Studium zastosowania silników reluktancyjnych przełączalnych do napędów lekkich pojazdów elektrycznych

Piotr Bogusz, Mariusz Korkosz, Adam Mazurkiewicz, Jan Prokop

1. Wstęp

Duży postęp w ostatnich latach w dziedzinie wydajności elektrochemicznych źródeł zasilania [1–3] spowodował intensywny rozwój badań pojazdów z napędem elektrycznym [4, 5]. Zasadniczą zaletą tych pojazdów jest możliwość pracy w pomieszczeniach zamkniętych, w strefach o ograniczonej emisji spalin czy też w strefach ograniczonego hałasu. Napędy elektryczne w porównaniu do pojazdów spalinowych są cichobieżne i mają znacznie większą sprawność przetwarzania energii. Głównymi elementami, mającymi duży wpływ na właściwości eksploatacyjne i zasięg pojazdu, są bateria akumulatorów oraz silnik elektryczny. Napęd elektryczny pojazdu powinien charakteryzować się wysoką sprawnością, dużym momentem rozruchowym, szerokim zakresem regulacji prędkości oraz możliwością zwrotu energii do źródła zasilania podczas hamowania. W większości produkowanych dotychczas lekkich pojazdów elektrycznych były stosowane silniki szeregowe albo obcowzbudne prądu stałego. W ostatnim czasie, ze względu na większą niezawodność oraz sprawność, są wdrażane silniki bezkomutatorowe. W lekkich pojazdach elektrycznych są stosowane silniki o mocach rzedu kilku kilowatów.

Celem niniejszego artykułu jest analiza porównawcza zaprojektowanych przez autorów dwóch silników reluktancyjnych przełączalnych (SRM) o konstrukcji trójpasmowej 12/8 oraz czteropasmowej 16/12, przeznaczonych do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego.

W publikacji zamieszczono charakterystyki statyczne projektowanych silników otrzymane na drodze obliczeń polowych, metodą elementów skończonych. Przedstawiono także zależności prądów i momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika przy stałej prędkości obrotowej. Porównano przydatność obu silników do zastosowania w napędzie małego pojazdu elektrycznego.

2. Założenia projektowe

Typowym lekkim pojazdem elektrycznym jest wózek, tzw. platformowy, który jest produkowany w różnych odmianach, między innymi jako pojazd pasażerski, bagażowy lub do zastosowań specjalnych. W ramach prowadzonego obecnie projektu badawczego autorzy zakupili taki pojazd z przeznaczeniem do badań testowych nowo projektowanych napędów elektrycznych z silnikami reluktancyjnymi przełączalnymi. Na podstawie informacji o parametrach wyjściowych rozpatrywanego pojazdu elektrycznego założono, że projektowany napęd elektryczny powinien spełniać następujace wymagania:

THE STUDY ON THE SWITCHED RELUCTANCE MOTORS USED FOR LIGHT ELECTRIC VEHICLE DRIVE

Abstract: The paper presents project descriptions of two switched reluctance motors. The motors are assigned to drive light electric vehicles. 12/8 and 16/12 types SRM have been analyzed. Static characteristics of the designed motors have been presented. The characteristics were received by field calculations with finite element method. Current and torque waveforms were generated with the use of transient analysis of the simulation model. Both motors were compared and checked if they are useful for electric vehicle drive.

- moc wyjściowa nie mniejsza niż 3,3 kW przy prędkości 4500 min⁻¹;
- minimalny moment rozruchowy nie mniejszy niż 20 Nm przy prądzie nieprzekraczającym 130 A;
- zasilanie z baterii o napięciu znamionowym 48 V;
- sprawność wypadkowa projektowanego układu napędowego powina być większa niż napędu z silnikiem prądu stałego (>80%);
- szeroki zakres regulacji prędkości obrotowej przy zachowaniu jednocześnie możliwie wysokiej sprawności wypadkowej napędu;
- możliwie największe odzyskiwanie energii w trakcie procesu hamowania pojazdu;
- projektowany napęd powinien zapewniać pracę czterokwadrantową;
- możliwie długie okresy międzyprzeglądowe pojazdu;
- napęd powinien charakteryzować się dużą odpornością na wpływ temperatury otoczenia;
- średnica zewnętrzna pakietu stojana nie może przekroczyć 155 mm;
- długość całkowita silnika nie może przekroczyć 230 mm;
- silnik ma być przeznaczony do pracy S2.

