

Marcin Wardach
Politechnika Szczecińska, Szczecin

BADANIE MASZYNY ELEKTRYCZNEJ Z MAGNESAMI TRWAŁYMI I KLINAMI MAGNETYCZNYMI

RESEARCH OF PM MACHINE WITH MAGNETIC WEDGES

Abstract: The article presents results of simulating research concerning magnetic circuit in cylindrical electrical machines with permanent magnets. In this work the magnetic wedges which should minimize electromagnetic torque's pulsations had been provided. The aim of the investigation was to find the optimal value of wedges' magnetic permeability, for which pulsations are the smallest without decreasing average value of electromagnetic torque. Unsuccessful effect of using magnetic wedges is lost a part of generated in windings magnetic flux due to its flow across this wedges. All researches have been carried out using computer programs named Matlab and Comsol. Conclusion of researches is that when a wedges' magnetic permeability increases, pulsations and cogging torque decreases. But too high value of this parameter causes decreasing value of electromagnetic torque. According to another researches author states that in different magnetic circuits of electrical machines there are changing pulsations in machine during changing value of wedges' permeability. The degree of pulsations decreasing depends mostly on numbers of slots to one pole and phase and proportion air gap thickness to width of pole pitch. So if we want to find an optimal value of magnetic wedges' permeability we should do separately research in each magnetic circuit structure.

1. Wstęp

W referacie zaprezentowano wybrane wyniki badań symulacyjnych obwodu magnetycznego cylindrycznej maszyny elektrycznej wzbudzonej od magnesów trwałych, w którym zastosowano kliny magnetyczne zamykające żłobki.

Głównym źródłem pulsacji momentu elektromagnetycznego w uzłobkowanych maszynach elektrycznych z magnesami trwałymi jest bardzo duża różnica reluktancji obszarów przyszczelinowych zęba i żłobka, która powoduje powstanie stosunkowo dużych momentów zaczepowych. Są one bardzo niekorzystnym zjawiskiem gdyż generują drgania mechaniczne, hałas oraz straty mocy. Wszystko to wiąże się z większym zużyciem elementów konstrukcyjnych jak i energii elektrycznej. Wynika więc stąd potrzeba ich ograniczania. Pulsacje momentu elektromagnetycznego można ograniczać zmniejszając moment zaczepowy [1, 2].

W pracy zaproponowano zastosowanie klinów magnetycznych, których zadaniem jest zmniejszenie pulsacji momentu elektromagnetycznego. Celem badań było wyznaczenie optymalnej wartości przenikalności magnetycznej klinów, dla której pulsacje momentu elektromagnetycznego są jak najmniejsze przy warunku zachowania jego wartości średniej.

Wszystkie badania symulacyjne przeprowadzono przy użyciu programów komputerowych Matlab-Comsol.

