

Zastosowanie układu Halbacha w bezrdzeniowych silnikach tarczowych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń MES 3D wybranych wielkości bezrdzeniowego silnika tarczowego wzbudzanego magnesami trwałymi ułożonymi w szereg Halbacha. W konstrukcji takiej tarczy wirnika wykonane są z materiałów kompozytowych, a strumień magnetyczny zamyka się przez same magnesy oraz szczeliny powietrzne i twornik. Otrzymane wyniki zostały porównane z wynikami obliczeń maszyny o identycznych gabarytach, ale ze wzbudzeniem klasycznym, w którym ferromagnetyczne tarcze wirnika stanowią element domykający drogę dla strumienia magnetycznego. Zaprezentowano również wstępne wyniki obliczeń silnika z dodatkowymi tarczami: twornika i wzbudzenia.

Abstract. This article presents some properties and results of calculations of the AFPMM's with Halbach array and composites rotor disks and compare it to machine with similar dimensions but with ferromagnetic disks. This paper presents an analysis of selected properties of AFPMM with Halbach array. In this construction disks are made of composite material, and the magnetic flux is closed by an air gaps and the magnets only. The results have been compared with data calculated by device with identical dimensions but of a standard excitation where ferromagnetic rotor discs guide the magnetic flux. Presented are also generic results from calculations where coreless motor has been extended with additional stator (whose winding is assembled with the main disk in serial or parallel connection) and additional rotor disk with permanent magnets were stacked. (Use of the Halbach array in coreless disk type motors).

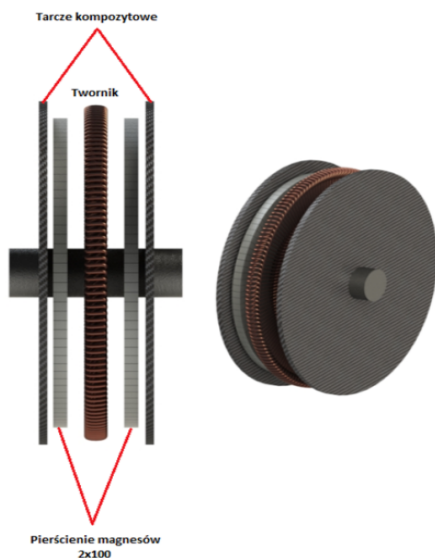
Słowa kluczowe: maszyna tarczowa, maszyna bezrdzeniowa, układ Halbacha, AFPMM.

Keywords: disc machine, coreless machine, Halbach array, AFPMM.

doi:10.12915/pe.2014.01.41

Wstęp

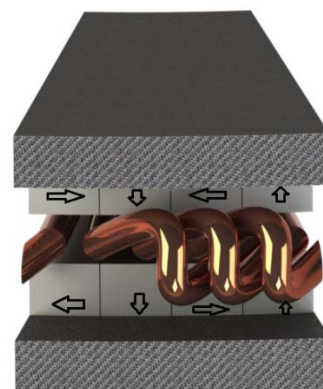
Współczesne magnesy trwałe umożliwiają utworzenie obwodu magnetycznego maszyny elektrycznej bez udziału ferromagnetyka. Stanowi to bardzo ciekawą i ważną alternatywę dla dotychczasowych konstrukcji. Celem artykułu jest przedstawienie wybranych własności bezrdzeniowego silnika tarczowego, wzbudzanego magnesami trwałymi w tzw. układzie Halbacha, pod kątem porównania z odpowiadającą wymiarami maszyną z ferromagnetycznym rdzeniem wzbudzenia [1].



Rys.1. Silnik tarczowy ze wzbudzeniem w układzie Halbacha

Modelowanym silnikiem jest konstrukcja o 25 parach biegunów, oparta wymiarowo na konstrukcji opisanej w [2] – rysunek 1. Układ wzbudzenia stanowią dwa pierścienie utworzone z magnesów neodymowych, tworzących układy Halbacha, usytuowane na wirujących tarczach kompozytowych, połączonych wałem. Nieruchomy twornik maszyny posiada trójfazowe uzwojenie faliste, tworzące wraz z wypełniaczem dysk położony pomiędzy pierścieniami magnesów. Całość przewidziana jest do zasilania prądem przemiennym o częstotliwości 3,5 kHz, co odpowiada prędkości obrotowej 8400 obr/min.

