

Modułowa maszyna magnetokomutacyjna

Streszczenie. Przedstawiono nową koncepcję budowy maszyny elektrycznej opartej na powtarzalnych modułach elektromechanicznych. Omówiono metodę analizy pola magnetycznego w układzie trójwymiarowym z wykorzystaniem środowiska Maxwell.

Abstract. The paper presents a new concept of building an electric machine based on repetitive electromechanical modules. Designed analysis method for magnetic field with the use of a three-dimensional Maxwell environment. (**Modular reluctance electric machine**)

doi:10.12915/pe.2014.11.50

Wstęp

Modułowa maszyna magnetokomutacyjna jest nową koncepcją budowy przetworników elektromechanicznych, jakimi są obecnie stosowane silniki, prądnice i przetwornice wirujące. Wiadomo, że maszyny elektryczne o klasycznej konstrukcji mają szereg istotnych wad:

- znaczna droga strumienia magnetycznego w rdzeniu, w porównaniu ze szczeliną powietrzną w której zachodzi przetwarzanie energii, prowadzi to do zwiększenia strat w żelazie oraz konieczności zwiększenia siły magneto-motorycznej uzwojeń;

- długie części czołowe uzwojeń, które nie uczestniczą w procesie przekształcania energii, powoduje to zwiększenie strat w miedzi;

- konieczność rozłożenia uzwojenia na obwodzie stojana w celu otrzymaniażądanego rozkładu pola magnetycznego, powoduje utrudnienia konstrukcyjne;

- złożona konstrukcja uzwojeń wymagająca pracy ręcznej i skutkująca ograniczeniem możliwości automatyzacji produkcji tradycyjnych maszyn elektrycznych.

Powyższe wady powodują zwiększenie masy, gabarytów oraz kosztów wytwarzania maszyn elektrycznych. Począwszy od lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku przeważa tendencja zastosowania maszyn synchronicznych o komutacji elektronicznej (MSKE).

Jak wykazują badania ostatnich lat, istotna poprawa charakterystyk energetycznych, zmniejszenie masy i gabarytów przetworników energii budowanych na zasadzie MSKE osiąga się za pomocą racjonalnego kształtowania dróg strumieni magnetycznych i prądów elektrycznych w obwodach elektrycznych i magnetycznych maszyn elektrycznych. Podstawą tego, jest odejście od klasycznych rozwiązań konstrukcyjnych i nowe spojrzenie na konfigurację maszyny.

Rozwój w dziedzinach elektroniki mocy i sterowania mikroprocesorowego zaowocował pojawieniem się nowych rozwiązań sterowania MSKE oraz odpowiednio nowych właściwości zbudowanych na ich podstawie systemów mechatronicznych, przy czym najnowsze tendencje konstrukcyjne charakteryzują się intensywnym rozwojem konstrukcji w trzech podstawowych rozwiązaniach:

- MSKE ze wzbudzeniem magnetoelektrycznym (PMSM – permanent magnet synchronous machine, BLDC – Brushless DC motor),
- MSKE z samowzbudzeniem (SRM – Switched Reluctance Motor).
- MSKE ze wzbudzeniem elektromagnetycznym (VRM – Variable reluctance machine).

Maszyny ze wzbudzeniem magnetoelektrycznym [1,2,3,5,8,9,13,14] mają wysokie parametry energetyczne, wysoką wydajność i niezawodność. Używają magnesy stałe (samary - kobalt. neodym –żelaza- bor), które pozwalają na uzyskanie wysokich wskaźników. Integralnie te są

szacowane na poziomie 4,2 kg / kW dla maszyn o wysokiej prędkości i 1-3 kg / Nm dla maszyn małej prędkości.

Jednak niedawno nastąpił znaczny wzrost cen magnesów ziem rzadkich (MZR). Wynika to z faktu, że głównym dostawcą na rynek światowy MZR – Chiny zaczęły dość gwałtownie zmniejszać ich eksport. Chiny mają dwa duże programy rządowe - rozwój i produkcję transportu elektrycznego i elektrownie wiatrowe.,

Po wyjściu tych programów na poziom zaplanowany produkcji neodymu ledwo wystarczy na pokrycie własnych potrzeb. Na tej podstawie można stwierdzić, że w najbliższej przyszłości ceny MZR będzie bardzo wysoki, albo po prostu te magnesy nie będą dostępne.

