

STRUKTURY OBWODÓW MAGNETYCZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI O ROZKŁADZIE SINU- SOIDALNYM I TRAPEZOIDALNYM INDUKCJI MAGNETYCZNEJ POŚRODKU SZCZELINY PO- WIETRZNEJ

W artykule przedstawiono modele numeryczne struktur obwodów magnetycznych pozwalające na osiągnięcie wysokich wartości indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej elektromechanicznych przetworników energii typu BLDC i PMSM. Pokazano sposoby formowania kształtu składowej podłużnej indukcji magnetycznej obszarze elektromechanicznego przetwarzania energii.

1 WSTĘP

Silniki z komutacją elektroniczną i magnesami trwałymi w obwodzie wzbudzenia znajdują coraz szersze zastosowania w wielu dziedzinach. Jako przykłady zastosowań można wymienić napędy elektryczne pojazdów z silnikiem wbudowanym w piastę koła, silniki do napędu statków, robotów podwodnych, serwonapędów w robotach przemysłowych, gdzie wymagana jest duża dynamika i minimalna objętość i masa silnika oraz napędy dysków twardych. Konstrukcje tych silników cały czas rozwijają się. Dąży się w nich do uzyskania jak największej mocy jednostkowej, momentu elektromagnetycznego czy siły, zwiększenia sprawności, zmniejszenia pulsacji momentów i szumów, wzrostu dynamiki i zmniejszenia ich masy oraz objętości przy zachowaniu mocy i momentu na stałym poziomie.

Duże znaczenie dla wzrostu dynamiki, momentu elektromagnetycznego i siły elektromagnetycznej w EMPE ma zwiększenie wartości indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej. Można to osiągnąć m.in. poprzez utworzenie odpowiedniej struktury magnetycznej, charakteryzującej się podwyższeniem koncentracji pola magnetycznego w obszarze przetwarzania energii. Materiały magnetycznie twarde pozwalają na konstruowanie obwodów wzbudzenia w EMPE o dużej wartości indukcji magnetycznej B_{δ} w szczelinie, a także budowę złożonych obwodów magnetycznych, składających się z wysokoenergetycznych magnesów trwałych o różnych kierunkach wektorów namagnesowania oraz z elementów ferromagnetycznych. Koncepcja „obrotu” wektorów namagnesowania magnesów trwałych pozwala kształtować pole magnetyczne w nowej

¹ Politechnika Szczecińska, Instytut Elektrotechniki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel. 091 4494270, e-mail: cierz@ps.pl

generacji przetwornikach energii ruchu liniowego i obrotowego, chociaż obszar zastosowań tej koncepcji nie jest ograniczony do zadań z dziedziny elektromechaniki.

Niezależnie od różnego sposobu wykonania silniki elektryczne z magnesami trwałymi i komutacją elektroniczną są projektowane i wykonywane w dwóch zasadniczych odmianach: silniki bezszczotkowe prądu stałego (BLDC – Brushless Direct Current) oraz silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM – Permanent Magnet Synchronous Motor). Każda z tych konstrukcji wymaga innego kształtu rozkładu składowej użytecznej indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej, wynikającego z zasilania prądem o innym przebiegu[3].

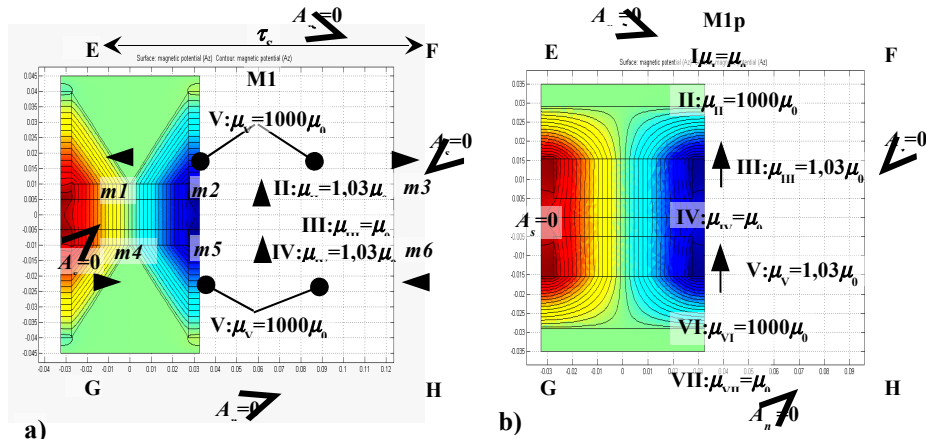
Przy obliczeniach modeli numerycznych obwodów magnetycznych przedstawionych w artykule z wykorzystaniem środowiska MATLAB-FEMLAB, jako parametry magnesów trwałych przyjęto parametry magnesu ziem rzadkich Nd-Fe-B VACODYM 655 HR charakteryzującego się: pozostałością magnetyczną (remanecją) $B_r = 1,28$ T, natężeniem koercji (natężeniem powściągającym) dla indukcji $H_{CB} = 990$ kA/m, przenikalnością magnetyczną względną $\mu_{mag}=1,03$. Względna przenikalność magnetyczną materiałów ferromagnetycznych przyjęto jako stałą i wynoszącą $\mu_{rFe}=1000$. Dla powietrza przyjęto przenikalność magnetyczną próżni: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

