbudzanych magnesami ferrytowymi.

## 5. WNIOSKI

1. Stosowanie magnesów trwałych w maszynach prądu stałego należy uznać za celowe zarówno ze względów technicznych, jak i ekonomicznych w całym zakresie analizowanych mocy.
2. Zastosowanie anizotropowych magnesów ferrytowych daje zdecydowane zmniejszenie zewnętrznej objętości maszyny, masy materiałów elektromagnetycznie czynnych oraz kosztów wytwarzania i eksploatacji.
3. Zastosowanie magnesów z metali pierwiastków ziem rzadkich powoduje dalszą poprawę wskaźników objętościowych i ciężarowych, przy jednoczesnym zwiększeniu kosztów wytwarzania wynikających z ceny magnesów.

## LITERATURA

- [1] Baohman K.: Permanent magnets. Enginiering materials and design. May 1973.
- [2] Dudzikowski I.: Metoda obliczania obwodu magnetycznego maszyn prądu stałego wzbudzanych magnesami trwałymi. Referat na konf. "Maszyny elektryczne o magnesach trwałych". Katowice 9-11.X.1979.
- [3] Dudzikowski I., Karwaicki W., Kłosiński J.: Analiza możliwości i celowości opracowania odmiany maszyn elektrycznych serii Po z magnesami trwałymi w zakresie wielkości mechanicznej 160. Raport nr 162 Inst. Uki. Elektromaszynowych PWr 1977.
- [4] Farley J.E.: Application of Permanent Magnet DC Motors at Republic Steel's 84-ia Hot Strip Mill. IEEE TRANSACTION ON INDUSTRY. Vol. IA-9. No 2 1973.
- [5] JOKSCH H.: Die Dauermagnetenwicklung vom Kohlenstoffstahl bis zum Samarium-Kobalt. Feinwerktechnik + micronic 77. 1973. Heft 8.
- [6] Koźmian J., Gryko S.: Konstrukcja i technologia silników prądu stałego na licencji H.K. Porter Maszyny elektryczne - Zeszyty Problemowe Nr 27/1978. Katowice.
- [7] Philips Technical note 005.
- [8] Philips Catalogue. Permanent magnet materials. 1977.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Władysław Mizia

Wpłynęło do redakcji 5.IV.1982 r.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА,  
ВОЗБУЖДАЕМЫХ ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Р е з ю м е

В работе приведены результаты расчетов двигателей постоянного тока мощностью 0,8; 3,7; 7,5; 22 и 50 кВт, возбуждаемых ферритовыми постоянными магнитами, а также магнитами из редкоземельных металлов. Сопоставлены параметры рассчитанных машин с параметрами изготавливаемых в настоящее время электрически возбуждаемых машин таких же мощностей и таким же напряжением питания. Разработан сравнительный анализ масс, объема, затрат на производство и на эксплуатацию рассчитанных машин, возбуждаемых постоянными магнитами, а также машин, изготавливаемых с электромагнитным возбуждением. Анализ относится к машинам замкнутого строения, предназначенным для непрерывной работы питаемым напряжением  $U = 220$  В.



A COMPARATIVE ANALYSIS OF PARAMETERS  
OF D.C. MACHINES EXCITED WITH PERMANENT MAGNETS

S u m m a r y

Results of calculations of d.c. motors of 0,8; 3,7; 7,5; 22 and 50 kW power excited with ferrite permanent magnets and magnets made of rare-earth metals are presented. Parameters of the calculated machines are compared with the currently produced electromagnetically excited machines of the same powers and supply voltages. A comparative analysis of the bulk, the volume and the producing and exploitation costs of the calculated permanent magnet excitation machines and of the currently produced machines with electromagnetic excitation is conducted. The analysis can be applied to close-structure machines designed for continuous running and supplied with voltage  $U = 220$  V.