MSKE z samowzbudzeniem.

Realizacja MSKE z samowzbudzeniem w pewnym sensie wprowadziła rewolucję w spojrzeniu na procesy zachodzące w maszynie indukcyjnej, ponieważ przy impulsowym zasilaniu uzwojeń fazowych stojana istnieje możliwość takiego sterowania, które w potrzebnej chwili zapewnia wyzerowanie prądów uzwojeń [6,7,11,15,17,19]. Gwarantuje to brak momentów hamujących a zatem podniesienie wskaźników energetycznych. Dzisiaj wszystkie wiodące zagraniczne firmy elektrotechniczne, takie jak „Task Drives”, „SRD Ltd”, „Emerson Electric Co.” i inne zajmują się opracowaniem silników tego typu .

Perspektywy ich rozwoju już nie wywołują wątpliwości, opanowana została skala mocy do 1000 kW przy nominalnych prędkościach obrotowych od 500 do 200000 1/min.

Wydajność wykorzystania tych maszyn w sposób istotny zwiększa się, jeżeli zachodzi potrzeba regulacji prędkości obrotowej w napędach elektrycznych z ciężkimi warunkami pracy dla hutnictwa, górnictwa i transportu.

Z analizy porównawczej konstrukcji wynikają podstawowe cechy MSKE z samowzbudzeniem:

- obecność dwustronnego jawnego uzębienia systemu magnetycznego silnika elektrycznego, pozwalająca zwiększyć asymetrię magnetyczną maszyny i moment elektromagnetyczny prostymi środkami;
- moment elektromagnetyczny ma charakter reluktancyjny, oparty na zjawisku wciągania rdzenia w pole uzwojenia z prądem;
- dyskretność pracy: przy najprostszym sposobie komutacji uzwojeń, w każdej chwili czasu zasilana jest tylko jedna faza;
- słaby magnetyczny związek między fazami pozwala rozpatrywać ich pracę niezależnie;
- wysoki stopień elektromechanicznego przekształcenia energii wskutek silnego lokalnego nasycenia materiału ferromagnetycznego w strefach uzębienia.

Konstrukcje MSKE ze wzbudzeniem elektromagnetycznym.

Od lat 50-tych XX wieku, MKSE ze wzbudzeniem elektromagnetycznym zdobyły pozycję lidera w systemach zasilania (samoloty i technologie kosmiczne, kolej i inne środki transportu) [20,21,26,28].

Zalety MKSE ze wzbudzeniem elektromagnetycznym są następujące:

- niższe prądy uzwojenia wzbudzenia;
 - brak pulsacji prądu twornika;
 - niezawodne wzbudzenie, symetria napięć fazowych;
 - brak dużego przemagnesowania zębów wirnika, co zmniejsza straty przy dużej prędkości;
 - wyższa wydajność w porównaniu do innych maszyn.
- Elektromechaniczne przekształcenie energii w MKSE ze wzbudzeniem elektromagnetycznym związane jest ze zmianą indukcyjności wzajemnej między uzwojeniem twornika i uzwojeniem wzbudzenia, która występuje podczas przesuwania zębów wirnika w stosunku do zębów stojana.

Maszyna z komutacją strumienia magnetycznego.

W dziedzinie budowy MSKE ze wzbudzeniem elektromagnetycznym pojawiły się nowe rozwiązania konstrukcyjne, poszerzające możliwości tych maszyn. Rozwiązania te zostały zaproponowane i opracowane przez prof. A. Afonina. razem ze współpracownikami [1-4].

Konstrukcje MSKE ze wzbudzeniem elektromagnetycznym zostały nazwane strukturami osiowo-promieniowymi a same maszyny w przytoczonych pracach otrzymały nazwę maszyn z komutacją strumienia magnetycznego.

