

Bezrdzeniowy silnik tarczowy wzbudzany magnesami trwałymi w układzie Halbacha

Sebastian Latosiewicz

Wstęp

Współczesne magnesy trwałe umożliwiają utworzenie magnetowodu maszyny elektrycznej bez ciężkiego rdzenia ferromagnetycznego. Stanowi to bardzo ciekawą i ważną alternatywę dla dotychczasowych konstrukcji. Celem artykułu jest przedstawienie wybranych własności silnika bezrdzeniowego tarczowego, wzbudzanego magnesami trwałymi, pod kątem porównania z odpowiadającą wymiarami maszyną z jednostronnym rdzeniem¹.

Demonstrowanym silnikiem jest konstrukcja o 25 parach biegunów. Układem wzbudzenia są dwa pierścienie utworzone z magnesów neodymowych, ułożonych w tzw. szyk Halbacha, usytuowane na wirujących tarczach kompozytowych. Nieruchomy twornik maszyny stanowi trójfazowe uzwojenie faliste, tworzące wraz z wypełniaczem dysk, położony między pierścieniami magnesów. Całość przewidziana jest do zasilania prądem przemiennym o częstotliwości 3,5 [kHz], co odpowiada prędkości obrotowej 8400 [obr/min]. Analiza rozkładu pól została dokonana w oprogramowaniu Comsol.

Na rysunku 2 przedstawiono wycinek modelu silnika ($14,4^\circ$), na którym widać magnesy tworzące układ Halbacha, przymocowane do tarcz wirnika, oraz fragment uzwojenia pomiędzy nimi (rozpiętość kątowa pojedynczego magnesu to $3,6^\circ$, co odpowiada rozpiętości kątowej 1 bieguna $7,2^\circ$). Na 1 biegun wzbudzenia przypadają 2 magnesy. Wysokość magnesów wynosi 5 mm, wielkość szczeliny (odległość pomiędzy przeciwległymi powierzchniami magnesów) także 5 mm. Promień zewnętrzny pierścienia magnesów wynosi 64 [mm]. Stosunek promienia wewnętrznego do zewnętrznego magnesu wynosi 0,578, co jest wartością optymalną dla tego typu maszyn².

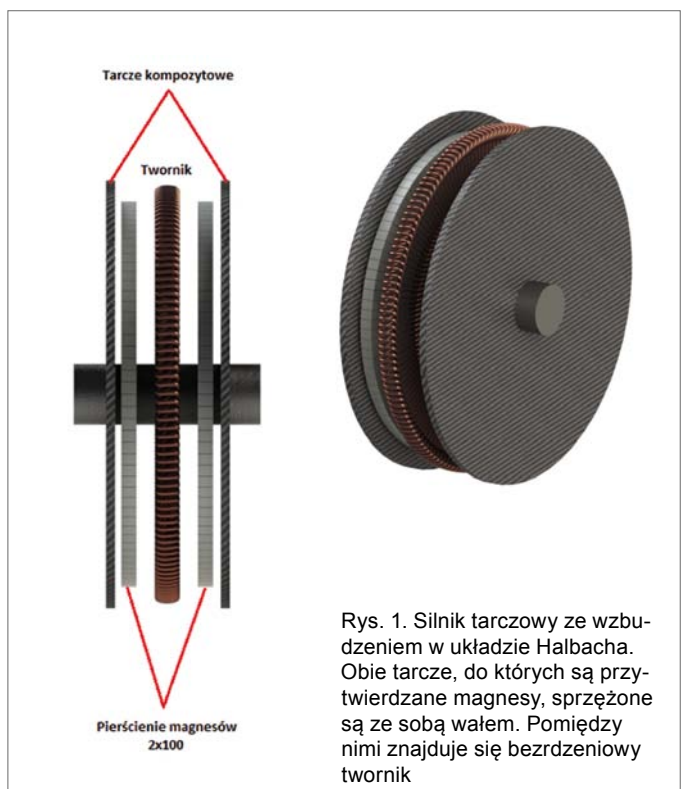
Wzbudzenie w układzie Halbacha vs. układ klasyczny