Na rysunku 2 przedstawiono wycinek modelu MES 3D silnika (14,4°), na którym widać przymocowane do tarcz wirnika magnesy, tworzące układ Halbacha, oraz fragment uzwojenia twornika pomiędzy nimi (widoczne są głównie połączenia czołowe uzwojenia). Na magnesach zaznaczono kierunki ich polaryzacji. Rozpiętość kątowa pojedynczego magnesu wynosi 3,6°, co skutkuje rozpiętością kątową 1 bieguna 7,2°; na każdy biegun wzbudzenia przypadają 2 magnesy. Grubość każdego magnesu wynosi 5 mm, sumaryczna wielkość szczelin powietrznych i twornika (tj. odległość pomiędzy przeciwległymi magnesami) także 5 mm. Promień zewnętrzny pierścienia magnesów wynosi 64 mm. Stosunek wewnętrznego promienia pierścienia magnesów do jego promienia zewnętrznego wynosi 0,578, co jest wartością zbliżoną do optymalnej dla tego typu maszyn [3, 4]. Indukcja remanentu magnetycznego użytych w obliczeniach magnesów neodymowych wynosi 1,1 T. Układ wzbudzenia maszyny składa się więc z 2 pierścieni utworzonych ze 100 trapezoidalnych magnesów każdy.

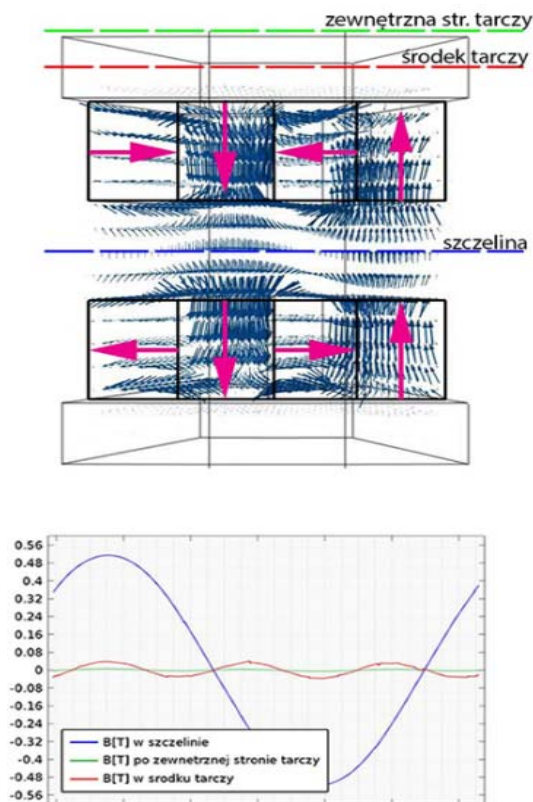


Rys.1. Wycinek (1/25 obwodu) silnika tarczowego ze wzbudzeniem w układzie Halbacha

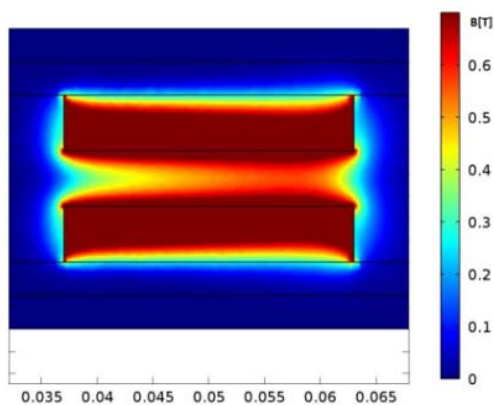
Wzbudzenie w układzie Halbacha vs. układ klasyczny

Zastosowanie układu Halbacha wyeliminowało konieczność stosowania ferromagnetycznych tarcz wzbudzenia – strumień zamyka się przez same magnesy oraz przez szczeliny powietrzne i twornik. Układ ten wraz z zaznaczonymi zwrotami wektorów polaryzacji magnetycznej

poszczególnych magnesów został przedstawiony na rysunku 3 (z wyjętym twornikiem). Na rysunkach 4 i 5 zaprezentowano wybrane wyniki obliczeń przestrzennych (3D) pola magnetycznego na przekroju podłużnym maszyny, wykonanym po jej wymiarze promieniowym (rys. 4), i poprzecznym (względem wału), na powierzchni kołowej usytuowanej w połowie odległości pomiędzy przeciwległymi tarczami wzbudzenia (rys. 5).