Właśnie w tych maszynach była po raz pierwszy realizowana idea modułowości. Zastosowanie maszyn z komutacją strumienia magnetycznego pozwala ominąć ograniczenia mocy jednostkowej przy osiąganiu doskonałych wskaźników masy i gabarytów. Dlatego badania w tym kierunku skoncentrowano na optymalizacji wielowarstwowych struktur tarczowych i opracowaniu uproszczonej metody ich projektowania. Wyniki przeprowadzonych badań teoretycznych i eksperymentalnych [1] pokazują, że struktury wielowarstwowe maszyny pozwalają osiągnąć wysokie wskaźniki gabarytowe i energetyczne. Otrzymane wyniki świadczą o tym, że w zaproponowanych konstrukcjach można osiągnąć obniżenie masy jednostkowej do 0.5 kg/kVA przy prędkości obrotowej 3000 1/min, co w sposób istotny przekracza możliwości innych typów maszyn elektrycznych. Najbardziej obiecujące zastosowania MSKE ze wzbudzeniem elektromagnetycznym w systemach transportowych, ponieważ można niezależnie regulować strumień wzbudzenia.

Modułowa maszyna magnetokomutacyjna.

Modułowa maszyna magnetokomutacyjna (MMM) została opracowana [18,23] jako dalsza rozbudowa maszyny z komutacją strumienia magnetycznego.

Nowe rozwiązanie modułowej maszyny magnetokomutacyjnej jest oparte na komutacji magnetycznej polegającej na mechanicznym ukierunkowaniu strumienia magnetycznego w module elektromagnetycznym.

Modułowa maszyna magnetokomutacyjna jest zbudowana z wielu powtarzalnych, zwartych konstrukcyjnie modułów elektromagnetycznych, co ogranicza długość drogi strumienia magnetycznego eliminując podstawową wadę klasycznych konstrukcji.

Moduły elektromagnetyczne w MMM są osadzone w nieruchomym stojanie, daje możliwość takiego połączenia

uzwojeń roboczych, że otrzymujemy w zależności od potrzeb maszynę 2 fazową, 3 fazową lub wielofazową, czego nie umożliwia maszyna magnetokomutacyjna.

Metoda obliczenia pól magnetycznych

Głównym problemem obliczania pola magnetycznego MMM, jest niemożliwość obliczenia w układzie dwuwymiarowym. W celu obliczenia pola magnetycznego w układzie trójwymiarowym jest konieczne stosowanie nowoczesnych technologii komputerowych opartych na metodzie elementów skończonych (MES), której stosowanie pozwala na dużą dokładność przy każdej geometrii modułów maszyny elektrycznej i uwzględnieniu nieliniowych właściwości materiałów ferromagnetycznych [8,18,27].

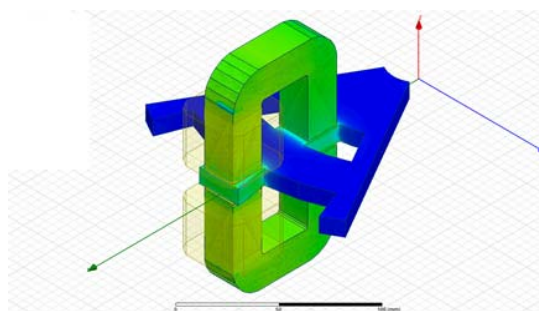
Obliczenie pola magnetycznego maszyny elektrycznej metodami numerycznymi umożliwia analizowanie pola pojedynczych elementów rozmieszczonych w obwodzie magnetycznym. Kompleksowa granica obszaru zębów, duża wielkość obszaru obliczeniowego i obecność środowisk o różnej przenikalności magnetycznej wymagają dużej liczby węzłów przy wykorzystaniu MES. Dlatego też konieczne jest wykonanie obliczeń w ograniczonym obszarze obejmującym przykładowo tylko współpracujące zęby. Takie podejście jest wykorzystywane do analizowania maszyny magnetokomutacyjnej.

Metoda elementów skończonych jest podstawą do obliczania pola elektromagnetycznego modułowej maszyny magnetokomutacyjnej w pakiecie Maxwell 14 [8].