Układ wzbudzenia prezentowanej maszyny składa się z dwóch pierścieni utworzonych ze 100 trapezoidalnych magnesów, ułożonych w szyk Halbacha. Indukcja remanentu użytego materiału magnetycznego wynosi 1,1 [T]. Zastosowanie układu Halbacha eliminuje konieczność stosowania ferromagnetycznych tarcz jako elementu domykającego strumień magnetyczny – strumień zamyka się przez same magnesy oraz szczelinę powietrzną. Układ ten wraz z zaznaczonymi zwrotami wektorów polaryzacji magnetycznej poszczególnych magnesów został przedstawiony na rysunku 3, natomiast na rysunkach 4 i 5 zaprezentowany został rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej.

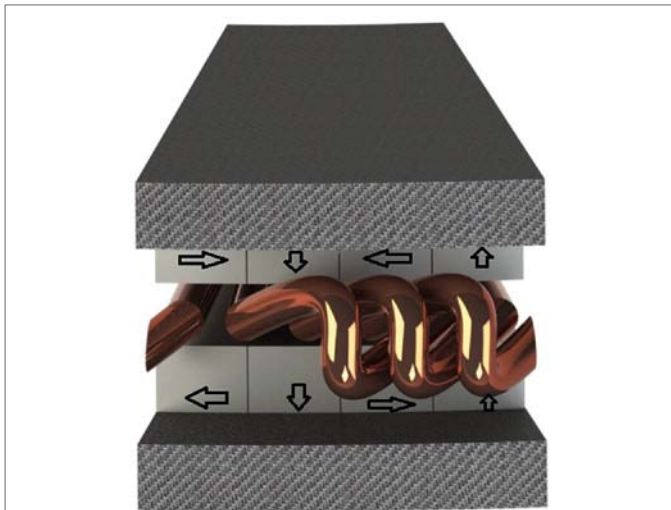
Dla porównania dokonano obliczeń układu wzbudzenia dla klasycznego rozmieszczenia magnesów. W takim układzie kolejne magnesy zamocowane są na ferromagnetycznych tarczach, tworząc układ N-S-N. Rozpiętość pojedynczego magnesu $6,2^\circ$. Pozostałe parametry geometryczne i fizyczne pozostały bez zmian (taka sama szczelina powietrzna, grubość tarcz, wyso-

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki obliczeń MES 3D wybranych wartości bezrdzeniowego silnika tarczowego wzbudzanego magnesami trwałymi ułożonymi w szyk Halbacha. W konstrukcji takiej tarcze wirnika wykonane są z materiałów kompozytowych, a strumień magnetyczny zamyka się przez szczelinę powietrzną oraz same magnesy. Otrzymane wyniki zostały porównane do wyników obliczeń otrzymanych dla maszyny o identycznych gabarytach, ale ze wzbudzeniem klasycznym, w którym żelazne tarcze wirnika stanowią element domykający strumień magnetyczny.

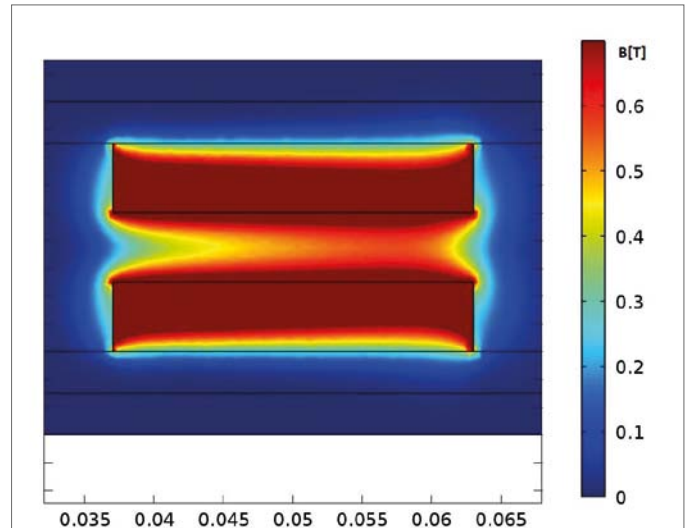
Abstract: This article presents the results of 3D FEM analysis of selected values of Axial Flux Permanent Magnets Motor where permanent magnets are arranged in the Halbach array. In this construction, the rotor disks are made of composite material and the magnetic flux is closed by an air gap and the magnets only. The computing results were compared to the results of calculations obtained for machine with identical dimensions, but with typical arrangement of magnets, where iron discs of rotor are part of the magnetic circuit.