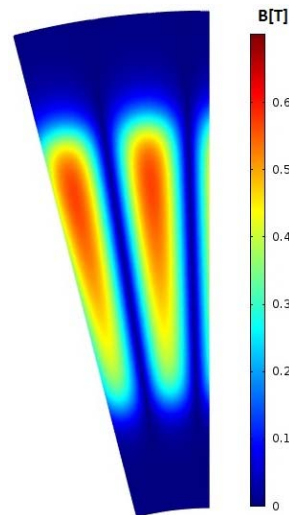


Rys.3. Polaryzacja poszczególnych magnesów w układzie Halbacha oraz rozkład indukcji magnetycznej na średnim promieniu maszyny (w połowie wysokości magnesów)

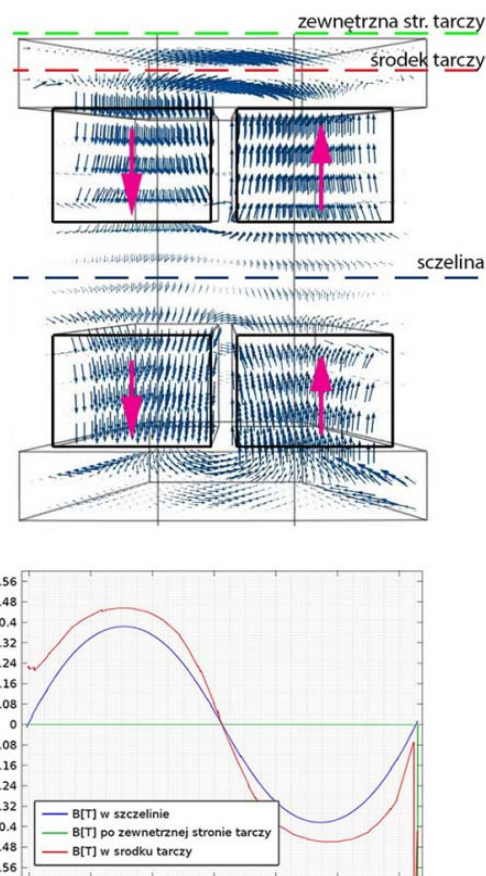


Rys.4. Rozkład indukcji magnetycznej na przekroju podłużnym połowy maszyny, wykonanym w środku jej bieguna magnetycznego

Wartość indukcji magnetycznej wewnątrz amagnetycznych tarcz nie przekracza 0.05 T. Indukcja magnetyczna pochodząca od wzbudzenia, liczona w połowie odległości pomiędzy przeciwległymi tarczami wzbudzenia, jest funkcją współrzędnej promieniowej maszyny – wraz ze wzrostem jej wartości indukcja rośnie (rys. 5). Jej maksymalna wartość wynosi 0.57 T.



Rys.5. Rozkład indukcji magnetycznej na wycinku powierzchni kołowej, w połowie odległości pomiędzy tarczami wzbudzenia

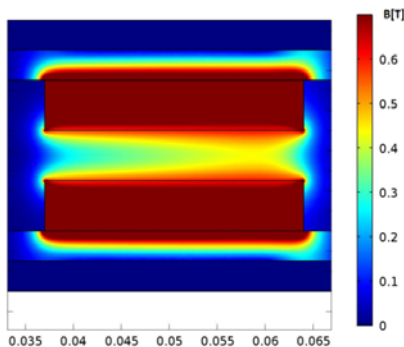


Rys.2. Polaryzacja poszczególnych magnesów w układzie klasycznym oraz rozkłady indukcji magnetycznej na średnim promieniu maszyny (w połowie wysokości magnesów)

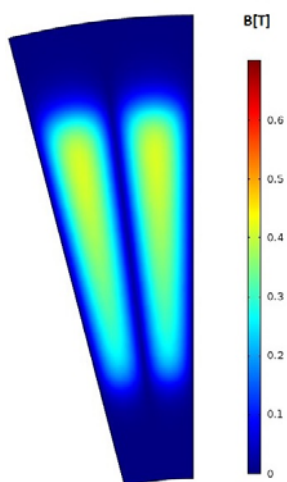
W celach porównawczych dokonano obliczeń maszyny z klasycznym układem wzbudzenia z magnesami trwałymi. W takim układzie magnesy zamocowane są na tarczach ferromagnetycznych, tworząc na każdej z nich naprzemienny układ biegunów: N-S-N-S-.

Rozpiętość pojedynczego magnesu wynosi 6.2°, bieguna pola - 7.2°, tak jak w maszynie z układem Halbacha. Pozostałe parametry geometryczne i fizyczne pozostały bez zmian w stosunku do maszyny z układem Halbacha (takie same szczeliny powietrzne, grubość tarcz wzbudzenia i tarczy twornika, grubość i wysokość

magnesów oraz ich rodzaj i typ). Rozwiązanie to zostało przedstawione na rysunku 6. Na rysunkach 7 i 8, analogicznie do rysunków 4 i 5, zaprezentowano wybrane wyniki obliczeń przestrzennych pola magnetycznego.