2 OBWODY MAGNETYCZNE DLA EMPE TYPU BLDC

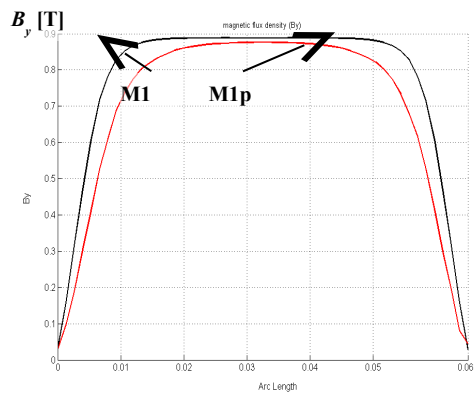
Elektromechaniczne przetworniki energii o komutacji elektronicznej typu BLDC wymagają kształtu trapezoidalnego rozkładu składowej podłużnej indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej i zasilania uzwojeń znajdujących się w szczeliny pomiędzy warstwami magnetycznymi prądem o przebiegu zbliżonym do prostokątnego.

Na rys. 1a przedstawiono wycinek modelu struktury obwodu magnetycznego M1 o długości podziałki biegunowej $\tau_s = 65$ mm wraz z liniami potencjału wektorowego. Struktura ta składa się z dwóch warstw magnetycznych, zawierających magnesy trwałe o kierunkach wektorów namagnesowania zaznaczonych strzałkami i wymiarach: 55x5 mm magnesów $m2$ i $m5$ oraz 5x35 mm magnesów $m1$, $m3$, $m4$ i $m6$. Kierunki wektorów namagnesowania magnesów trwałych w warstwie górnej „obracają” się o kąt $\varepsilon = 90^\circ$ w prawo w następujących po sobie magnesach wzdłuż podziałki biegunowej, natomiast w warstwie dolnej w lewo. Szczelina powietrzna w nim jest względnie duża $\delta = 10$ mm. Pomiędzy magnesami trwałymi znajdują się elementy ferromagnetyczne o kształcie trójkątnym, które ukształtowano w taki sposób, aby zmniejszyć masę części biernych w EMPE i zwiększyć koncentrację pola magnetycznego oraz narzucić jak najkrótszą drogę dla strumienia magnetycznego. W modelu tym na jedną podziałkę biegunową przypadają po dwa elementy ferromagnetyczne w górnej i dolnej warstwie. Ich szerokość wynosi 27,5 mm, natomiast ich wysokość wynosi 30 mm.

Na rys. 1b przedstawiono wycinek struktury magnetycznej M1p wraz z rozkładem linii potencjału wektorowego, która jest odpowiednikiem klasycznym struktury magnetycznej M1. Powierzchnia, jaką zajmują w niej magnesy trwałe i jarzma ferromagnetyczne, podziałka biegunowa, szerokość szczeliny powietrznej jest taka sama jak w modelu M1.



Rys. 1. Rozkład linii potencjału wektorowego w modelu wycinka obwodu magnetycznego a) M1, b) M1p



Rys. 2. Rozkład składowej podłużnej B_y indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej w modelach M1 i M1p

Na rys. 2 przedstawiono otrzymany w wyniku obliczeń numerycznych rozkład składowej podłużnej (użytecznej) indukcji magnetycznej B_y pośrodku szczeliny powietrznej w strukturach obwodów magnetycznych M1 i M1p. Można na nim zauważyć, iż w obu modelach przy tej samej powierzchni jaką zajmują magnesy trwałe i elementy ferromagnetyczne, tej samej szczeliny powietrznej przy tej samej podziałce biegunowej w modelu M1 indukcja magnetyczna osiągnęła większe wartości niż w modelu M1p.

Wartość średnią B_{yav} składowej podłużnej B_y indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej z otrzymanych rozkładów a modelach M1 i M1p wyznaczono z następującego równania:

$$B_{yav} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} B_y(x) dx \quad (1)$$

gdzie: τ – szerokość podziałki biegunowej, $B_y(x)$ – rozkład składowej podłużnej indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej wzdłuż podziałki biegunowej.