2. Kliny magnetyczne

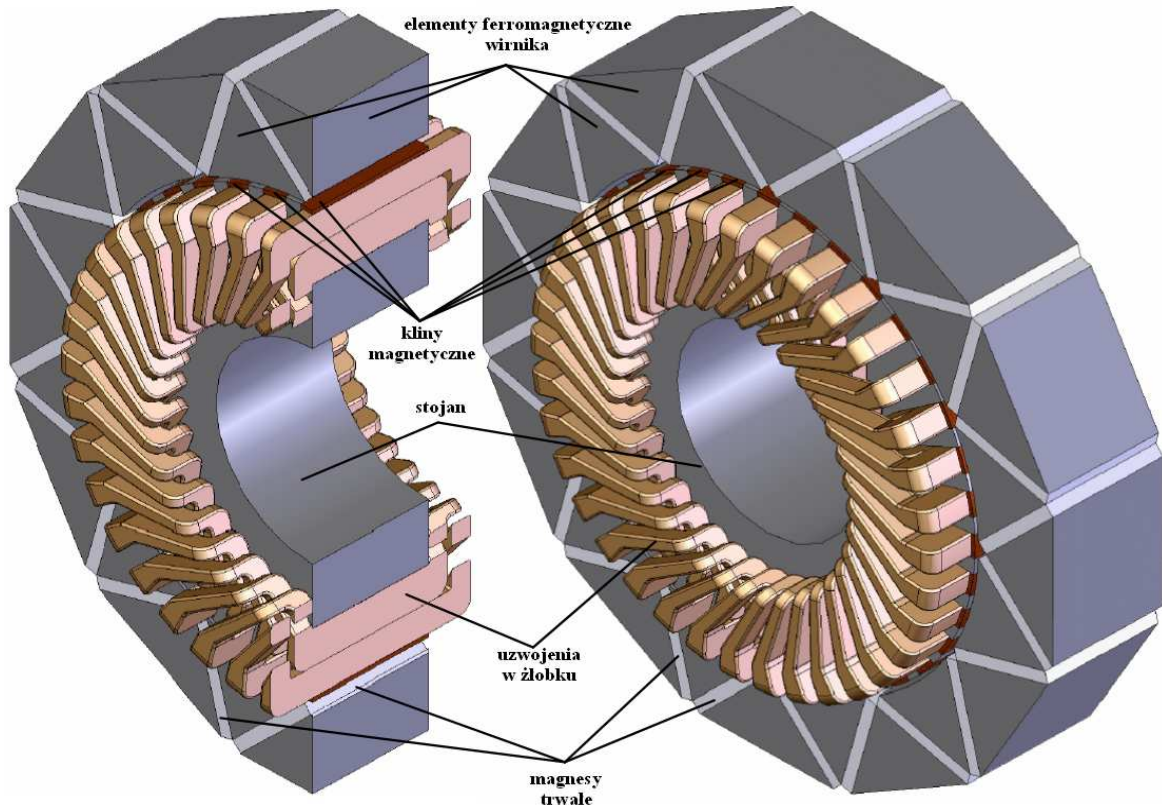
Kliny magnetyczne mogą być wykonane z proszku magnetycznego oraz dielektryku izolującego i łączącego cząsteczki magnetyczne [3]. Tego typu elementy spełniają podwójną rolę w obwodzie magnetycznym maszyny:

- mechaniczną – utrzymują uzwojenia w żłobkach
- magnetyczną – stanowią dodatkową drogę dla strumienia magnetycznego od obwodu wzbudzenia, dzięki czemu podwyższa się wartość średnia indukcji wzbudzenia

Negatywnym efektem zastosowania klinów magnetycznych jest to, że część strumienia magnetycznego od zasilanych prądem elektrycznym uzwojeń jest tracona, gdyż zamyka się właśnie przez te kliny. Wynika stąd konieczność doboru optymalnej wartości przenikalności magnetycznej klinów, dla której pulsacje będą minimalne, a moment elektromagnetyczny możliwie wysoki.

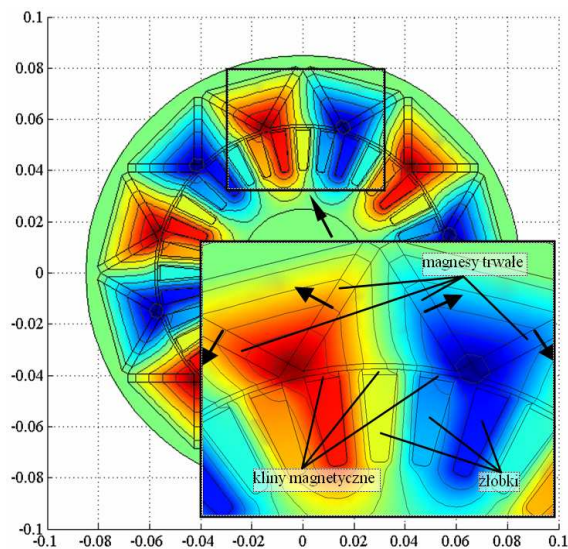
3. Model maszyny elektrycznej z klinami magnetycznymi

Badaniom symulacyjnym poddano obwód magnetyczny maszyny elektrycznej, której elementy aktywne (stojan i wirnik) przedstawiono na rysunku 1, natomiast strukturę modelu symulacyjnego prezentuje rysunek 2. Struktura ta składa się ze stojana z 36 żłobkami oraz zewnętrznego wirnika z 24 magnesami trwałymi



Rys. 1. Model maszyny elektrycznej wzbudzonej od magnesów trwałych z wirnikiem zewnętrznym i klinami magnetycznymi w stojanie

o namagnesowaniu jak pokazano w powiększeniu na rysunku 2. Jest to więc struktura z 12 biegunami. Zastosowano w niej magnesy trwałe o wymiarach w przekroju 3 x 26 mm.