Rys.7. Rozkład indukcji magnetycznej na przekroju podłużnym połowy maszyny, wykonanym w środku jej bieguna magnetycznego (maszyna ze wzbudzeniem w układzie klasycznym)



Rys.8. Rozkład indukcji magnetycznej na wycinku powierzchni kołowej usytuowanej w połowie odległości pomiędzy tarczami wzbudzenia (maszyna ze wzbudzeniem w układzie klasycznym)

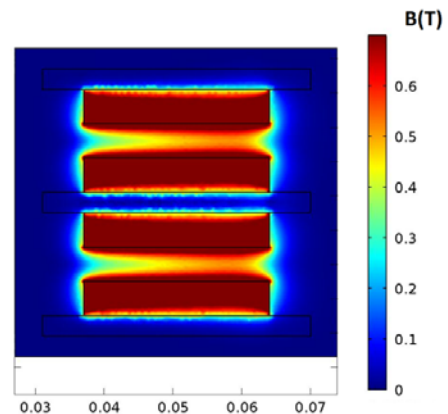
Wartość maksymalna indukcji magnetycznej wewnątrz ferromagnetycznych tarcz wzbudzenia jest nieco większa niż w szczelinach powietrznych maszyny. Indukcja magnetyczna pochodząca od wzbudzenia, liczona w połowie odległości pomiędzy przeciwległymi tarczami wzbudzenia, jest funkcją współrzędnej promieniowej maszyny – wraz ze wzrostem jej wartości indukcja rośnie (rys. 8). Jej maksymalna wartość wynosi 0.42 T.



Rys.3. Dwutwornikowy silnik tarczowy ze wzbudzeniem w układzie Halbacha

Porównanie wyznaczonych wartości indukcji magnetycznej w obu układach, na promieniu średnim magnesów (tj. w połowie ich wysokości), pozwala stwierdzić, że w przypadku zastosowania układu Halbacha maksymalna wartość tej indukcji jest o 35% większa niż w przypadku układu klasycznego. Równocześnie indukcja po zewnętrznej stronie magnesów (wewnątrz tarcz kompozytowych) jest mniejsza niż 0.05T. Wykorzystując ten fakt można rozbudować dwutwornową konstrukcję przez przymocowanie do zewnętrznej strony tarczy z magnesami kolejnego pierścienia magnesów, dołożenie drugiej tarczy twornika oraz trzeciej tarczy wzbudzenia, podnosząc w ten sposób moc maszyny. Rozwiązanie takie przedstawiono na rysunku 9.

Przestrzenny rozkład indukcji magnetycznej w przekroju podłużnym takiej maszynie przedstawiono na rysunku 10.



Rys.4. Rozkład indukcji magnetycznej wzdłuż promienia maszyny, w środku jej bieguna magnetycznego (przekrój podłużny maszyny z 3 tarczami wzbudzenia i 2 twornikami)



Rys 5. Trójfazowe uzwojenie faliste

Obliczony (MES 3D) średni moment elektromagnetyczny wytwarzany przez maszynę dwutwornikową jest, jak można było się spodziewać, dwukrotnie większy niż moment maszyny z pojedynczym twornikiem.

Uzwojenie twornika

W modelach MES 3D przedstawionych maszyn wykorzystano trójfazowe uzwojenie faliste. Rozpiętość kątowna kolejnych „cewek” tego uzwojenia wynosi 7,2°. Uzwojenie jednej fazy tworzy 50 „cewek”. Specyficzne wyprofilowanie połączeń czołowych pozwala na umieszczenie części aktywnych „cewek” (tj. ich boków) w jednej płaszczyźnie, co umożliwia zminimalizowanie

grubości twornika oraz bezproblemowe dopasowanie do siebie kolejnych faz uzwojenia, które są przesunięte względem siebie tylko o $2,4^\circ$.

W przedstawionym modelu wykorzystano uzwojenie, którego każda „cewka” posiada 6 zwojów. W wyniku obliczeń MES 3D otrzymano indukcyjności uzwojenia przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Indukcyjności faz maszyny

| Indukcyjność | Wartość indukcyjności [μH] |
|--------------|---|
| L_A | 21,0 |
| L_B | 21,0 |
| L_C | 21,0 |
| L_{AB} | 6,5 |
| L_{AC} | 3,8 |
| L_{BC} | 6,5 |

Indukcyjności tego samego uzwojenia, ale umieszczonego pomiędzy tarczami ferromagnetycznymi, do których przymocowane są magnesy (maszyna ze wzbudzeniem w układzie klasycznym) są niemal identyczne, co wynika z relatywnie dużej odległości pomiędzy tarczami wzbudzenia.