Zestawienie otrzymanych parametrów składowej B_y indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej w modelach M1 i M1p zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Parametry składowej B_y indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej w modelach M1 i M1p

Model	$B_{y\max}$ [T]	$B_{y\text{av}}$ [T]	$k_Z = B_{y\text{av}}/B_{y\max}$	Model	$B_{y\max}$ [T]	$B_{y\text{av}}$ [T]	$k_Z = B_{y\text{av}}/B_{y\max}$	$B_{y\text{av}}/B_{y\text{pav}}$
M1	0,89	0,79	0,89	M1p	0,87	0,70	0,83	1,13

W modelu M1 otrzymano o 13% większą wartość średnią składowej podłużnej indukcji magnetycznej B_y , niż w modelu M1p. Ponadto w modelu M1 kształt jest bardziej zbliżony do prostokątnego niż w modelu M1p.

3 OBWODY MAGNETYCZNE DLA EMPE TYPU PMSM

EMPE typu PMSM wymagają zasilania prądem o kształcie sinusoidalnym i sinusoidalnego rozkładu składowej podłużnej indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej. W celu uzyskania sinusoidalnego rozkładu składowej podłużnej indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej w strukturze płaskiej EMPE można zastosować koncepcję „obrotu” wektorów namagnesowania magnesów trwałych [1].

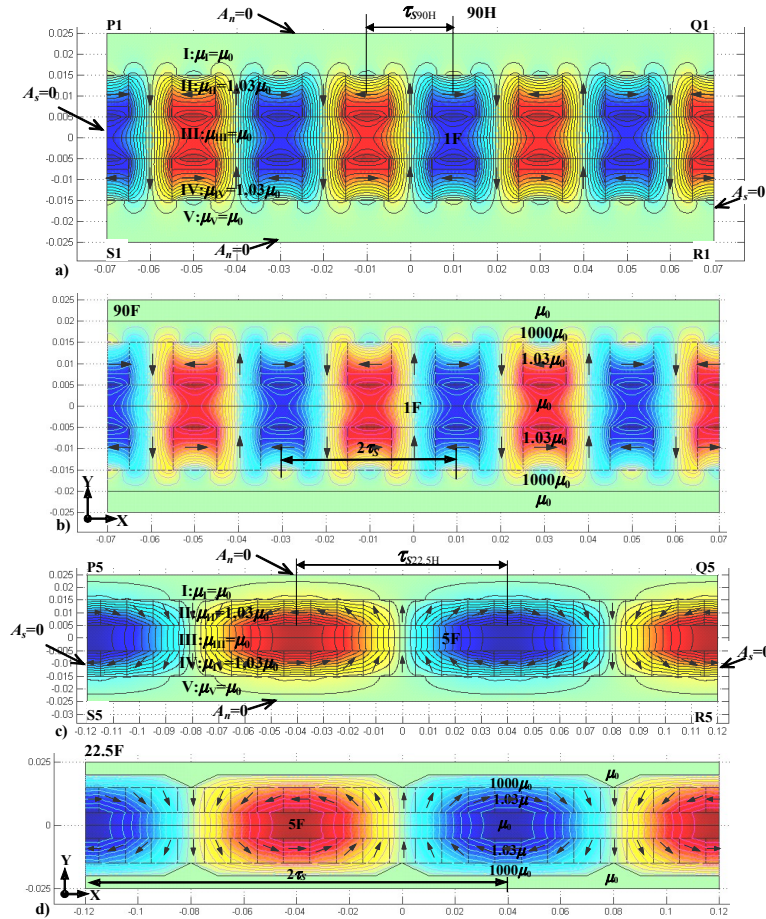
Istnieje możliwość zbudowania takiego układu magnetycznego z samych magnesów trwałych, aby po obu jego stronach powstały dwa obszary, charakteryzujące się różnym rozkładem pola magnetycznego. Rozwiązanie takie opracował Klaus Halbach, które od jego nazwiska zostało nazwaną koncepcją Halbacha [2].

W modelach przedstawionych na rys. 3 magnesy trwałe są o wymiarach 10 mm x 10mm. Szczelina powietrzna δ między układami magnetycznymi, umieszczonymi w dolnej i górnej warstwie wynosi 10 mm. Na rys. 3a przedstawiono wycinek obwodu magnetycznego 90H, w którym kierunki wektorów namagnesowania następujących po sobie magnesów trwałych „obracają” się o kąt $\varepsilon = 90^\circ$. Podziałka biegunowa τ_s w modelu tym wynosi $\tau_{s90} = 20$ mm. W strukturze 90F (rys. 3b), w odróżnieniu od struktury 90H, zastosowano jarzma ferromagnetyczne na zewnętrznych częściach obwodu magnetycznego. Na rys. 3c przedstawiono model 22,5H, w którym tym kierunki wektorów namagnesowania następujących po sobie magnesów trwałych „obracają” się o kąt $\varepsilon = 22,5^\circ$. Podziałka biegunowa τ_s wynosi w nim $\tau_{s22,5} = 80$ mm. W modelu 22,5F (rys. 3d), w odróżnieniu od modelu 22,5H, zastosowano jarzma ferromagnetyczne na zewnętrznych częściach obwodu magnetycznego.

