

WPLYW KLINÓW MAGNETYCZNYCH NA PULSACJE MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO W PRZETWORNIKACH O STRUKTURZE UŻŁOBKOWANEJ

Obwody magnetyczne użłobkowane charakteryzują się znacznymi pulsacjami żłobkowymi. Jednym ze sposobów jej ograniczenia jest zastosowanie klinów magnetycznych. Artykuł prezentuje wyniki badań symulacyjnych struktury obwodu magnetycznego elektromechanicznego przetwornika energii (EMPE) ze wzbudzeniem od wysokoenergetycznych magnesów trwałych. Z pracy wynika, że zastosowanie klinów magnetycznych pozwala na znaczne zmniejszenie pulsacji momentu elektromagnetycznego, przy zachowaniu, a nawet podwyższeniu, jego wartości. Aby to osiągnąć niezbędnym jest dokonanie wyboru optymalnych parametrów klinów magnetycznych tj. grubości i przenikalności magnetycznej.

1 WSTĘP

Maszyny ze stojanem użłobkowanym charakteryzują się małą szczeliną i większym momentem elektromagnetycznym w porównaniu do maszyn o strukturze beżłobkowej. Niestety występują w nich pulsacje żłobkowe spowodowane różną reluktancją obszarów przyszczelinowych w pobliżu zębów i żłobków. Generują one wyższe harmoniczne oraz powodują powstanie hałasu, drgań i pulsacji momentu elektromagnetycznego.

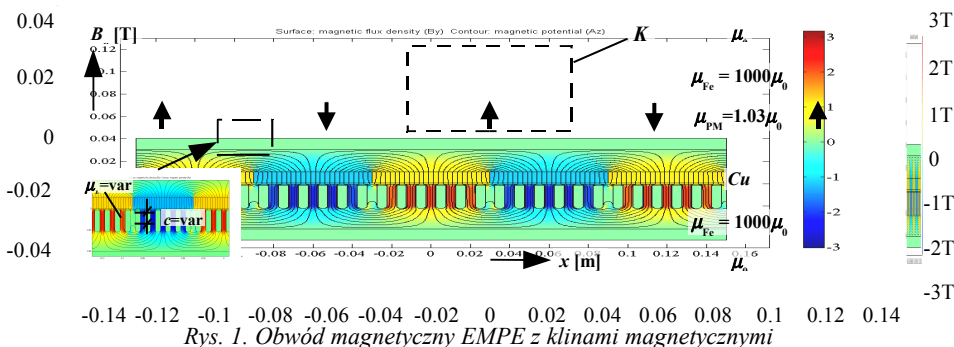
Jednym ze sposobów ograniczenia pulsacji żłobkowych jest zastosowanie klinów magnetycznych w przyszczelinowym obszarze żłobka [2]. Kliny takie spełniają dwie role; mechaniczną – zamykają żłobki z uzwojeniami zabezpieczając przed ich uszkodzeniem (wypadnięciem) oraz magnetyczną – stanowią drogę dla części strumienia magnetycznego. Obecność klinów zmniejsza różnicę reluktancji obszarów przyszczelinowych w pobliżu zębów i żłobków. Artykuł zawiera badania symulacyjne w programach MATLAB-FEMLAB nad wpływem zmian parametrów klinów magnetycznych na pulsacje indukcji magnetycznej B_y w szczelinie powietrznej oraz wartość siły F działającej na część wtórną EMPE, a od wielkości i pulsacji indukcji magnetycznej B_y oraz wartości siły F zależą pulsacje i wartość momentu elektromagnetycznego M_e [1].

¹ Instytut Elektrotechniki, Politechnika Szczecińska, ul. Gen. Wł. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel. (91) 449 42 70, e-mail: marwar@op.pl

2 BADANIA EMPE Z KLINAMI MAGNETYCZNYMI

2.1 Struktura przetwornika z klinami magnetycznymi

Przedmiotem badań symulacyjnych w pracy była struktura obwodu magnetycznego elektromechanicznego przetwornika energii przedstawiona na rys. 1. Struktura ta może być zarówno postacią rozwiniętą EMPE o konfiguracji cylindrycznej lub tarczowej bądź bezpośrednio może przedstawiać liniowy EMPE.