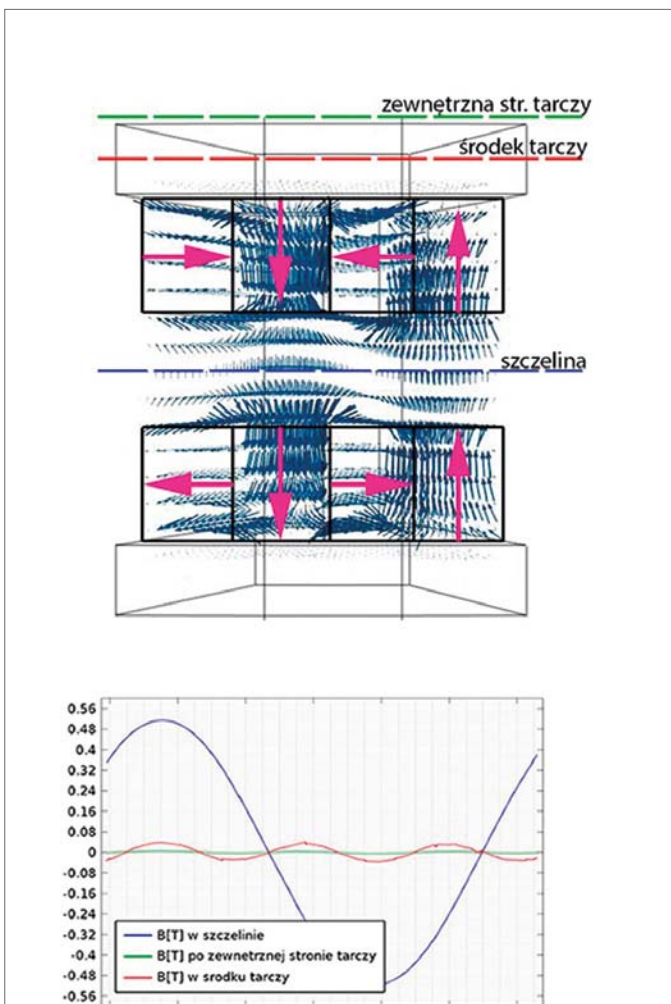
Rys. 1. Silnik tarczowy ze wzbudzeniem w układzie Halbacha. Obie tarcze, do których są przytwierdzone magnesy, sprzężone są ze sobą wałem. Pomiędzy nimi znajduje się bezrdzeniowy twornik



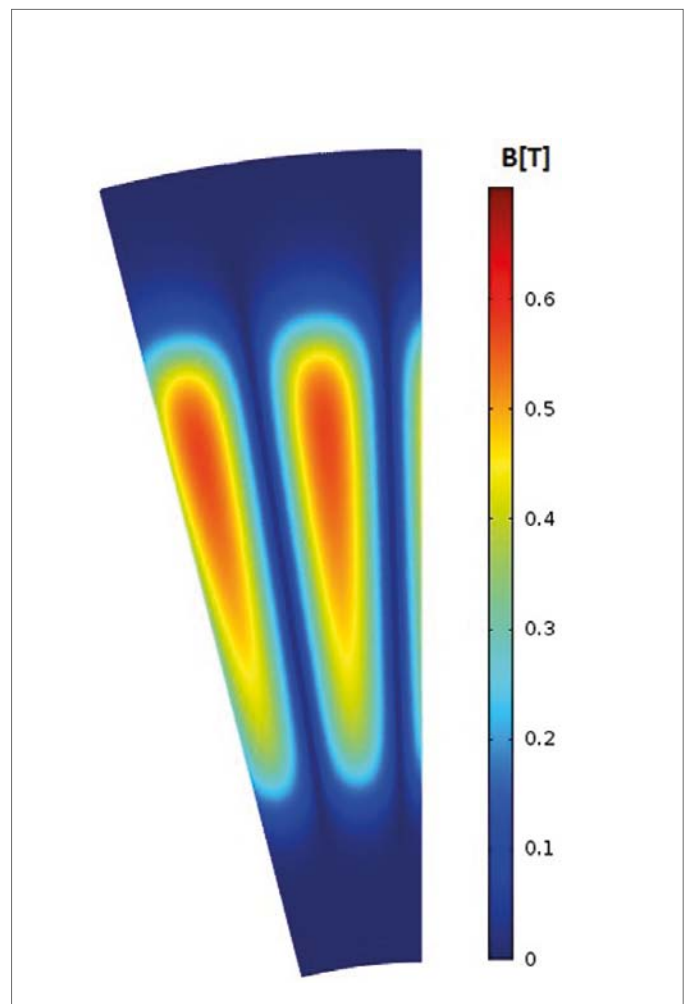
Rys. 2. Wycinek (1/25) silnika tarczowego ze wzbudzeniem w układzie Halbacha. Widoczne są po 4 magnesy przytwierdzone do przeciwnych tarcz oraz fragment 3-fazowego uzwojenia pomiędzy nimi. Na magnesach zaznaczono kierunki ich polaryzacji