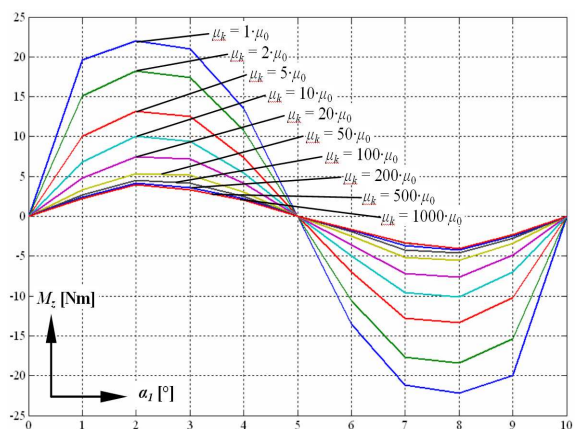
Rys. 2. Struktura maszyny elektrycznej wzbudzonej od magnesów trwałych z wirnikiem zewnętrznym i klinami magnetycznymi w stojanie

W badaniach przyjęto, że pozostałość magnetyczna użytych magnesów trwałych wynosi

$B_r = 1.23$ T. Wewnętrzny promień stojana wynosi $R_s = 57$ mm, natomiast wewnętrzny wirnika $R_r = 58$ mm, czyli szczelina powietrzna stanowi $\delta = 1$ mm. Przyjęto, że długość osiowa maszyny wynosi $l = 0.03$ m.

4. Moment zaczepowy

Moment zaczepowy w badanej strukturze wyznaczono co jeden stopień obrotu wirnika zewnętrznego w przedziale $\alpha_l = (0 \div 10^\circ)$.



Rys. 3. Rozkłady momentu zaczepowego dla różnych wartości przenikalności klinów

W badaniach przyjęto założenie upraszczające, że przenikalność klinów magnetycznych jest stała ($\mu_k = \text{const.}$) dla każdego natężenia pola magnetycznego. Wyniki symulacji przedstawia rysunek 3 oraz w tabeli 1.

W tabeli 1 w celu porównania wyników wprowadzono kolumnę średnich wartości momentu zaczepowego $M_{z\text{sr}}$ w przedziale $\alpha_1 = (0 \div 5^\circ)$ oraz kolumnę względnych parametrów momentu zaczepowego m_z , które zdefiniowano jako stosunek średnich z poszczególnych badań do średniej uzyskanej w badaniu przy $\mu_k = 1 \cdot \mu_0$.

Tabela 1.
Moment zaczepowy

L.p.	μ_k [V·s/A·m]	$M_{z\text{max}}$ [Nm]	$M_{z\text{sr}}$ [Nm]	m_z [%]
1.	$1 \cdot \mu_0$	22.04	13,9	100
2.	$2 \cdot \mu_0$	18.27	11,2	81
3.	$5 \cdot \mu_0$	13.15	7,9	57
4.	$10 \cdot \mu_0$	10.07	5,8	42
5.	$20 \cdot \mu_0$	7.44	4,3	31
6.	$50 \cdot \mu_0$	5.31	3,0	22
7.	$100 \cdot \mu_0$	4.48	2,5	18
8.	$200 \cdot \mu_0$	4.14	2,2	16
9.	$500 \cdot \mu_0$	3.95	2,1	16
10.	$1000 \cdot \mu_0$	3.93	2,1	15

Z rysunku 3 i tabeli 1 wynika, że zastosowanie klinów magnetycznych pozwala na zmniejszenie momentu zaczepowego.