Głównymi etapami obliczania pola magnetycznego i siły elektromagnetycznej w maszynie są:

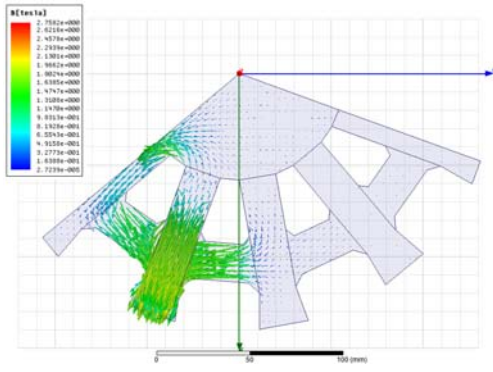
- Budowa geometrii obwodu magnetycznego i cewek,
- Określenie właściwości materiału i geometrii modelu,
- Określenie warunków brzegowych,
- Konstruowanie uzwojeń, określenie prądu w uzwojeniach,
- Określenie i generacja siatki elementów skończonych,
- Przeprowadzenie obliczenia z uwzględnieniem algorytmów komutacji układu energoelektronicznego,
- Wizualizacja i analiza wyników.

Model trójwymiarowy MMM w obszarze ograniczonym, w którym jest uwzględniony tylko jeden rdzeń jednej fazy uzwojenia trójfazowego obejmującego tylko współdziałające zęby, jest pokazany na rys. 1.

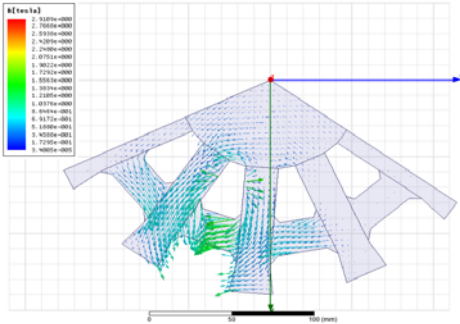


Rys.1. Trójwymiarowy model MMM.

Przy ruchu wirnika strumień magnetyczny maszyny kolejno przełącza się między fazami, gdy biegun (zab) wirnika znajduje się w szczeliny odpowiadającego rdzenia. Warunek ten jest określany dalej jako stan *spójny*. Stan niespójny, odpowiada położeniu wirnika, przy którym rdzeń wirnika jest w szczeliny między zębami stojana. Wyniki obliczeń pola w stanie spójnym i niespójnym są pokazane na rysunku 2 a i b.



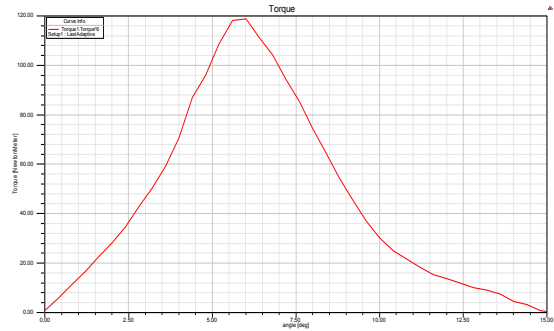
a)



b)

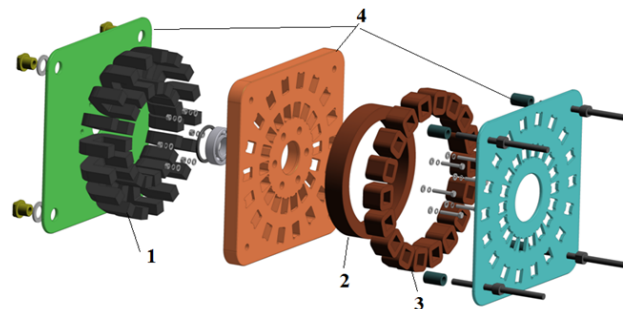
Rys. 2. Model oraz wyniki obliczeń i pól a) w stanie spójnym, b) w stanie niespójnym.

Wyniki obliczeń momentu maszyny przy zmianie położenia wirnika gdy prąd płynie w jednej fazie przedstawia rys.3.