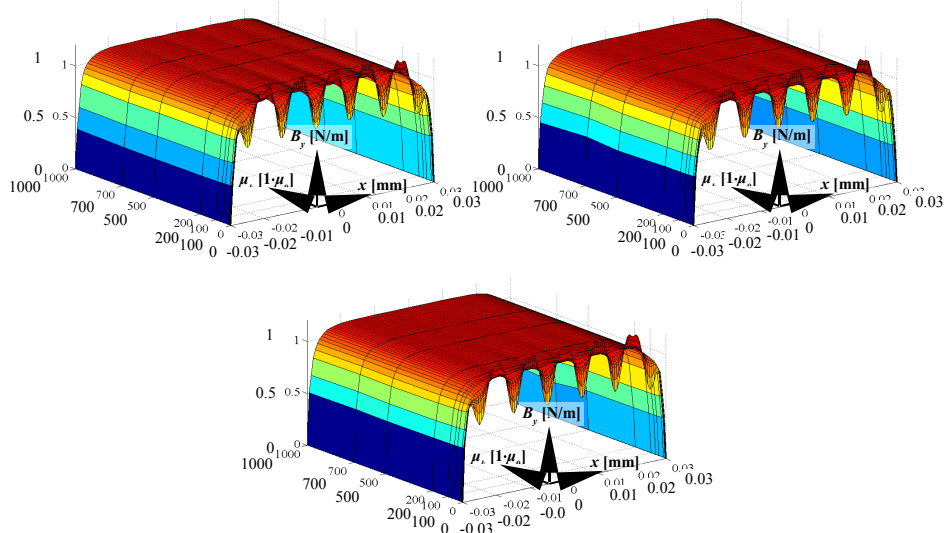
Rys. 1. Obwód magnetyczny EMPE z klinami magnetycznymi

Badana struktura jest wycinkiem obwodu magnetycznego zawierającym pięć podziałek biegunowych. Szerokość jednej podziałki biegunowej to $\tau_s = 60$ mm. Stojan jest o grubości 40 mm, w nim znajdują się żłobki z uzwojeniami o szerokości 5 mm i głębokości $(20 \text{ mm} + c)$, gdzie c – grubość klina magnetycznego. Żłobki zamknięte są klinami magnetycznymi. Natomiast część ruchomą stanowi warstwa wysokoenergetycznych magnesów trwałych o grubości 10 mm przymocowanych do jarzma ferromagnetycznego o grubości 20 mm.

Podczas badań symulacyjnych, przeprowadzonych przy użyciu programów MATLAB-FEMLAB, zmieniano grubość klinów magnetycznych (wymiar c – przyjmował wartości 0.5 mm, 1.0 mm i 1.5 mm) oraz ich przenikalność magnetyczną μ_k , która przyjmowała wartości: $[1000, 700, 500, 200, 100, 70, 50, 20, 10, 7, 5, 2, 1] \cdot \mu_0$. Następnie wyznaczano rozkład indukcji magnetycznej B_y , oraz wartość siły F_x , jaka działa na część ruchomą EMPE o szerokości jednej podziałki biegunowej (prostokąt K na rys. 1). Pomimo, że wpływ parametrów klina badano na jednej podziałce biegunowej, w symulacjach zastosowano pięć podziałek w celu zredukowania wpływu warunków brzegowych jakie należało zadać w programach.