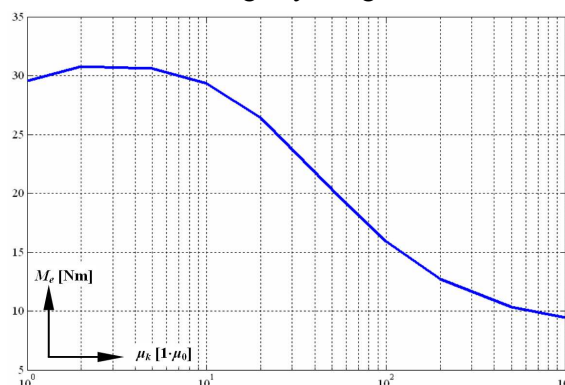
5. Moment elektromagnetyczny

Jak wspomniano we wstępie, w obwodach z klinami magnetycznymi część strumienia magnetycznego od zasilanych uzwojeń jest dodatkowo tracona, gdyż zamyka się on przez kliny.

Tabela 2.
Moment elektromagnetyczny

L.p.	μ_k [V·s/A·m]	$M_{e\text{max}}$ [Nm]	m_e [%]
1.	$1 \cdot \mu_0$	29.6	100
2.	$2 \cdot \mu_0$	30.8	104
3.	$5 \cdot \mu_0$	30.6	103
4.	$10 \cdot \mu_0$	29.4	99
5.	$20 \cdot \mu_0$	26.4	89
6.	$50 \cdot \mu_0$	20.3	69
7.	$100 \cdot \mu_0$	15.9	54
8.	$200 \cdot \mu_0$	12.7	43
9.	$500 \cdot \mu_0$	10.3	35
10.	$1000 \cdot \mu_0$	9.5	32

W związku z tym konieczne było wykonanie badań pod względem rozwijanego momentu elektromagnetycznego. W badaniach symulacyjnych przyjęto, że gęstość prądu w żłobkach wynosi $j = 5 \text{ A/mm}^2$. Wyniki umieszczono w tabeli 2. Z powyższych badań wynika, że moment elektromagnetyczny znacznie zależy od przenikalności magnetycznej klinów magnetycznych. Kliny magnetyczne mogą spowodować zarówno podwyższenie jak i obniżenie momentu elektromagnetycznego.

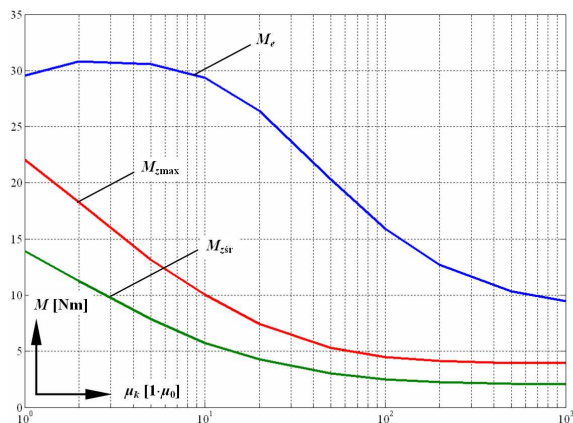


Rys. 4. Momentu elektromagnetyczny w zależności od przenikalności magnetycznej klinów

Na rysunku 4 przedstawiono graficznie zależność momentu elektromagnetycznego od przenikalności magnetycznej klinów. Z rysunku tego można wywnioskować, że dla niskich przenikalności magnetycznych klinów – w przedziale $\mu_k = (2 \div 10) \cdot \mu_0$ wypadkowy moment elektromagnetyczny może być taki sam lub nawet wyższy niż bez stosowania klinów magnetycznych, tj. gdy $\mu_k = 1 \cdot \mu_0$.