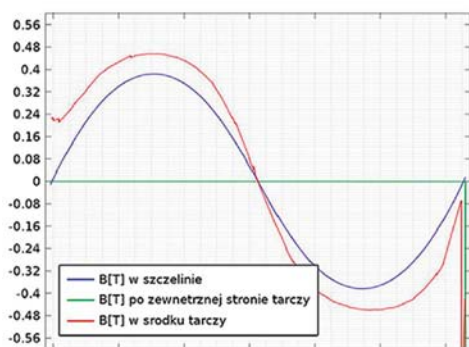
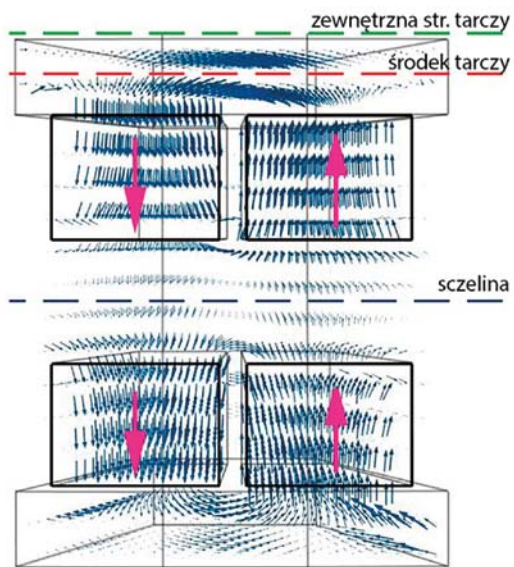
Rys. 4. Rozkład indukcji magnetycznej wzdłuż promienia na środku bieguna magnetycznego, dla maszyny ze wzbudzeniem u układzie Halbacha. Wartość indukcji magnetycznej w szczelinie jest funkcją promienia maszyny – wraz z jego wzrostem indukcja jest większa



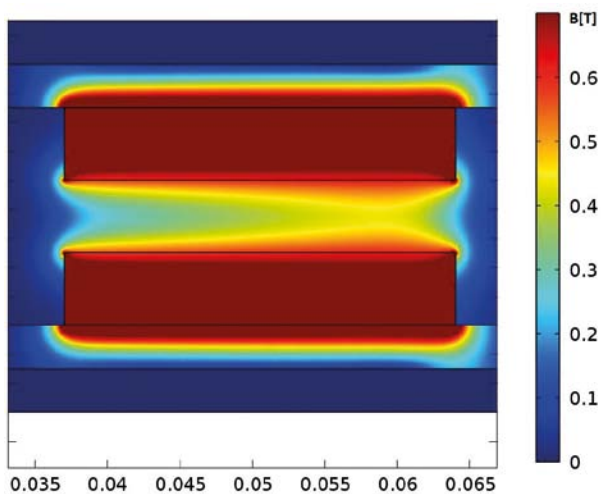
Rys. 3. Polaryzacja poszczególnych magnesów w szeregu Halbacha oraz rozkład indukcji magnetycznej na promieniu średnim maszyny. Wartość indukcji magnetycznej w środku tarczy nie przekracza wartości 0,05 [T]