2.2 Wpływ parametrów klinów na rozkład B_y pośrodku szczeliny

Wyniki badań symulacyjnych nad wpływem parametrów klina na rozkład indukcji magnetycznej B_y pośrodku szczeliny powietrznej przedstawiono w postaci wykresów trójwymiarowych na rys. 2. Rys. 2a prezentuje rozkład B_y , w przypadku, gdy szerokość klinów magnetycznych w strukturze z rys. 1 wynosi $c = 0.5$ mm, rys. 2b – gdy $c = 1.0$ mm, natomiast rys. 2c gdy $c = 1.5$ mm. Oś OX stanowi szerokość podziałki biegunowej (od -0.03 m do 0.03 m), oś OY – przenikalność magnetyczną klinów, natomiast oś OZ przedstawia indukcję magnetyczną pośrodku szczeliny powietrznej B_y .



Rys. 2. Rozkład indukcji magnetycznej B_y pośrodku szczeliny powietrznej w zależności od punktu na podziałce biegunowej x i od przenikalności magnetycznej klinów μ_k

Analizując wyniki symulacji można zauważyć, że już przy niewielkich wartościach przenikalności magnetycznej klinów, rzędu pojedynczych krotności μ_0 , następuje znaczne wygładzenie rozkładu indukcji magnetycznej B_y w szczelinie powietrznej, przy czym im większa grubość klina, tym bardziej wygładzony przebieg B_y .

2.3 Pulsacje indukcji magnetycznej

Kolejnym etapem badań było wyznaczenie współczynnika pulsacji indukcji magnetycznej B_y . Współczynnik ten wyznaczono wg wzoru [3]:

$$p_B = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\text{av}}}$$

gdzie: $(B_{\max} - B_{\min})$ – wartość międzyszczytowa (peak-to-peak) pulsacji B_y ,
 B_{av} – średnia wartość indukcji magnetycznej B_y .

Wyniki umieszczono w tab. 1. W celu dokładniejszego porównania wyników wprowadzono dodatkowy względny parametr p'_B – wszystkie wyniki odniesiono do wartości parametru p_B wyliczonego dla klina o parametrach $c = 0.5$ mm i $\mu_k = \mu_0$ i umieszczono je w tabeli 2. Wartości otrzymane w tabeli 2 przedstawiono w formie wykresu 3D na rysunku 3.

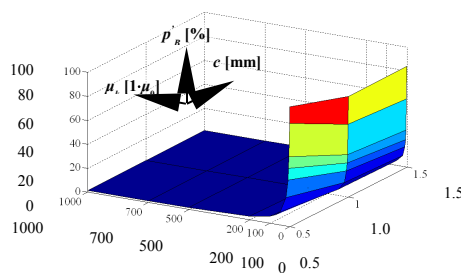
Z tabeli 2 i z rys. 3 wynika, że wartość pulsacji indukcji magnetycznej spada poniżej 50% już przy zastosowaniu klinów magnetycznych o przenikalności $\mu_k \geq 7 \cdot \mu_0$ (w tab. 2 wytłuszczoną czcionką zaznaczono te wartości). Natomiast, gdy $\mu_k \geq 70 \cdot \mu_0$, to pulsacje indukcji magnetycznej stanowią mniej niż 10% pulsacji w przypadku braku klinów magnetycznych. Należy zauważyć, że im większa grubość klina c tym pulsacje szybciej maleją przy wzroście przenikalności magnetycznej klinów μ_k (patrz tab. 2).

Tab. 1. Współczynnik pulsacji p_B

p_B	c [mm]		
	0.5	1.0	1.5
1000	0.0107	0.0119	0.0115
700	0.0110	0.0121	0.0116
500	0.0116	0.0124	0.0119
200	0.0232	0.0136	0.0131
100	0.0432	0.0202	0.0155
70	0.0601	0.0278	0.0211
50	0.0814	0.0377	0.0287
20	0.1771	0.0851	0.0665
10	0.2878	0.1584	0.1229
7	0.3598	0.2086	0.1662
5	0.4320	0.2601	0.2270
2	0.6410	0.4482	0.4198
1	0.7420	0.6217	0.6226