Rys. 3. Moment generowany przez sześć par uzwojeń fazy A podczas przemieszczania wirnika o 15 stopni.

Rozwiązanie konstrukcyjne jednej połowy stojana modułowej maszyny magnetokomutacyjnej jest przedstawiono na rysunku 4. której parametry są podane w Tabeli 1.



Rys. 4. Konstrukcja stojana modułowej maszyny magnetokomutacyjnej

Tabela 1. Parametry maszyny

Liczba modułów	Liczba faz	Maks. moment Nm	Maks. prędkość (obliczona) rad/s	Waga kg	Napięcie zasilania V	Prąd modułu A	Prąd udzenia wzb-udzenia A
18	3	105	200	25	50 -600	10	3

Wnioski końcowe.

Modułowa konstrukcja maszyny elektrycznej, pozwala na:

- uproszczenie technologii wytwarzania maszyny;
- zwiększenie mocy kosztem rozbudowy konstrukcji w kierunku osiowym i promieniowym, bez zmiany struktury modułu;
- prostym przełączeniem uzwojeń modułów w jednej konstrukcji realizować szereg maszyn o różnych napięciach i różną liczbę faz;
- partycjonowanie uzwojeń i przekształtników półprzewodnikowych, zwiększając w ten sposób niezawodność maszyny;
- realizację w jednej konstrukcji różnych typów maszyn (MSKE samowzbudnych i z wzbudzeniem elektromagnetycznym);
- stworzenie uniwersalnej metody projektowania opartego na konstrukcji oddzielnego modułu elektromechanicznego.

LITERATURA.

1. Afonin A.A., Kramarz W.: Cierzniewski P., Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną. Szczecin Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej 2000, 241.
2. Afonin A. A.: Trends in development of the unconventional electromechanical systems, in: Proc. 2nd Intern. Conf. on Unconventional and Electromechanical Systems UEES'96, Poland 1996, Vol. 1, s. 25 - 36.
3. Afonin A. A.: Magnetic field of an ironless PM motor. Proc. of the 6th Intern. Conf. on Unconventional Electromechanical and Electrical Systems UEES'04. Alushta, Ukraine, Sept. 24-29, 2004, 225-230. SEMA.
4. AfoninA., German-Galkin S., Cierzniecki P., Hrynkiewicz J., Kramarz W., Szymczak P.: Modular reluctance machine. PCTInt. Public Number WO01/03270.AI. IntPublic. Date 11 January 2001. Prioritydata, P,333333 22 May 1999.
5. Asko Parviainen.: Design of axial-flux permanent magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines. Diss. Lappeenranta University of Technology. Lappeenranta 2005.
6. Bahram, A. "Variable Reluctance Machines-Analysis Design and Control". Jouve, Paris, June 2003.