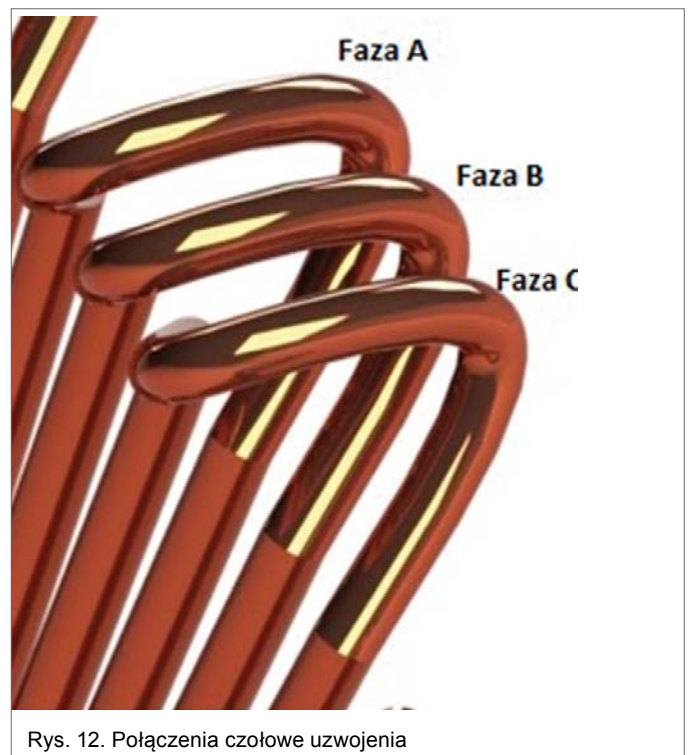
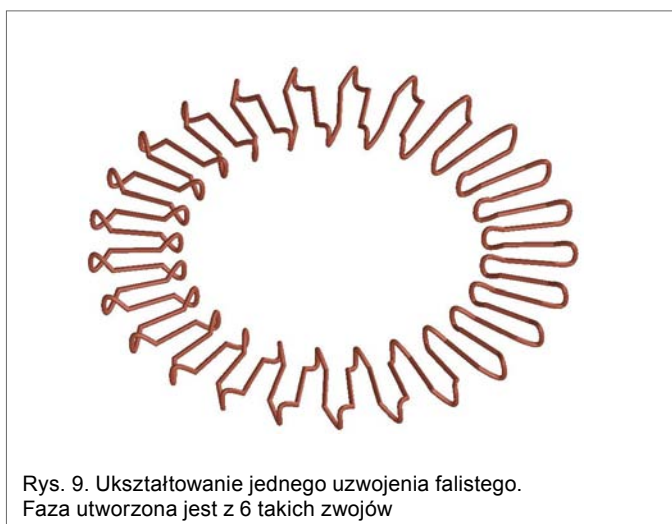
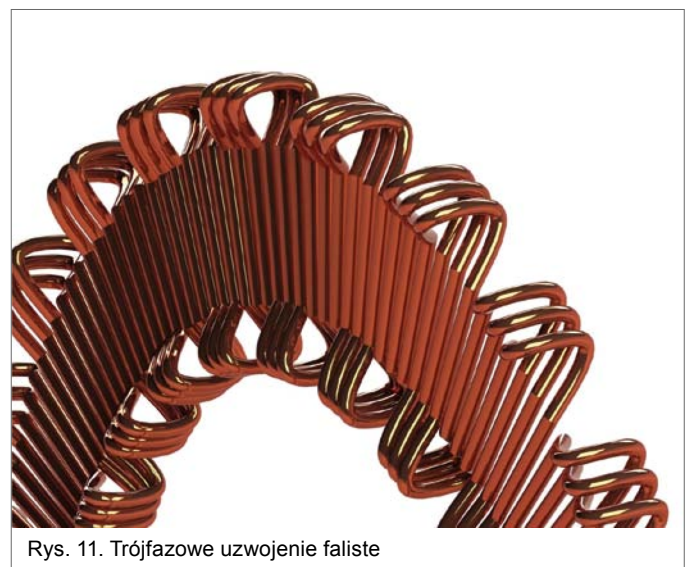
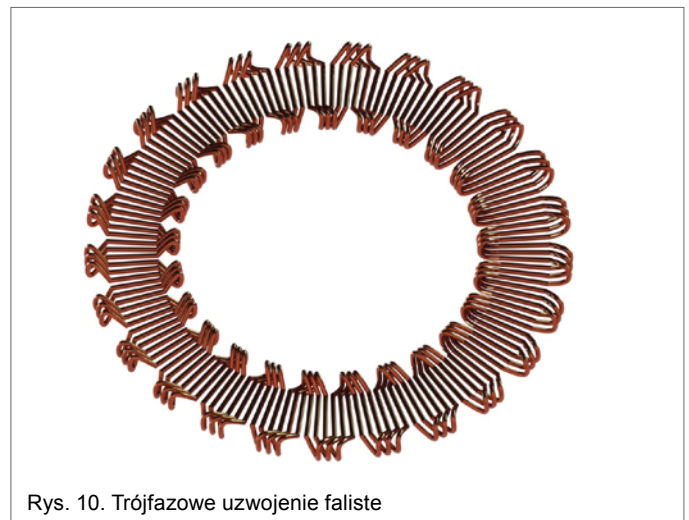
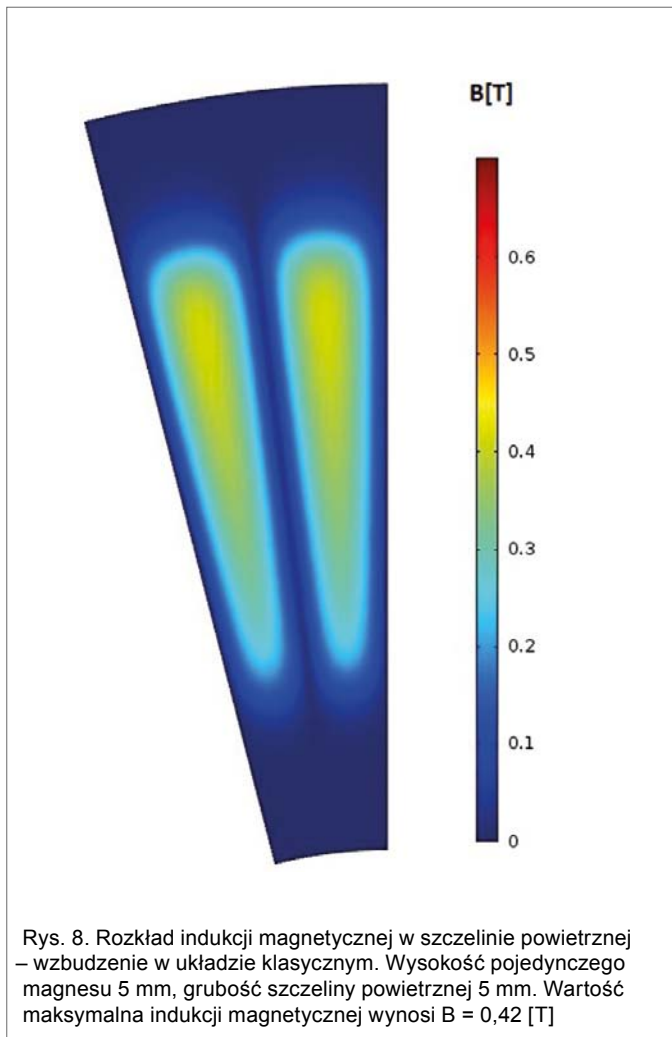
Rys. 5. Rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej – wzbudzenie w układzie Halbacha. Wysokość pojedynczego magnesu 5 mm, grubość szczeliny powietrznej 5 mm. Wartość maksymalna indukcji magnetycznej wynosi $B = 0,57$ [T]