Tab. 2. Względny parametr p'_B

p'_B [%]	c [mm]		
	0.5	1.0	1.5
1000	1.45	1.60	1.54
700	1.48	1.63	1.56
500	1.56	1.67	1.61
200	3.13	1.84	1.76
100	5.82	2.72	2.09
70	8.10	3.75	2.85
50	10.97	5.08	3.87
20	23.87	11.47	8.97
10	38.79	21.35	16.57
7	48.50	28.12	22.40
5	58.22	35.05	30.59
2	86.39	60.41	56.58
1	100.00	83.79	83.91



Rys. 3. Względny parametr pulsacji p'_B w funkcji grubości c i przenikalności μ_k

2.4 Wpływ parametrów klinów na siłę EMPE

W tab. 3 umieszczone zostały wyniki badań analizowanej struktury pod względem siły F jaka działa na elementy jednej podziałki biegunowej części ruchomej EMPE (prostokąt K na rys. 1). Dla porównania w tab. 4 umieszczono względny parametr siły, który został obliczony poprzez odniesienie do wartości siły jaka działa na elementy w przypadku gdy parametry klina wynoszą: $c = 0.5$ mm i $\mu_k = \mu_0$. W tab. 4 pogrubioną czcionką zaznaczono wartości parametru f większe niż 99 %. Na podstawie tab. 4 sporządzono wykres 3D względnego współczynnika siły w funkcji przenikalności i grubości klinów magnetycznych.

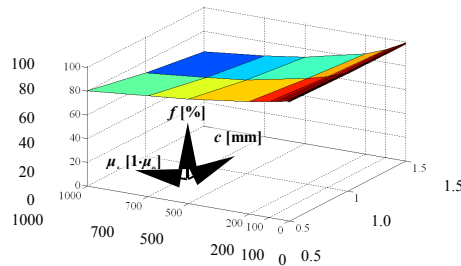
Z tab. 4 i rys. 4 wynika, że w przypadku grubości klina $c = 0.5$ mm i przenikalności $\mu_k = (2 \div 20) \cdot \mu_0$ uzyskano wzrost siły. Inaczej jest w dla grubości klinów $c = 1.0$ mm i $c = 1.5$ mm. Istnieją w nich optima, jednak konieczność odsunięcia uzwojeń od szczeliny powietrznej, wynikająca z większej grubości klinów, powoduje w konsekwencji zmniejszenie siły. W przeprowadzonej analizie autor założył, że minimalna odległość uzwojeń od szczeliny to 0.5 mm, dlatego nie prowadzono badań dla przypadku, gdy uzwojenia umieszczone miałyby być w zerowej odległości od szczeliny powietrznej. Dlatego wszystkie parametry względne wyznaczone zostały w odniesieniu do struktury, w której grubość klinów wynosi $c = 0.5$ mm, a przenikalność $\mu_k = \mu_0$.

Tab. 3. Siła F

F [N/m]	c [mm]		
	0.5	1.0	1.5
1000	2025	1770	1588
700	2138	1889	1717
500	2217	1991	1837
200	2380	2239	2127
100	2456	2355	2294
70	2480	2400	2354
50	2497	2431	2394
20	2522	2481	2467
10	2529	2498	2492
7	2530	2503	2498
5	2530	2503	2501
2	2525	2498	2495
1	2518	2488	2480

Tab. 4. Względny parametr siły f

f [%]	c [mm]		
	0.5	1.0	1.5
1000	80.42	70.29	63.07
700	84.91	75.02	68.19
500	88.05	79.07	72.95
200	94.52	88.92	84.47
100	97.54	93.53	91.10
70	98.49	95.31	93.49
50	99.17	96.54	95.08
20	100.16	98.53	97.97
10	100.44	99.21	98.97
7	100.48	99.40	99.21
5	100.48	99.40	99.32
2	100.28	99.21	99.09
1	100.00	98.81	98.49

Rys. 4. Względny parametr siły f w funkcji grubości c i przenikalności μ_k

3 OPTIMALNE PARAMETRY KLINÓW MAGNETYCZNYCH

Wybór optymalnych parametrów klinów magnetycznych, jakiego projektant EMPE powinien dokonać, zależy przede wszystkim od przeznaczenia projektowanej maszyny.