6. Zestawienie pomiarów momentów

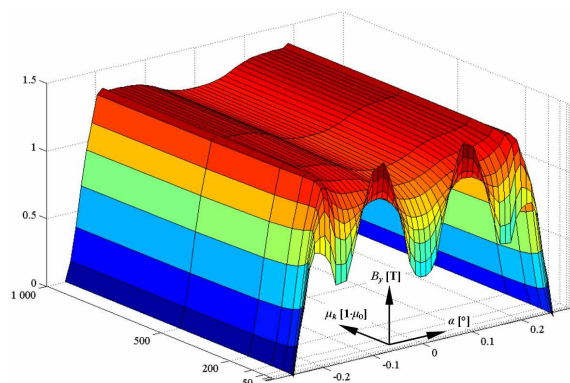
Rysunek 5 wykonano na podstawie danych z tabel 1 i 2. Przedstawia on zależność momentu elektromagnetycznego, wartości maksymalnej oraz średniej jednego półokresu przebiegu momentu zaczepowego na szerokości jednego zęba i żłobka w zależności od przenikalności magnetycznej klinów. Patrząc na rysunek 5 i wcześniejsze wyniki pomiarów momentów można zauważyć, że w przedziale przenikalności magnetycznych klinów, dla których są największe spadki momentu zaczepowego, występuje największy moment elektromagnetyczny. Ponadto zastosowanie klinów magnetycznych już o niewielkiej wartości przenikalności magnetycznej klinów rzędu $\mu_k = 10 \cdot \mu_0$ pozwala na zmniejszenie momentu zaczepowego o ok. 60% przy praktycznie niezmienionej wartości momentu elektromagnetycznego.



Rys. 5. Moment elektromagnetyczny oraz zaczepowy maksymalny i średni w zależności przenikalności magnetycznej klinów

7. Rozkład indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej

Następnym etapem badań było wyznaczenie rozkładu indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej. Na podstawie symulacji komputerowych w programach Comsol i Matlab wyznaczono wspomniane rozkłady w zależności od przenikalności magnetycznej klinów. Rezultaty przedstawia rysunek 6. Jedną z osi poziomych reprezentuje przenikalność magnetyczną klinów, druga – punkty na łuku pośrodku szczeliny powietrznej na szerokości jednej podziałki biegunowej maszyny, natomiast oś pionową stanowi indukcja magnetyczna.



Rys. 6. Rozkład indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej w zależności od przenikalności magnetycznej klinów

W tabeli 3 zestawiono średnie wartości indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej odpowiednio dla kolejnych wartości przenikalności magnetycznych klinów podanych w kolumnie drugiej.

Tabela 3.

Średnia wartość indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej

L.p.	μ_k [V·s/A·m]	$B_{y\text{sr}}$ [T]	b_y [%]
1.	$1 \cdot \mu_0$	0,82	100
2.	$2 \cdot \mu_0$	0,86	105
3.	$5 \cdot \mu_0$	0,91	111
4.	$10 \cdot \mu_0$	0,94	115
5.	$20 \cdot \mu_0$	0,98	119
6.	$50 \cdot \mu_0$	1,03	126
7.	$100 \cdot \mu_0$	1,06	130
8.	$200 \cdot \mu_0$	1,08	132
9.	$500 \cdot \mu_0$	1,10	134
10.	$1000 \cdot \mu_0$	1,11	135

Z tabeli tej wynika, że im większa wartość przenikalności klinów magnetycznych, tym wyższa wartość średnia indukcji magnetycznej w szczelinie.

Następnie wyznaczono współczynniki pulsacji indukcji magnetycznej p_B , które zostały wyliczone analogicznie do współczynnika pulsacji momentu elektromagnetycznego, spotykanego w literaturze – np. [4], według wzoru:

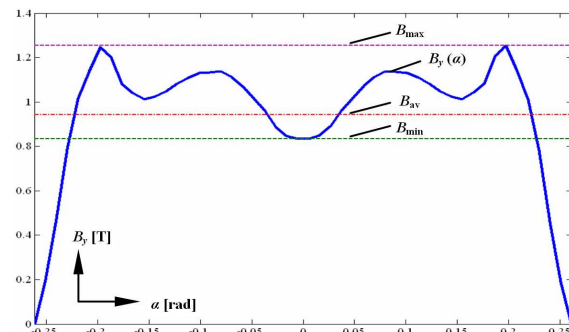
$$p_B = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\text{av}}} \quad (1)$$

gdzie:

$(B_{\max} - B_{\min})$ – wartość międzyszczytowa pulsacji B_y ,

B_{av} – średnia wartość indukcji magnetycznej B_y .