3. Analiza rozwiązań konstrukcyjnych silników reluktancyjnych przełączalnych

W przypadku maszyn reluktancyjnych przełączalnych istnieje szereg rozwiązań konstrukcyjnych [6, 7]. Jednak zastosowanie tego typu maszyn w pojazdach elektrycznych powoduje pewne ograniczenia. Właściwie konstrukcje jedno- i dwupas-



mowe nie mogą być stosowane ze względu na brak momentu rozruchowego w każdym położeniu wirnika. Dlatego też autorzy biorą pod uwagę konstrukcje maszyn trójpasmowych o konfiguracji 6/4 i 12/8 oraz czteropasmowych o konfiguracji 8/6 i 16/12. Rozwiązania o większej liczbie pasm, pomimo korzystniejszych właściwości ruchowych, nie były rozpatrywane z uwagi na zwiększony koszt układu energoelektronicznego oraz większe straty przełączeniowe. Na rys. 1 przedstawiono przykładowe rozwiązania maszyn reluktancyjnych przełączalnych, branych pod uwagę w napędzie elektrycznym małego mobilnego pojazdu zasilanego z baterii akumulatorów.

Konstrukcje tzw. bazowe, czyli 6/4 i 8/6, oferują większą sprawność w odniesieniu do analogicznych rozwiązań 12/8 i 16/12 z uwagi na dwukrotnie mniejsze częstotliwości przełączeń. Jednak jedną z zasadniczych wad maszyn reluktancyjnych przełączalnych jest generowany przez nie hałas oraz duże pulsacje momentu. Dlatego też autorzy w pierwszej fazie projektu brali pod uwagę dwie maszyny: trójpasmową o konfiguracji 12/8 oraz czteropasmową o konfiguracji 16/12. Tego typu rozwiązania ograniczają generowany przez maszynę hałas, ze wzgledu na równomierny rozkład sił na obwodzie stojana i wirnika.

4. Projekt silników reluktancyjnych przełączalnych

Metodykę projektowania silników SRM oparto o badania symulacyjne podzielone na następujące etapy:

- wstępny projekt modelu silnika w programie CAD;
- badanie podstawowych właściwości projektowanego silnika za pomocą obliczeń polowych;
- wyznaczanie wypadkowych charakterystyk silnika wraz z analizą prądów i momentu w dziedzinie czasu i częstotliwości w oparciu o tzw. symulacyjne modele obwodowe;
- korekta wstępnego modelu silnika, mająca na celu optymalizację konstrukcji ze względu na wybrane kryteria.

SRM 12/8	SRM 16/12
3	4
12	16
8	12
150	150
0,3	0,3
18	11,5
18,5	11,8
10,8	8,8
12,5	9,5
45,6	56
160	160
20	20
0,012	0,018
	SRM 12/8 3 12 8 150 0,3 18 12,5 45,6 160 20 0,012

Tabela 1. Wymiary geometryczne i dane nawojowe projektowanych silników SRM



Rys. 2. Geometria silnika SRM 12/8 dla kątów β_s i β_r równych odpowiednio: a) 13° i 13,5°; b) 22° i 22,5°



Badania symulacyjne prowadzono dla różnych geometrii silników SRM. Na rys. 2 przedstawiono przykładowe geometrie silnika o konstrukcji 12/8 dla kątów β_s i β_r związanych z szerokością bieguna stojana i zęba wirnika, równych odpowiednio: 13° i 13,5° (rys. 2 a) oraz 22° i 22,5° (rys. 2 b).

Na rys. 3 przedstawiono przykładowy wynik symulacji rozkładu linii strumienia magnetycznego dla konstrukcji silnika, odpowiednio: 12/8 (rys. 3 a) oraz 16/12 (rys. 3 b), dla tzw. niewspółosiowego położenia wirnika. Przykładowo na rys. 4 zilustrowano rozkład gęstości strumienia magnetycznego dla tzw. położenia współosiowego wirnika, odpowiednio dla konstrukcji 12/8 (rys. 4 a) oraz 16/12 (rys. 4 b).