Jeżeli przeznaczeniem EMPE będzie praca w wysoce precyzyjnych układach, gdzie ważną cechą silnika napędowego jest jego płynność ruchu oraz brak pulsacji i drgań, to optymalnym rozwiązaniem będzie zastosowanie klinów magnetycznych o grubości $c = 1.0$ mm lub $c = 1.5$ mm i przenikalności $\mu_k \approx 100 \cdot \mu_0$. W wyniku tak dokonanego wyboru maszyna charakteryzuje się mocno zredukowanymi pulsacjami indukcji magnetycznej, a co za tym idzie i pulsacjami momentu elektromagnetycznego, których wartość stanowi zaledwie $2 \div 3$ % pulsacji jaka występowałaby przy braku klinów magnetycznych (patrz tab.2). Niestety trzeba się liczyć ze zmniejszeniem momentu EMPE. Z tab. 4 wynika, że siła jest mniejsza o ok. $6 \div 9$ % w stosunku do siły EMPE bez klinów magnetycznych, w związku z tym w EMPE o konfiguracji cylindrycznej lub tarczowej moment M_e zmniejszy się o ok. $6 \div 9$ %.

Gdy EMPE ma zostać zaprojektowany do pracy w układach, gdzie przede wszystkim ważny jest wysoki moment, to racjonalnymi parametrami klinów magnetycznych będą $c = 0.5$ mm i $\mu_k = 20 \cdot \mu_0$. W tym wypadku uzyskujemy nawet niewielki wzrost momentu (tab.4), a pulsacje zmniejszają się o ponad 76 % (tab. 2).

4 WNIOSKI

Z przeprowadzonych analiz wynika, że zastosowanie klinów magnetycznych znacznie zmniejsza pulsacje indukcji magnetycznej wzdłuż podziałki biegunowej. Im większa grubość oraz przenikalność magnetyczna klinów tym mniejsze pulsacje indukcji. Z badań wynika ponadto, że zastosowanie klinów magnetycznych o zbyt dużej grubości c i przenikalności μ_k może zmniejszyć moment EMPE nawet o ok. 40 % (tab. 4).

W przedstawionym przykładzie, według przeprowadzonych badań, istnieje optimum pod względem wartości siły (momentu M_e), tym optimum jest zastosowanie klinów o parametrach $c = 0.5$ mm i $\mu_k = (2 \div 20) \cdot \mu_0$.

5 LITERATURA

1. Afonin A., Kramarz W., Cierzniewski P.: *Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną*, skrypt, seria „Tempus”, Politechnika Szczecińska, 2000, 242 str.
2. Dudzikowski I., Gierak D.: *Pulsacje momentu elektromagnetycznego i ich ograniczanie w silnikach magnetoelektrycznych prądu stałego*, Proc. of XL SME'2004, 15 - 18 June, Hajnówka, Poland, pp. 406-414.
3. Wiak S., Welfle H.: *Silniki tarczowe w napędach lekkich pojazdów elektrycznych*, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź, 200 str., 2001.

INFLUENCE OF MAGNETIC WEDGES ON PULSATIONS OF ELECTROMAGNETIC TORQUE IN SLOT TYPE MACHINES

Magnetic circuits of slot type machines have significant slot's pulsation. Using magnetic wedges is one of the ways to decrease it. Analyses of simulating research concerning electromechanical's energy converter magnetic circuit with permanent magnet was performed. From the analysis and results of research it is proved, that using magnetic wedges allows for a significant electromagnetic torque pulsation decreasing, despite of increasing torque value. Optimum selection of magnetic wedges parameters i.e. thickness of wedge and magnetic permeability is a critical factor for achieving decreasing of torque pulsation.