Różnica pomiędzy indukcyjnościami wzajemnymi wynika z pewnej niesymetrii połączeń czołowych (zarówno na promieniu zewnętrznym uzwojenia jak i wewnętrznym), którą można zaobserwować na rysunku 12 i w powiększeniu na rysunku 13.



Rys. 13. Fragment połączeń czołowych uzwojenia twornika

Źródłem niesymetrii są widoczne „przerwy” w ciągłości połączeń czołowych. Sposobem na eliminację takiej niesymetrii mogłoby być połączenie ze sobą szeregowo lub równoległe 2 takich uzwojeń, np. w maszynie dwutwornikowej.

Moment elektromagnetyczny maszyny

Moment rozwijany przez przedstawianą maszynę został obliczony przy założeniu sinusoidalnego zasilania prądowego faz, o amplitudzie 5 A i częstotliwości 3,5 kHz. Kierowano się tutaj informacjami zawartymi w [2] i także przekrojem poprzecznym uzwojenia – przyjęto gęstość prądu skutecznego $3,55\text{A}/\text{mm}^2$. Nie przeprowadzono obliczeń termicznych, istotnych w maszynach z magnesami trwałymi [5]. Dla takich warunków zasilania wartość wyliczonego, średniego momentu elektromagnetycznego wyniosła 1,35 Nm. Amplituda pulsacji obliczeniowego momentu elektromagnetycznego wynosi 0,2 Nm.

Dla maszyny z klasycznym układem wzbudzenia i tym samym uzwojeniem twornika, przy identycznych parametrach zasilania, wartość momentu średniego wyniosła 0,85 Nm.

Masy i momenty bezwładności wirników

W tabeli 2 przedstawiono porównanie obliczeniowych mas i momentów bezwładności wirnika maszyny z magnesami w układzie Halbacha oraz wirnika maszyny o klasycznym układzie wzbudzenia. Obliczeń dokonano w oparciu o wymiary geometryczne maszyn, przyjmując gęstość ferromagnetyka $7,8\text{ g}/\text{cm}^3$ i gęstość włókna węglowego, jako możliwego materiału amagnetycznych tarcz wirnika [6], $1,8\text{ g}/\text{cm}^3$.

Tabela 2. Masy i momenty bezwładności

| Masy i momenty bezwładności | Układ Halbacha | Układ klasyczny |
|--|----------------|-----------------|
| Masa pojedynczego magnesu [g] | 3,04 | 5,5 |
| Masa wszystkich magnesów [g] | 608 | 550 |
| Masa 1 tarczy bez magnesów [g] | 82 | 353 |
| Masa 2 tarcz bez magnesów [g] | 164 | 706 |
| Masa całkowita wirnika [g] | 772 | 1253 |
| Moment bezwładności tarcz i magnesów względem osi obrotu [$\text{kg}\cdot\text{cm}^2$] | 20,7 | 32,5 |

Podsumowanie

Zastosowanie układu Halbacha jako układu wzbudzenia bezrdzeniowego silnika tarczowego istotnie zwiększa wartość indukcji w szczelinie powietrznej maszyny. Strumień magnetyczny jest skondensowany 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 polepszeniem jej własności dynamicznych. Wzrasta natomiast masa i całkowity 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. elektronarzędzi.

LITERATURA

- [1] Cierzniewski P., Bezrdzeniowy silnik tarczowy z magnesami trwałymi, *Zeszyty Problemowe Politechniki Szczecińskiej – Maszyny Elektryczne*, 2007, nr.77
- [2] LaunchPoint Technologies Inc., USA, materiały firmowe dot. bezrdzeniowego silnika tarczowego, http://www.launchpnt.com/Portals/53140/docs/dual-halbach-motor-data-sheet_r1.pdf
- [3] Glinka T., Tomaszewicz W., Silniki tarczowe, *BOBRME Komel Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, 2008, nr 80, 161-166
- [4] Drabek T., Latosiewicz S., Projekt bezrdzeniowego silnika tarczowego z magnesami trwałymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, 85 (2009), nr.10, 21-23
- [5] Dybowski P., Milej W., Obliczenia polowe zjawisk cieplnych w maszynie z magnesami trwałymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr.6, 146-149
- [6] Performance Composites Ltd., materiały firmowe dot. włókien węglowych, <http://www.performance-composites.com/carbonfibre/carbonfibre.asp>

Autorzy: dr inż. Tomasz Drabek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: drabek@agh.edu.pl; mgr inż. Sebastian Latosiewicz, doktorant w Katedrze Elektroenergetyki i Automatyki Systemów Przetwarzania Energii, E-mail: sebastian.latosiewicz@gmail.com.