Na podstawie przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych dla różnych wymiarów geometrycznych rozpatrywanych maszyn ostatecznie dobrano podstawowe wymiary konstrukcyjne, takie jak [6]:

- grubość szczeliny powietrznej δ;
- szerokość kąta bieguna stojana β_s;
- szerokość kąta zęba wirnika β_r ;
- grubość jarzma stojana y_s;
- grubość jarzma wirnika y_r;
- długość pakietu stojana i wirnika l_{Fe}.

Określono dane nawojowe N_{ph} obu silników. Ponieważ właściwości silników reluktancyjnych przełączalnych silnie zależą od grubości szczeliny powietrznej, w procesie projektowania założono jej wartość równą 0,3 mm. Taka grubość szczeliny pozwala na uzyskanie dużej wartości momentu silnika, a jednocześnie jest możliwa do wykonania w rzeczywistym silniku.

W tabeli 1 zestawiono wybrane wymiary geometryczne oraz dane nawojowe zaprojektowanych silników SRM.

4.1. Charakterystyki statyczne projektowanych silników Silnik o konstrukcji 12/8

W przypadku silnika SRM 12/8 bardzo istotny jest prawidłowy dobór kątów biegunów stojana β_s i zębów wirnika β_r . Podyktowane jest to koniecznością zapewnienia minimalnej wartości momentu rozruchowego T_{lmin} . Zwiększając wartości kątów β_s i β_r , uzyskuje się większy zakres nakładania się profili indukcyjności sąsiednich pasm. Zbyt duża wartość tych kątów zmniejsza przestrzeń dostępną na uzwojenia oraz zwiększa wartość indukcyjności minimalnej L_u . To powoduje, że w trak-



cie wyboru wartości tych kątów należy uwzględnić nie tylko wymagania dotyczące minimalnego momentu rozruchowego, ale również możliwości praktycznej realizacji projektu. Na podstawie wielokrotnych obliczeń dobrano podstawowe wymiary maszyny, dla których obliczono podstawowe zależności indukcyjności i momentów poszczególnych pasm w funkcji kąta obrotu wirnika. Na rys. 5 przedstawiono zależności indukcyjności własnej pasma zaprojektowanego silnika w funkcji kąta położenia wirnika dla różnych wartości prądów wzbudzenia. Na rys. 6 przedstawiono zależność momentów pochodzących od dwóch pasm silnika oraz momentu wypadkowego przy prądzie I = 130 A w funkcji kąta położenia wirnika θ .



Jak można zaobserwować na rys. 6, minimalny moment rozruchowy T_{lmin} wytwarzany przez silnik dla prądu 130 A (w każdym paśmie) wynosi ok. 21 Nm. W zakresie pracy, w którym przewodzą dwa pasma, jest możliwy wzrost wytwarzanego momentu rozruchowego. Należy jednak pamiętać, że w takiej sytuacji ze źródła pobierana może być dwukrotnie większa wartość prądu. Sytuacja ta jest niekorzystna, gdyż wymaga zastosowania bardziej wydajnego źródła zasilania. Przy założeniu, że pobierany ze źródła prąd nie przekroczy 130 A (tzn. nie występuje jednoczesne przewodzenie dwóch uzwojeń) minimalny moment rozruchowy przy pewnych położeniach wirnika nie osiągnie 20 Nm. Na rys. 7 przedstawiono zależność wartości średniej wytwarzanego momentu elektromagnetycznego T_{eav} pojedynczego pasma w funkcji prądu pasma *I*.

Silnik o konstrukcji 16/12

Konstrukcja czteropasmowa, w odróżnieniu od trójpasmowej, pozwala na zmniejszenie pulsacji momentu silnika, gdyż posiada większą liczbę biegunów, co powoduje, że nie ma konieczności maksymalizacji wartości kątów β_s i β_r . Na rys. 8 przedstawiono zależności indukcyjności własnej L_{self} uzwojenia stojana w funkcji kąta położenia wirnika θ dla różnych wartości prądu *I*.

Na rys. 9 przedstawiono zależność momentu elektromagnetycznego dla sąsiednich pasm oraz momentu sumarycznego w funkcji kąta położenia wirnika przy prądzie w każdym paśmie równym I = 130 A.

Jak można zauważyć, w przypadku konstrukcji czteropasmowej, minimalna wartość momentu rozruchowego T_{lmin} przy założeniu wzbudzenia dwóch pasm prądem 130 A wynosi 23,5 Nm. Silnik jest w stanie wytworzyć wymaganą minimalną wartość momentu rozruchowego równą 20 Nm przy prądzie pobieranym ze źródła zasilania nieprzekraczajacym 130 A.