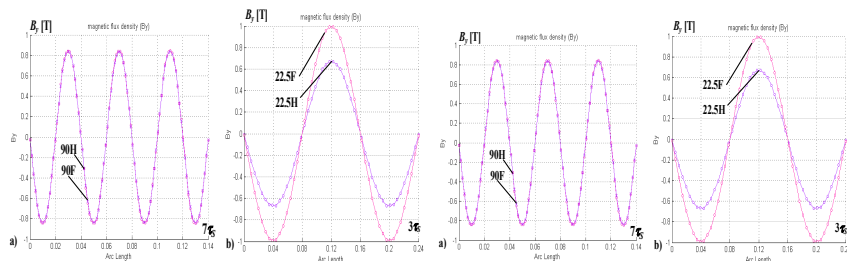
Na rys. 4a przedstawiono przebieg składowej B_y indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej w modelach 90H i 90F. Widać na nim, że przebiegi w modelach 90H i 90F pokryły się. Oznacza to, że w tym przypadku zastosowanie jarzm ferromagnetycznych nie wpływa na rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej.

Na rys. 4b przedstawiono przebieg składowej B_y indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej w modelach 22,5H i 22,5F. Widać na nim, że zastosowanie jarzma ferromagnetycznego zwiększyło jej wartość maksymalną, co oznacza, że poprzez za-

stosowanie elementów ferromagnetycznych w strukturze 22,5H można znacznie zwiększyć wartość indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej.



Rys.3. Rozkład linii potencjału wektorowego w układach magnetycznych o kierunkach „obrotu” wektorów namagnesowania magnesów trwałych: a) 90°; b)90° z jarami ferromagnetycznymi; c) 22,5°; d) 22,5° z jarami ferromagnetycznymi



Rys.4. Rozkład składowej B_y pośrodku szczeliny powietrznej w modelach: a) 90H i 90F; b)22,5H i 22,5F

Tabela 2. Zestawienie otrzymanych wartości średnich B_{yav} i maksymalnych B_{ymax} składowych indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej w modelach o kącie $\varepsilon = 90^\circ, 22,5^\circ$ z jarzmami ferromagnetycznymi (F), jak i bez jarzm (H)

Model	ε [°]	τ_s [mm]	B_{ymax} [T]	B_{yav} [T]	k_z	$k_{fav} = \frac{B_{yavEF}}{B_{yavEH}}$
90H	90	20	0,84	0,53	0,631	1,00
90F	90	20	0,84	0,53	0,631	
22,5H	22,5	80	0,67	0,42	0,627	1,50
22,5F	22,5	80	0,99	0,63	0,636	

Z zestawienia otrzymanych wyników w tabeli 2 wynika, że w przedstawionych modelach obwodów magnetycznych otrzymano sinusoidalny rozkład składowej B_y pośrodku szczeliny powietrznej, współczynnik kształtu k_z jest w nich zbliżony do 0,636. Predysponuje je to do zastosowania w obwodach magnetycznych w EMPE typu PMSM.

4 PODSUMOWANIE

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że poprzez odpowiednie uformowanie obwodów magnetycznych w EMPE złożonych z magnesów trwałych i elementów ferromagnetycznych można zwiększać wartość indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej w stosunku do modeli klasycznych, jak i formować kształt jej rozkładu.

5.LITERATURA

1. Afonin A.A., Gieras J., Szymczak P., *Permanent Brushless Motors with Innovative Excitation Systems*, Proc. 6th Intern. Conf. on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems UEES'04, Alushta, Ukraine, September 24-29 2004, Vol. 1, s. 27-38.
2. Halbach K., *Application of Permanent Magnets in accelerators and Electron Storage Rings*, J. Appl. Physics, 1985 vol.57, s. 3605-3608.
3. Kaczmarek T., Zawirski K., *Układy napędowe z silnikiem synchronicznym*, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.

MAGNETIC CIRCUIT STRUCTURES CONTAINING PERMANENT MAGNETS WITH SINUSOIDAL AND TRAPEZOIDAL DECOMPOSITION OF MAGNETIC FLUX DENSITY IN THE MIDDLE OF AIR GAP

Paper presents numerical modules of magnetic circuit structures which can provide high parameters of magnetic flux density in air gap for electromechanical energy converter BLDC and PSMS type. Methods of forming shape of magnetic induction in field of transforming electromechanical energy have been demonstrated.