7. Bienkowski, K., Szczypior, J., Bucki, B., Biernat, A., Rogalski, A.: "Influence of geometrical parameters of Switched Reluctance Motor on electromagnet torque". *Berichte und Informationen HTW Dresden*, ISSN 1433-4135, 1/2002
8. Deshpande U.S.: 2003. Recent Advances in Materials for Use in Permanent Magnet Machines. *Review*. In *Proceedings of IEEE Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03*, Madison, United States, 1-4 June 2003, Vol. 1, pp. 509-515.
8. Getting Started with Maxwell: Designing a Rotational Actuator, Ansys, Inc., Inventory: 002889 Ansoft Maxwell 3D v.11 User's guide, Ansoft Corp., Rev.2.0, 28 July 2006
9. Gieras J.F., Wing M.: *Permanent Magnet Motor Technology*. - New York; Basel: Marcel Dekker, 2002.
10. Grote, K.-H., Feldhusen, J.: „Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau”. Springer Verlag Berlin, 20. Auflage, 2005
11. Henneberger, G., Viorel, J.A.: "Variable Reluctance Electrical Machines". Shaker Verlag, Aachen, 2001.]
12. Huang S., Aydin M., Lipo T.A.: Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assessment for Two Major Topologies. In *Proceedings of IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting*. Vol. 3, p. 1619-1625.
13. Hull J. R., Turner L. R.: Magnetomechanics of Internal-Dipole, Halbach-Array Motor/Generators. *IEEE Trans. Magn.*, 36 (2000), n.4, 2004-2011.
14. Rare-Earth: Permanent Magnets VACOD, VACOMAX Published by VACUUMSCHMELZE GMBH & Co. KG, Hanau. VACUUMSCHMELZE GMBH & Co. KG 2003.
15. Krishnan R.: "Switched reluctance motor drives". Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications. CRC Press LLC, Boca Raton, Florida, 2001.
16. Qu R., Aydin M., Lipo T.A., 2003. Performance Comparison of Dual-Rotor Radial-Flux and Axial-Flux Permanent-Magnet BLDC Machines. In *Proceedings of IEEE Electric Machines and Drives Conference, IEMDC'03*, Madison, United States, 1-4 June 2003, Vol. 3, pp. 1948-1954.
17. Wichert, T.: "Influence of power electronics on design of Switched Reluctance Machines". *Proceedings of the EPE 2005*, Dresden, Germany 2005.
18. Герман-Галкин С.Г., Бормотов А. В. Модульная вентильная машина с коммутацией магнитного потока. *Силовая электроника*. №4, 2012.
19. Голландцев Ю.А.: Вентильные индукторно-реактивные двигатели. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2003. – 148 с.
20. Козаченко В.Ф., Обухов Н.А., Анучин А.С., Жарков А.А.: Модульная микроконтроллерная система управления для отечественной серии преобразователей частоты «Универсал». Труды V-й Международной конференции «Электромеханика, электротехнология и электро-материаловедение» МКЭЭ-2003. Ч.1. Крым, -2003.
21. В.Ф.Козаченко, В.Н. Остриров, А.М. Русаков. Перспективные типы тяговых электроприводов. 7 Международная конференция по автоматизированному электроприводу. Иваново АЭП - 2012.
23. «Модульная электрическая машина». Патентообладатели: Герман-Галкин С.Г., Загашвили Ю.В., Верюжский В.В. Патент на полезную модель №105540. Заявка №2010113746. Приоритет полезной модели 31.03.2010 г. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей РФ 10.06.2011 г.
24. Никифоров Б.В.: «Корабельные системы электродвижения». Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2006.
25. Овчинников И.Е.: Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (курс лекций). – СПб., Корона – Век. 2006.
26. Радимов И.Н., Рымша В.В. Сопоставительный анализ вентильных двигателей для электропривода мотор-колес легких транспортных средств // *Электромашинобуд. та електрообладн.* – 2005. – Вип. 64. – С. 33-36.
27. Рымша В.В., Радимов И.Н., Баранцев М.В. Технология расчета трехмерного стационарного магнитного поля в вентильно-реактивных электродвигателях на платформе Ansys Workbench // *Электротехника і електромеханіка.* – 2006. - № 6. – С. 25-32. 6.
28. Электропривод на базе вентильных индукторных машин с электромагнитным возбуждением / В.Ф.Козаченко, Д.В. Корпусов, В.Н. Остриров, А.М. Русаков / *Электронные компоненты.* – № 6. – 2005.

<http://www.agatspb.ru/>
<http://www.aetz.ru/>
<http://elmech.mpei.ac.ru/>
<http://pifelkon.narod.ru/>
<http://student.km.ru/>
<http://www.electrotermosvar.ru/>
http://motorcontrol.ru/publications/eksikator_vid.pdf
<http://www.tatelectromash.ru/new.php>
<http://www.ruselkom.ru/>
http://www.konstruktor.net/Articles/Pdf/valve_inductor_electrical_drive.pdf
<http://mp3.freeshared.ru/?string=Maxwell Maxwell Online Help>

Autorzy: *prof. dr hab. inż. Sergiej German-Galkin, Akademia Morska, Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej, Wały Chrobrego ½, 70-500 Szczecin, E-mail: gqsg@yandex.ru*
dr hab. Inż. Jarosław Hryniewicz, Akademia Morska, Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej, Wały Chrobrego ½, 70-500 Szczecin, E-mail: J.Hryniewicz@am.szczecin.pl