Na rys. 10 przedstawiono zależność wartości średniej momentu elektromagnetycznego pojedynczego pasma w funkcji prądu *I*.

4.2. Przebiegi czasowe prądów i momentu

Silnik o konstrukcji 12/8

W oparciu o model polowo-obwodowy wyznaczono przebiegi czasowe prądów pasmowych, prądu źródła zasilającego oraz momentu elektromagnetycznego przy zasilaniu każdego pasma z klasycznego półmostka typu H (2T-2D).

W modelu polowo-obwodowym przyjęto następujące założenia upraszczające:







Rys. 10. Zależność wartości średniej momentu elektromagnetycznego pojedynczego pasma w funkcji prądu – SRM 16/12



Rys. 11. Przebiegi prądów pas
m w funkcji kąta położenia wirnika dla prędkości n = 1900 min^
-1

- pominięto straty w żelazie;
- pominięto wpływ temperatury na zmianę parametrów silnika i układu zasilającego;
- pominięto straty przełączeniowe w układzie zasilającym;
- założono stałą wartość napięcia zasilającego.

Na podstawie obliczonych zależności możliwe jest określenie charakterystyk ruchowych silnika. Na rys. 11–12 przedstawiono przebiegi prądów pasm (rys. 11), momentu elektromagnetycznego (rys. 12 a) oraz prądu źródła zasilającego (rys. 12 b) w funkcji kąta położenia wirnika θ , dla określonych parametrów sterujących, przy prędkości bazowej równej $n = 1900 \text{ min}^{-1}$.



Rys. 12. Przebiegi: a) momentu elektromagnetycznego; b) prądu źródła zasilającego w funkcji kąta położenia wirnika dla prędkości $n = 1900 \text{ min}^{-1}$



Widoczne na rys. 11 różnice w kształcie prądów poszczególnych pasm (asymetria prądów), a w konsekwencji nieregularności przebiegów momentu elektromagnetycznego i prądu źródła zasilania z rys. 12, wynikają ze sposobu sprzęgania się magne-

Tabela 2. Parametry projektowanych konstrukcji SRM 12/8 i 16/12		
	SRM 12/8	SRM 16/12
Minimalny moment rozruchowy T _{Imin} [Nm]	21	23,5
Indukcyjność $L_u [\mu_H]$	105	97
Indukcyjność $L_a [\mu_H]$	648	468
Prędkość bazowa n_b [min ⁻¹]	1900	1700
Moment przy prędkości bazowej <i>T_{eav}</i> [Nm]	17,8	19,7
Moc wyjściowa P_N przy prędkości n = 4500 min ⁻¹ [kW]	3,3	3.3
Moc maksymalna przy prędkości n = 4500 min ⁻¹ [kW]	4,28	5,1
Sprawność wypadkowa napędu w warunkach znamionowych η [%]	89,6	85,6
Względny zakres stałej mocy	2,37	2,65

tycznego poszczególnych pasm silnika. Sprzężenia międzypasmowe są zależne od konstrukcji silnika, a ich skutki w postaci asymetrii prądów i momentu są mniej widoczne w przypadku konstrukcji czteropasmowej.

Przykładowo na rys. 13 przedstawiono przebiegi momentu elektromagnetycznego (rys. 13 a) oraz prądu źródła zasilającego (rys. 13 b) w funkcji kąta położenia wirnika θ , dla prędkości znamionowej silnika równej $n = 4500 \text{ min}^{-1}$.

Silnik o konstrukcji 16/12

Analogicznie jak dla silnika trójpasmowego 12/8, również dla silnika czteropasmowego 16/12 wyznaczono przebiegi czasowe prądów pasm, prądu źródła zasilającego oraz momentu elektromagnetycznego.

Na rys. 14–15 przedstawiono przebiegi prądów pasm (rys. 14), momentu elektromagnetycznego (rys. 15 a) oraz prądu źródła zasilającego (rys. 15 b) w funkcji kąta położenia wirnika θ , dla określonych parametrów sterujących, przy prędkości bazowej równej $n = 1700 \text{ min}^{-1}$.