Rysunek 7 przedstawiający przykładowy przebieg indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej wyjaśnia wielkości z wzoru (1).



Rys. 7. Objaśnienie wielkości występujących we wzorze (1) na przykładowym przebiegu indukcji w szczelinie

Wartości współczynników pulsacji p_B umieszczono w tabeli 4. Dodatkowo dla porównania wprowadzono kolumnę względnych współczynników pulsacji p'_B wyrażonych w procentach. Jak widać pulsacje indukcji magnetycznej zmniejszają się wraz ze wzrostem przenikalności magnetycznej klinów. Zauważyć można, że pulsacje indukcji magnetycznej zmieniają się w podobny sposób jak moment zaczepowy – przy zastosowaniu klinów o przenikalności $\mu_k = 10 \cdot \mu_0$ pulsacje indukcji zmniejszają się o 60% w porównaniu do sytuacji, gdy kliny są niemagnetyczne (porównaj z tab.1.).

Tabela 4.
Pulsacje indukcji magnetycznej

L.p.	μ_k [V·s/A·m]	p_B	p'_B [%]
1.	$1 \cdot \mu_0$	1.11	100
2.	$2 \cdot \mu_0$	0.82	74
3.	$5 \cdot \mu_0$	0.50	45
4.	$10 \cdot \mu_0$	0.44	40
5.	$20 \cdot \mu_0$	0.40	35
6.	$50 \cdot \mu_0$	0.30	26
7.	$100 \cdot \mu_0$	0.24	21
8.	$200 \cdot \mu_0$	0.19	17
9.	$500 \cdot \mu_0$	0.16	14
10.	$1000 \cdot \mu_0$	0.15	13

8. Wnioski

Z badań wynika, że im większa przenikalność magnetyczna klinów, tym mniejsze pulsacje indukcji magnetycznej oraz mniejszy moment zaczepowy. Zbyt duża przenikalność powoduje jednak zmniejszenie momentu elektromagnetycznego maszyny. Stąd wynika potrzeba znalezienia optymalnej wartości przenikalności magnetycznej klinów. Optymalną wartością przenikalności magnetycznej klinów w badanej strukturze wydaje się być $\mu_k = 10 \cdot \mu_0$, gdyż pulsacje zmniejszają się o ok. 60%, natomiast wartość momentu elektromagnetycznego zo-

staje zachowana praktycznie na niezmiernym poziomie.

Na podstawie innych badań autor stwierdza, że w różnych strukturach obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych różnie zmieniają się pulsacje w maszynie wraz ze zmianą przenikalności magnetycznej klinów. Stopień zmniejszania się pulsacji zależy głównie od ilości żłobków na biegun i fazę oraz stosunku grubości szczeliny powietrznej do szerokości podziałki biegunowej. Stąd wniosek, iż każda struktura wymaga przeprowadzenia osobnych badań w celu wyznaczenia optymalnych dla niej parametrów klinów magnetycznych.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2008 jako projekt badawczy nr N510 012 31/0806

9. Literatura

- [1]. Dudzikowski I., Gierak D.: *Pulsacje momentu elektromagnetycznego i ich ograniczanie w silnikach magnetoelektrycznych prądu stałego*, Proc. of XL SME'2004, Hajnówka (2004), s. 406-414.
- [2]. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P.: *Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną*, skrypt, seria „Tempus”, Politechnika Szczecińska, (2000), 242
- [3]. Azarewicz S., Śniegoń S., Węgliński B.: *Wpływ zamknięcia żłobków stojana klinami magnetycznymi na parametry silnika pracującego w ciekłym azocie*, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 63, 2006, wyd. BOBRME Komel, s. 185-188
- [4]. Wiak S., Welfle H.: *Silniki tarczowe w napędach lekkich pojazdów elektrycznych*, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź (2001), 200

Autor

mgr inż. Marcin Wardach
tel.: (091) 449 42 70
e-mail: marwar@ps.pl
Instytut Elektrotechniki,
Politechnika Szczecińska,
ul. Gen Wł. Sikorskiego 37,
70 – 313 Szczecin