Rys. 6. Polaryzacja poszczególnych magnesów w układzie klasycznym oraz rozkłady indukcji magnetycznej na promieniu średnim maszyny. Wartość indukcji magnetycznej w środku tarczy jest większa niż w szczeliny powietrznej

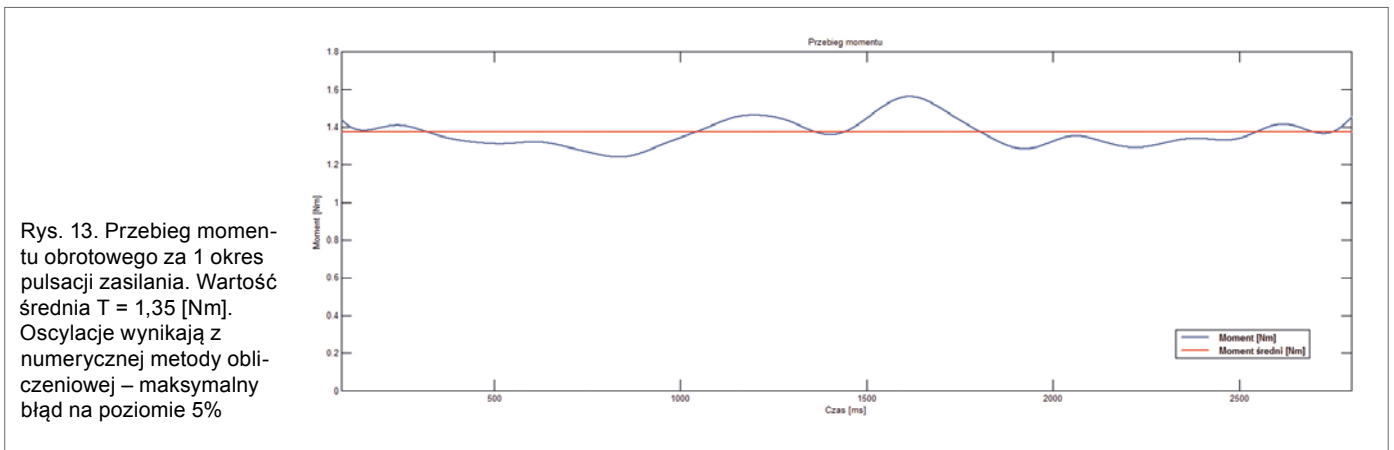


Rys. 7. Rozkład indukcji magnetycznej wzdłuż promienia na środku bieguna magnetycznego dla maszyny ze wzbudzeniem u układzie klasycznym. Wartość indukcji magnetycznej w szczeliny jest funkcją promienia maszyny – wraz z jego wzrostem indukcja jest większa



kości magnesów oraz materiał magnetyczny). Rozwiązanie to zostało przedstawione na rysunku 6. Na rysunkach 7 i 8, tak jak dla układu Halbacha, zaprezentowany został rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej.

Porównanie wyznaczonych wartości indukcji magnetycznej w obu układach, na promieniu średnim magnesów, pozwala stwierdzić, że w przypadku zastosowania magnesów ułożo-



reklama

nych w szyku Halbacha wartość indukcji magnetycznej w szczelinie jest ok 35% większa niż w przypadku układu klasycznego. Równocześnie strumień po zewnętrznej stronie magnesów (w środku tarczy kompozytowej) jest mniejszy od 0,04 T. Wykorzystując ten fakt, można rozbudować dwutarczową konstrukcję przez przymocowanie do zewnętrznej strony tej tarczy kolejnego pierścienia magnesów, dołożeniu kolejnej tarczy wirnika oraz twornika, podnosząc tym samym moc maszyny.

Uzwojenie twornika

W przedstawionym modelu wykorzystano 3-fazowe uzwojenie faliste. Rozpiętość kątowa kolejnych „boków cewek” jednej fazy wynosi $7,2^\circ$. Tak uformowane uzwojenie tworzy 50 „cewek” o naprzemiennej polaryzacji.