Odpowiednio na rys. 16 przedstawiono przebiegi momentu elektromagnetycznego (rys. 16a) oraz prądu źródła zasilającego (rys. 16b) w funkcji kąta położenia wirnika θ , dla prędkości znamionowej silnika równej $n = 4500 \text{ min}^{-1}$.

5. Porównanie parametrów analizowanych konstrukcji silników

W tabeli 2 zestawiono uzyskane na podstawie badań symulacyjnych parametry obu zaprojektowanych konstrukcji silników.

Na rys. 17 przedstawiono wykroje blach stojana dla zaprojektowanych silników, odpowiednio o konstrukcji 12/8 i 16/12.

6. Wnioski

W artykule dokonano porównania dwóch zaprojektowanych silników reluktancyjnych przełączalnych: trójpasmowego 12/8 i czteropasmowego 16/12, przeznaczonych do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego. Z uwagi na geometrie i sposób połączenia uzwojeń obie konstrukcje powinny znacznie ograniczać generowany hałas w porównaniu do maszyny trójpasmowej 6/4 i czteropasmowej 8/6. Maszyna czteropasmowa 16/12 pomimo gorszej sprawności wypadkowej (85% w warunkach znamionowych) oferuje większą wartość momentu rozruchowego bez przekraczania narzuconego maksymalnego prądu źródła zasilającego. Występujące tętnienia momentu elektromagnetycznego są mniejsze niż w maszynie trójpasmowej 12/8. W konstrukcji czteropasmowej znacznie łatwiej zastosować programową me-







Rys. 15. Przebiegi: a) momentu elektromagnetycznego; b) prądu źródła zasilającego w funkcji kąta położenia wirnika dla prędkości $n = 1700 \text{ min}^{-1}$

todę ograniczania tętnień momentu elektromagnetycznego bez istotnego pogarszania sprawności wypadkowej napędu. W analizowanym przypadku maszyna czteropasmowa posiada korzystniejszą charakterystykę mechaniczną z uwagi na szerszy zakres pracy ze stałą mocą oraz większą przeciążalność przy prędkości znamionowej. Dlatego zdaniem autorów ta konstrukcja bardziej nadaje się do projektowanego napędu niż konstrukcja trójpasmowa 12/8.



Rys. 16. Przebiegi: a) momentu elektromagnetycznego; b) prądu źródła zasilającego w funkcji kąta położenia wirnika dla prędkości *n* = 4500 min⁻¹



— reklama

7. Literatura

- AFFANNI A.; BELLINI A.; FRANCESCHINI G.; GUGLIELMI P.; TASSONI C.: Battery choice and management for new-generation electric vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2005, pp. 1343–1349.
- [2] HAIMING W., HAIFENG X., JONES A.K.: Crucial Issues in Logistic Planning for Electric Vehicle Battery Application Service. Optoelectronics and Image Processing (ICOIP), 2010, pp. 362–366.
- [3] KRISHNAN R.: Switched reluctance motor drive: modeling, simulation, analysis, desing, and applications. CRC Press LLC, 2001.
- [4] LINDEN D., REDDY T. B.: *Handbook of Batteries*. McGraw-Hill, 2002.
- [5] MILLER T.J.E.: *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*. Newnes 2001.
- [6] SHUAI L.; CORZINE K.A.; FERDOWSI M.: High Efficiency Energy Storage System Design for Hybrid Electric Vehicle with Motor Drive Integration. Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE, Volume 5, pp. 2560–2567.
- [7] WANG Y., YIN T.; REN F.: The research of 30kw electric vehicle drive system based on SRM. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE, pp. 1–6.

Praca naukowa wykonana w ramach projektu badawczego własnego N N511 308438

Badania przeprowadzono z zastosowaniem oprogramowania i aparatury zakupionych w wyniku realizacji Projektu nr POPW.01.03.00-18-012/09 "Rozbudowa infrastruktury naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej", współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007–2013, Priorytet I. Nowoczesna Gospodarka, Działanie 1.3 Wspieranie innowacji.

dr inż. Piotr Bogusz, dr inż. Mariusz Korkosz, dr inż. Adam Mazurkiewicz, dr inż. Jan Prokop – Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska; e-mail: pbogu@prz.edu.pl; mkosz@prz.edu.pl; madam@prz.edu.pl; jprokop@prz.edu.pl

artykuł recenzowany