Specyficzne wyprofilowanie połączeń czołowych pozwala na umieszczenie części aktywnych cewek w jednej płaszczyźnie (tym samym minimalizując szczelinę powietrzną) oraz dopasowanie do siebie kolejnych faz uzwojenia, które są przesunięte względem siebie o $2,4^\circ$.

W przedstawionym modelu wykorzystano uzwo-

Tabela 1. Porównanie mas i momentów bezwładności wirników maszyn w układzie Halbacha oraz klasycznym

	Układ Halbacha	Układ Klasyczny
Masa magnesu [g]	3,04	5,5
Masa wszystkich magnesów [g]	608	550
Masa 1 tarczy [g]	81,9	352,9
Masa 2 tarcz [g]	163,8	705,8
Masa całkowita [g]	771,3	1251,6
Moment bezwładności tarcz i magnesów względem osi obrotu [kg · cm ²]	20,69	32,56

jenie składające się z 6 zwojów na 1 fazę. W wyniku symulacji otrzymano następujące indukcyjności zaprezentowanego uzwojenia:

$$\begin{aligned} L_A &\cong 21 \mu\text{H} & L_{AB} &\cong 6,5 \mu\text{H} \\ L_B &\cong 21 \mu\text{H} & L_{AC} &\cong 3,8 \mu\text{H} \\ L_C &\cong 21 \mu\text{H} & L_{BC} &\cong 6,5 \mu\text{H} \end{aligned}$$

Indukcyjności tego samego uzwojenia, ale umieszczonego pomiędzy żelaznymi tarczami, do których przymocowane są magnesy, są niemal identyczne, co wynika z bardzo dużej szczeliny między tarczami.

Różnica pomiędzy indukcyjnościami wzajemnymi L_{AC} oraz L_{BC} i L_{AB} wynika z pewnej niesymetrii połączeń czołowych (zarówno zewnętrznych, jak i wewnętrznych) takiego uzwojenia, co można zaobserwować na kolejnym rysunku.

Sposobem na eliminację takiej niesymetrii jest połączenie ze sobą szeregowo lub równoległe 2 uzwojeń.

Moment

Moment rozwijany przez przedstawianą maszynę został obliczony przy założeniu wymuszenia sinusoidalnego o amplitudzie 5 [A] i częstotliwości 3,5 [kHz]. Dla takich warunków wartość wyliczonego momentu obrotowego wyniosła 1,35 [Nm].

Dla porównania: dla maszyny z klasycznym układem wzbudzenia dla takiego samego uzwojenia i parametrów zasilania wartość momentu wyniosła 0,85 [Nm].

Masy i momenty bezwładności

W tabeli 1 przedstawiono porównanie mas i momentów bezwładności maszyny w układzie Halbacha oraz klasycznym

(przyjęto odpowiednio gęstości żelaza $\rho_{Fe} = 7,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ oraz włókna węglowego³ $\rho_C = 1,8 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$).

Podsumowanie

Zastosowanie szyku Halbacha jako układu wzbudzenia bezrdzeniowego silnika tarczowego istotnie zwiększa wartość indukcji w szczelinie. Pole magnetyczne jest skondensowane w mniejszym obszarze, a strumień rozproszenia po zewnętrznej stronie magnesów jest minimalny. Brak konieczności stosowania tarcz ferromagnetycznych skutkuje zmniejszeniem masy maszyny oraz momentu bezwładności wirnika, a tym samym polepszenie jej własności w stanach dynamicznych. Wzrasta natomiast masa i koszt magnesów. Maszyna ze wzbudzeniem w układzie Halbacha rozwija większy moment obrotowy przy mniejszej masie własnej niż maszyna ze wzbudzeniem w układzie klasycznym. Prezentowana konstrukcja przeznaczona jest przede wszystkim do szybkoobrotowych napędów wymagających wysokiego wskaźnika mocy jednostkowej, np. w elektro-narzędziach.

Przypisy

1. <http://www.launchpnt.com/portfolio/transportation/halbach-electric-motor/>
2. CIERZNIIEWSKI P.: *Bezrdzeniowy silnik tarczowy z magnesami trwałymi*. Politechnika Szczecińska, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne 77/2007. Szczecin.
3. <http://www.performance-composites.com>

Sebastian Latosiewicz – Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej