BRANŻOWY OŚRODEK BADAWCZO-ROZWOJOWY
MASZYN ELEKTRYCZNYCH

KOMEL Zał. BOBRME 1948

ISSN 0239-3646

Maszyny elektryczne

Zeszyty Problemowe Nr 93
5/2011

Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne
Maszyny elektryczne

BRANŻOWY OŚRODEK BADAWCZO – ROZWOJOWY
MASZYN ELEKTRYCZNYCH

Maszyny elektryczne

Zeszyty Problemowe

93
5/2011

Katowice, Czerwiec 2011r.

„Nauki i umiejętności wtedy stają się użytecznymi,
gdy są do praktyki publicznej stosowanymi"

St. Staszic

Komitet Naukowy

Ludwik Antal – Politechnika Wrocławska
Jakub Bernatt – BOBRME Komel
Andrzej Bytnar – Instytut Energetyki
Mirosław Dąbrowski – Politechnika Poznańska
Andrzej Demenko – Politechnika Poznańska
Maria Dems – Politechnika Łódzka
Piotr Drozdowski – Politechnika Krakowska
Bronisław Drak – Politechnika Śląska
Ignacy Dudzikowski – Politechnika Wrocławska
Tadeusz Glinka – BOBRME Komel
Zbigniew Goryca – Politechnika Radomska
Vitezslav Hajek – BUT Brno
Jerzy Hickiewicz – Politechnika Opolska
Grzegorz Kamiński – Politechnika Warszawska
Krzysztof Kluszczyński – Politechnika Śląska
Czesław Kowalski – Politechnika Wrocławska
Eugeniusz Koziej – Politechnika Warszawska
Marian Łukaniszyn – Politechnika Opolska
Krystyna Macek-Kamińska – Politechnika Opolska
Jerzy Mukosiej – Instytut Elektrotechniki
Roman Nadolski – Politechnika Radomska
Marian Noga – AGH
Lech Nowak – Politechnika Poznańska
Cestmir Ondrusek – BUT Brno
Teresa Orłowska-Kowalska – Politechnika Wrocławska
Marian Pasko – Politechnika Śląska
Ryszard Pałka – ZUT
Krystyn Pawluk – Instytut Elektrotechniki
Wojciech Pietrowski – Politechnika Poznańska
Włodzimierz Przyborowski – Politechnika Warszawska
Witold Rams – AGH
Stanisław Rawicki – Politechnika Poznańska
Mieczysław Ronkowski – Politechnika Gdańska
Jan Rusek – AGH
Ryszard Rut – Politechnika Rzeszowska
Stefan Sieradzki – TurboCare Poland SA
Tadeusz Sobczyk – Politechnika Krakowska
Paweł Staszewski – Politechnika Warszawska
Zbigniew Stein – Politechnika Poznańska
Wojciech Szeląg – Politechnika Poznańska
Sławomir Szymaniec – Politechnika Opolska
Tadeusz Śliwiński – Instytut Elektrotechniki
Bronisław Tomczuk – Politechnika Opolska
Sławomir Wiak – Politechnika Łódzka
Kazimierz Zakrzewski – Politechnika Łódzka
Ryszard Zapaśnik – Instytut Elektrotechniki
Pavel Záskalický – Technická Univerzita v Košicach
Jan Zawilak – Politechnika Wrocławska
Zbigniew Życki – Instytut Elektrotechniki
Sebastian Szkolny (Sekretarz) – ZUT

Lista recenzentów

Artykuły recenzowali członkowie Komitetu Naukowego

Zespół Redakcyjny

Redaktor Naczelny: Tadeusz Glinka
Redaktor Zeszytu: Ryszard Pałka
Sekretarz Redakcji: Sebastian Szkolny

Wydawca

Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych Komel
Al. W. Roździeńskiego 188, 40-203 Katowice
tel.: +48 32 258-20-41, fax: +48 32 259-99-48
e-mail: info@komel.katowice.pl, www.komel.katowice.pl

Oddano do druku w maj 2011r. Nakład 150 egz.
Arkuszy wydawniczych: 13

Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne umieszczone są
*w międzynarodowej bazie bibliograficzno-abstractowej **INSPEC***
oraz
*w internetowej bazie danych polskich czasopism technicznych **BAZTECH***

Spis treści

Strona

J. Rusek — *Induction machine diagnostics based on FFT analysis of current space vector* 1

P. Drozdowski — *Multiphase cage induction motors for controlled drives* 7

P. Bogusz, M. Korkosz, A. Mazurkiewicz, J. Prokop — *Badania symulacyjne silnika BLDC przeznaczonego do napędu hybrydowego bezzałogowego aparatu latającego* 13

W. Burlikowski — *Reluctance motor mathematical model in natural reference frame using Hamiltonian equations – simulational analysis* 19

M. Gwoździewicz, J. Zawilak — *Single-phase line start permanent magnet synchronous motor* 25

K. Pietrusewicz — *Method for increasing the control robustness of the permanent magnet machine tool feed-drive* 31

W. Jażdżyński — *Modeling and optimization of an IE4-class high-efficiency induction motor prototype* 37

T. Błażejczyk, A. Rudeński — *Application of permanent magnets with multi-directional magnetization in magnetoelectric disc motor* 43

M. Karbowiak, D. Kapelski, B. Jankowski, M. Przybylski, B. Ślusarek — *The application of multi – pole bonded magnets in electric motors* 48

R. Rossa — *Metoda polowo-obwodowa obliczania charakterystyk elektromechanicznych synchronicznych silników reluktancyjnych* 53

A. Młot, M. Korkosz, M. Łukaniszyn — *Analysis of iron and eddy-current loss in low-power BLDC motor with magnet segmentation* 59

B. Tomczuk, J. Zimon, D. Wajnert — *Wpływ połączeń uzwojeń biegunów w aktywnym łożysku magnetycznym na jego parametry elektromagnetyczne* 65

M. Łukaniszyn, M. Kowol, J. Kołodziej — *Weryfikacja pomiarowa dwumodułowego silnika reluktancyjnego ze strumieniem poprzecznym* 71

J. Kołodziej, M. Kowol, M. Łukaniszyn — *Zastosowanie karty szybkiego prototypowania DS1104 do sterowania przełączalnym silnikiem reluktancyjnym ze strumieniem osiowym* 75

P. Bogusz, M. Korkosz, A. Mazurkiewicz, J. Prokop — *Model symulacyjny maszyny reluktancyjnej przełączalnej* 81

P. Bogusz, M. Korkosz, A. Mazurkiewicz, J. Prokop — *Analiza właściwości silników reluktancyjnych przełączalnych do napędów pojazdów elektrycznych* 87

M. Korkosz, A. Młot, M. Łukaniszyn — *Analiza wpływu kąta przesunięcia segmentów magnesów trwałych na parametry silnika BLDC małej mocy* 93

Z. Goryca, A. Pakosz — *Naciąg magnetyczny w niesymetrycznej, wielobiegunowej maszynie z magnesami trwałymi* 99

P. Kowol, Z. Pilch, P. Kielan — *Obliczenia projektowe sprzęgła magnetoreologicznego ze wzbudzeniem hybrydowym* 103

A. Herbst, G. Kamiński — *Porównanie wyników elektromagnetycznych obliczeń polowych 2D i 3D dla jednostronnego indukcyjnego silnika liniowego* 109

J. Szczypior, R. Jakubowski — *Optymalizacja maszyny dyskowej z magnesami trwałymi i bezrdzeniowym twornikiem z uzwojeniem ewolwentowo-promienowym* 113

M. Rzeszowski, J. Szczypior, B. Kamiński — *Konstrukcja i modelowanie bezżłobkowego silnika tubowego z magnesami trwałymi* 119

K. P. Dyrcz — *Wykorzystanie mikrokontrolerów ARM w układach sterowania silnikami z magnesami trwałymi* 125

L. Antal, M. Gwoździewicz — *Badania eksperymentalne rozruchu silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi* 131

T. Zawilak — *Wpływ kształtu szczeliny powietrznej na właściwości silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi* 137

M. Ciurys, I. Dudzikowski — *Analiza bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami NdFeB* 143

J. Kaňuch, Ž. Ferková, — *Disk stepper motor with permanent magnets* 149

S. Wiszniewski — *Wpływ parametrów konstrukcyjnych liniowego silnika tubowego indukcyjnego na wybrane charakterystyki eksploatacyjne* 155

P. Cierzniewski, R. Pałka, P. Paplicki, M. Wardach — *Porównanie obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi* 161

P. Paplicki — *Maszyna tarczowa z magnesami trwałymi – wybrane aspekty budowy parametrycznych modeli geometrycznych 3D* 167

R. Piotuch, R. Pałka — *Porównanie wybranych regulatorów prądu w układzie sterowania silnikiem synchronicznym ze wzbudzeniem od magnesów trwałych* 173

J. Mróz — *Aura magnetyczna silnika indukcyjnego jako sygnał diagnostyczny* 179

R. K. Singh, Ö. Göl, A. Nafalski — *A standalone hybrid power system for the outback community of Oodnadatta in South Australia* 185

Contents

		Page
J. Rusek	*Induction machine diagnostics based on FFT analysis of current space vector*	1
P. Drozdowski	*Multiphase cage induction motors for controlled drives*	7
P. Bogusz M. Korkosz A. Mazurkiewicz J. Prokop	*Simulation research of BLDC motor used for hybrid unmanned aerial vehicle drive*	13
W. Burlikowski	*Reluctance motor mathematical model in natural reference frame using Hamiltonian equations – simulational analysis*	19
M. Gwoździewicz J. Zawilak	*Single-phase line start permanent magnet synchronous motor*	25
K. Pietrusewicz	*Method for increasing the control robustness of the permanent magnet machine tool feed-drive*	31
W. Jażdżyński	*Modeling and optimization of an IE4-class high-efficiency induction motor prototype*	37
T. Błażejczyk A. Rudeński	*Application of permanent magnets with multi-directional magnetization in magnetoelectric disc motor*	43
M. Karbowiak D. Kapelski B. Jankowski M. Przybylski B. Ślusarek	*The application of multi – pole bonded magnets in electric motors*	48
R. Rossa	*Field-circuit method for computing the electromechanical characteristics of synchronous reluctance motors*	53
A. Młot M. Korkosz M. Łukaniszyn	*Analysis of iron and eddy-current loss in low-power BLDC motor with magnet segmentation*	59
B. Tomczuk J. Zimon D. Wajnert	*The influence of windings connection in active magnetic bearing on its electromagnetic parameters*	65
M. Łukaniszyn M. Kowol J. Kołodziej	*Experimental validation of two-module switched reluctance motor with axial flux*	71
J. Kołodziej M. Kowol M. Łukaniszyn	*Application of the DS1104 R&D controller board for switched reluctance motor with axial flux control*	75
P. Bogusz M. Korkosz A. Mazurkiewicz J. Prokop	*The simulation model of a switched reluctance motor*	81
P. Bogusz M. Korkosz A. Mazurkiewicz J. Prokop	*Properties analysis of switched reluctance motors used for electric vehicle drive*	87
M. Korkosz A. Młot M. Łukaniszyn	*Influence of shifted permanent magnet segmentation on lower power BLDC machine performance*	93
Z. Goryca A. Pakosz	*Magnetic tension in asymetric multi-poles machine with permanent magnets*	99
P. Kowol Z. Pilch P. Kielan	*Design calculations for magnetorheological clutch witch hybrid excitation*	103

A. Herbst, G. Kamiński — *Comparison of the results of 2D and 3D finite element electromagnetic modeling of one-side induction motor* 109

J. Szczypior, R. Jakubowski — *Optimization of disk machine with permanent magnet and coreless armature with involutes-radial winding* 113

M. Rzeszowski, J. Szczypior, B. Kamiński — *Design and modelling of coreless permanet magnet tubular motor* 119

K. P. Dyrcz — *The use of the arm microcontroller in the permanent magnet machine control systems* 125

L. Antal, M. Gwoździewicz — *Experimental tests of permanent magnet synchronous motor start–up* 131

T. Zawilak — *The influence of air gap shape on permanent magnet synchronous motor performance* 137

M. Ciurys, I. Dudzikowski — *Analysis of a brushless DC motor with NdFeB magnets* 143

J. Kaňuch, Ž. Ferková, — *Disk stepper motor with permanent magnets* 149

S. Wiszniewski — *Influence of design parameters of a linear tubular induction motor of selected operating characteristics* 155

P. Cierzniewski, R. Pałka, P. Paplicki, M. Wardach — *Comparison of magnetic circuits of electrical machines with permanent magnets* 161

P. Paplicki — *Disc-type electrical machine with permanent magnets – some aspects of creating parameterized geometric 3D models* 167

R. Piotuch, R. Pałka — *Comparison of current controllers in the control system of the PM synchronous motor* 173

J. Mróz — *Magnetic aura of an induction motor as a diagnostic signal* 179

R. K. Singh, Ö. Göl, A. Nafalski — *A standalone hybrid power system for the outback community of Oodnadatta in South Australia* 185

Piotr Cierzniewski, Ryszard Pałka, Piotr Paplicki, Marcin Wardach
Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

PORÓWNANIE OBWODÓW MAGNETYCZNYCH MASZYN ELEKTRYCZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

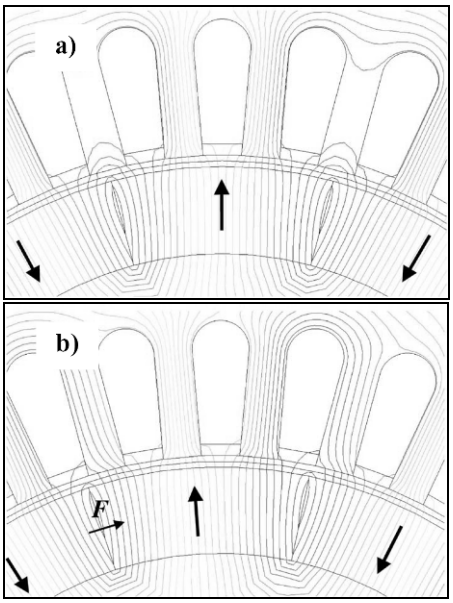
COMPARISON OF MAGNETIC CIURCUITS OF ELECTRICAL MACHINES WITH PERMANENT MAGNETS

Abstract: This paper presents results of simulation researches conducted on magnetic circuits of selected electrical machines excited by permanent magnets. The advantages of this type of machines are: high efficiency, relatively simple construction, smaller material consumption when compared to other machines, as well as lower production and exploitation costs. The examined magnetic circuits have the same stator, although they differ in the construction of the rotor, on which the permanent magnets are located. An identical number of magnetic poles and volume of electromotive force sources have been assumed for all of the models. The data, obtained through research carried out with the assumed average value of electromagnetic torque, magnetic flux density and theirs pulses, have been discussed. The conducted analysis indicated optimal design solutions for smaller oscillations and the maximum value of average electromagnetic torque.

1. Wstęp

Jednym z ważniejszych elementów obliczeń optymalizacyjnych w procesie projektowania maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi, jest wyznaczenie wartości średniej momentu elektromagnetycznego oraz określenie zawartości pulsacji, jakie występują w maszynie [3]. Maszyny elektryczne ze stojanem użłobkowanym charakteryzują się mniejszą szczeliną i większym momentem elektromagnetycznym niż porównywalne maszyny o strukturze bezżłobkowej. Głównym problemem w maszynach użłobkowanych są pulsacje powodujące wibracje i hałas oraz szybsze zużywanie się łożysk. Ponadto pulsacje momentu mogą w niektórych przypadkach decydować o właściwościach napędu, co jest szczególnie istotne w napędach urządzeń precyzyjnych utrudniając m.in. realizację sterowania ze stałą prędkością. Pulsacje momentu elektromagnetycznego można minimalizować przez eliminację przyczyn, już na etapie projektowania maszyny lub przez eliminację skutków w procesie sterowania.

Dominującym składnikiem pulsacji momentu elektromagnetycznego w maszynach z magnesami trwałymi jest moment zaczepowy (*ang. cogging torque*) [2, 4, 6, 7, 8, 9, 10]. W maszynach elektrycznych jest on szkodliwym momentem obrotowym spowodowanym interakcją między magnesami trwałymi a zębami użłobkowanego stojana (skutek różnej reluktancji w szczelinie roboczej). Powstaje on w wyniku współdziałania pola magnetycznego, wytworzonego przez magnesy trwałe umieszczone w wirniku, ze stojanem użłobkowanym.



Rys. 1. Rozpływ strumienia magnetycznego w stanie bezprądowym: a) – w położeniu równowagi, b) – w położeniu niestabilnym

Jego wielkość określa się w stanie bezprądowym. Moment ten dąży do ustawienia wirnika w lokalnie najbliższym stabilnym położeniu równowagi zapewniającym maksymalną przewodność magnetyczną (rys. 1a) [3]. W innym położeniu (rys. 1b) powstaje niezrównoważona siła F między wirnikiem a stojanem starająca się przywrócić stabilne położenie równowagi. Średnia wartość momentu zaczepowego na szeroko-

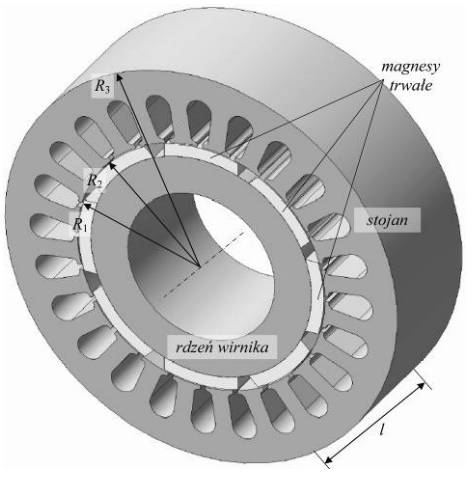
ści jednej podziałki zębowej wynosi zero. Moment zaczepowy powoduje powstanie drgań i hałasu, obniża sprawność oraz wpływa na szybsze zużywanie się części konstrukcyjnych maszyny elektrycznej, głównie łożysk.

Artykuł zawiera wyniki badań symulacyjnych wybranych obwodów magnetycznych maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi przy użyciu programu COMSOL. W pracy przedstawione zostały wyniki badań maszyn pod kątem wartości średniej momentu elektromagnetycznego, indukcji magnetycznej, a także ich pulsacji. Badane obwody magnetyczne posiadają taki sam stojan, różnią się natomiast konstrukcją wirnika, na którym znajdują się magnesy trwałe. We wszystkich modelach zachowano taką samą ilość biegunów oraz objętość źródeł siły magnetomotorycznej. Przeanalizowany został wpływ konstrukcji wirnika na moment zaczepowy wyznaczony w stanie bezprądowym (tj. $j = 0$) oraz moment elektromagnetyczny przy wybranej gęstości prądu równej $j = 10$ A/mm^2 przy założeniu, że współczynnik wypełnienia miedzią wynosi $k_{Cu} = 0{,}5$.

2. Badania symulacyjne

2.1. Modele

Przykładową strukturę obwodu magnetycznego *M1*, która była przedmiotem badań, przedstawia rysunek 2. Dla przejrzystości rysunku pominięto w nim uzwojenia. Struktura ta ma 8-biegunowy wirnik wewnętrzny o promieniu $R_1 = 100$ mm.

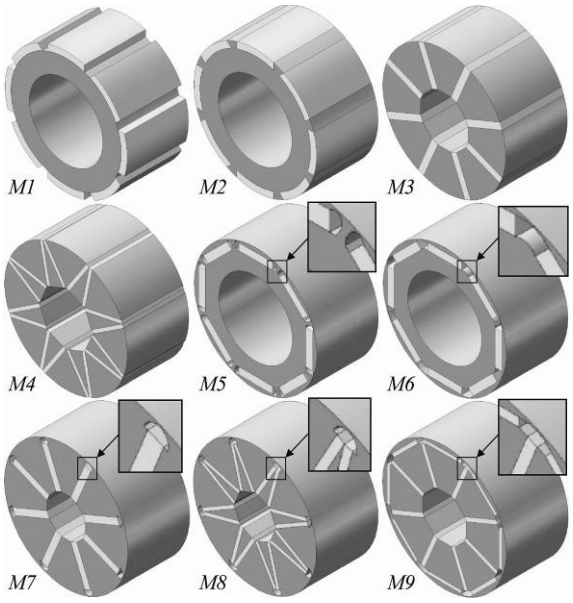


Rys. 2. Model M1

Stojan z pakietu blach ze stali krzemowej składa się z 24-ech żłobków z uzwojeniami. Promień wewnętrzny wynosi $R_2 = 101$ mm. Zatem grubość szczeliny powietrznej to $\delta = 1$ mm. Natomiast promień zewnętrzny stojana wynosi $R_3 = 160$ mm. Długość części aktywnych badanego modelu wynosi $l = 100$ mm. Biorąc pod uwagę wyniki wcześniejszych analiz [11] w badaniach zaproponowano strukturę stojana ze żłobkami, których szerokość otwarcia wynosi $d = 4{,}25$ mm.

Badaniom poddano 9 modeli maszyny elektrycznej różniących się budową wirnika:

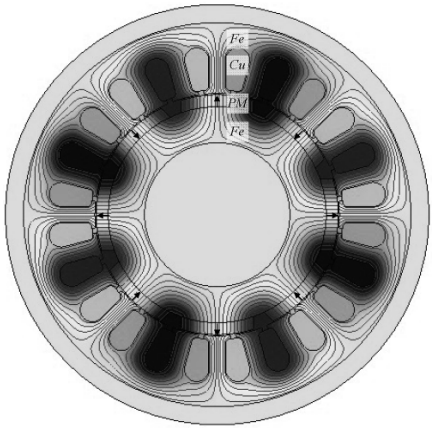
- *M1* – wirnik z magnesami ułożonymi powierzchniowo,
- *M2* – wirnik z magnesami ułożonymi powierzchniowo, zagłębionymi w rdzeniu wirnika,
- *M3* – wirnik z magnesami ułożonymi promieniowo,
- *M4* – wirnik z magnesami podzielonymi i z dodatkowymi nabiegunnikami,
- *M5* – wirnik z magnesami zagłębionymi i z mostami,
- *M6* – wirnik z magnesami zagłębionymi bez mostów,
- *M7* – wirnik z magnesami zagłębionymi ułożonymi promieniowo,
- *M8* – wirnik z magnesami zagłębionymi podzielonymi i z dodatkowymi nabiegunnikami,
- *M9* – wirnik z magnesami zagłębionymi ułożonymi promieniowo i prostopadle do promienia.



Rys. 3. Wirniki badanych modeli maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi

Rysunek 3 przedstawia kształty poszczególnych obwodów wirnika. Wszystkie modele wirników zawierają magnesy trwałe o tej samej objętości

wynoszącej V = 610,5 cm^3 na jeden biegun. Przykładowy model polowy obwodu magnetycznego badanej maszyny elektrycznej o otwarciu żłobka *M1* przedstawiono na rysunku 4. Symbolem PM oznaczone zostały magnesy trwałe typu Nd-Fe-B, natomiast symbolem Cu – uzwojenia w żłobku. Pozostałe powierzchnie modelu obliczeniowego stanowią ferromagnetyk Fe i powietrze. Siatka dyskretyzacyjna, w zależności od badanego modelu, zawierała od ok. 136 tys. do ok. 337 tys. elementów skończonych.



Rys. 4. Model polowy badanej maszyny

Moment elektromagnetyczny w maszynach z magnesami trwałymi można opisać za pomocą równania [1]:

$$T_e = \frac{\pi^2}{60} \cdot \alpha_p \cdot \eta \cdot B \cdot A \cdot D_i^2 \cdot l \,, \qquad (1)$$

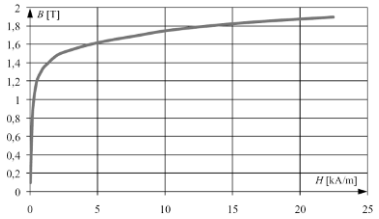
gdzie:

- α_p – współczynnik łuku podziałki biegunowej stojana,
- η – sprawność maszyny,
- B – indukcja magnetyczna w szczelinie powietrznej,
- A – okład prądowy na przyszczelinowej średnicy stojana,
- D – przyszczelinowa średnica stojana,
- l – długość części aktywnej maszyny elektrycznej.

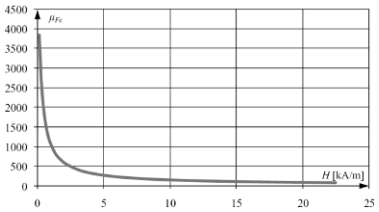
Na kształt momentu elektromagnetycznego w maszynie elektrycznej z magnesami trwałymi przy założeniu stałych gabarytów i stałego wymuszenia prądowego wpływa indukcja magnetyczna w szczelinie powietrznej B. Ponadto kształt indukcji magnetycznej decyduje o kształcie napięcia indukowanego w maszynie. Dlatego w badaniach analizowano również rozkłady indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej w modelach symulacyjnych.

2.2. Przyjęte parametry w modelach symulacyjnych

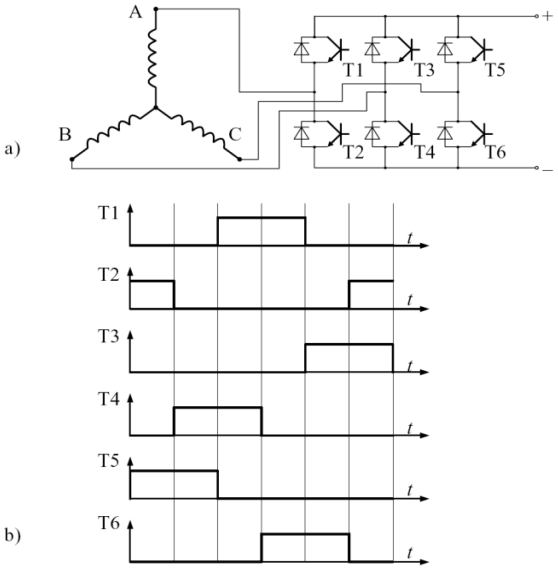
W badaniach symulacyjnych założono, że indukcja remanencji magnesów trwałych wynosi B_r = 1,23 T, a ich względna przenikalność magnetyczna – μ_{PM} = 1,03. Rdzenie stojana i wirnika posiadają parametry stali krzemowej z trzyprocentową zawartością krzemu. Na rysunku 5 przedstawiono pierwotną krzywą magnesowania B = f(H) [13], natomiast rysunek 6 przedstawia zależność względnej przenikalności magnetycznej μ_{Fe} w funkcji natężenia pola magnetycznego H dla stali krzemowej 3% Si.



Rys. 5. Pierwotna krzywa magnesowania B = f(H) stali krzemowej 3% Si



Rys. 6. Względna przenikalność magnetyczna stali krzemowej 3% Si w funkcji natężenia pola magnetycznego

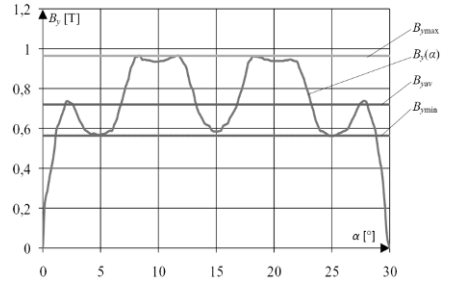


Rys. 7. a) – Schemat zasilania maszyny, b) – sekwencja przełączeń zaworów komutatora elektronicznego

W celu pomięcia wpływu źródła zasilania na pulsacje momentu elektromagnetycznego, podczas badań założono idealną komutację zaworów energoelektronicznych. Przyjęto, że prąd podawany jest na uzwojenia poszczególnych faz maszyny poprzez klucze tranzystorowe [5] zgodnie z sekwencją przełączeń pokazaną na rysunku 7.

2.3. Wyznaczone wielkości z badań

Na podstawie badań wyznaczone zostały:
- rozkłady indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej,
- rozkłady momentu zaczepowego,
- rozkłady momentu elektromagnetycznego,
- wartość średnia indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej,
- wartość średnia modułów momentu zaczepowego,
- wartość średnia momentu elektromagnetycznego,
- współczynnik pulsacji indukcji magnetycznej,
- współczynnik pulsacji momentu elektromagnetycznego.



Rys. 8. Interpretacja graficzna wzoru (2), na przykładowym rozkładzie indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej

Współczynniki pulsacji momentu elektromagnetycznego p_M oraz indukcji magnetycznej p_B wyliczono na podstawie wzorów [12]:

$$p_M = \frac{M_{e\max} - M_{e\min}}{M_{e\text{av}}}, \quad p_B = \frac{B_{y\max} - B_{y\min}}{B_{y\text{av}}} \qquad (2)$$

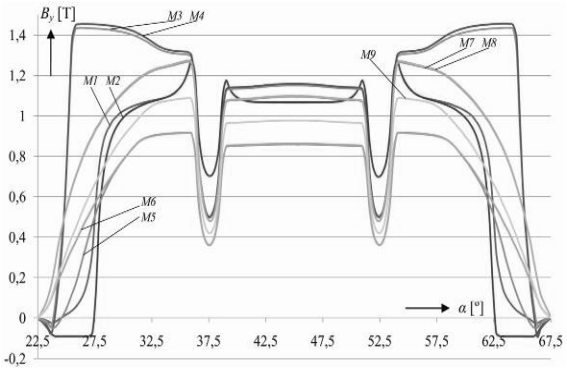
gdzie:
$M_{e\max} - M_{e\min}$ – wartość międzyszczytowa momentu elektromagnetycznego M_e,
$M_{e\text{av}}$ – średnia wartość momentu elektromagnetycznego M_e,
$B_{y\max} - B_{y\min}$ – wartość międzyszczytowa pulsacji B_y,
$B_{y\text{av}}$ – średnia wartość indukcji magnetycznej B_y.

Interpretację graficzną wielkości ze wzorów (2) przedstawia rysunek 8, na którym pokazano przykładowy rozkład indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej wraz z zaznaczonymi wielkościami, niezbędnymi do wyznaczenia współczynnika pulsacji indukcji magnetycznej.

3. Rezultaty badań

3.1. Indukcja magnetyczna

Na rysunku 9 przedstawione zostały uzyskane rozkłady indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej (a więc na promieniu R = 100,5 mm) na łuku jednej podziałki biegunowej. Zgodnie ze wzorem (2) wyznaczone zostały współczynniki pulsacji indukcji magnetycznej p_B. Współczynniki te oraz wartości średnie indukcji magnetycznej zestawione są w tabeli 1. W celu porównania wyników wprowadzono wielkości względne: $b_{y\text{av}}$ – wartości średniej indukcji magnetycznej oraz p'_B – pulsacji indukcji magnetycznej. Względne wielkości uzyskano poprzez podzielenie odpowiednich wartości przez wartości bazowe, otrzymane podczas badań modelu *M1* ze żłobkami zamkniętymi.



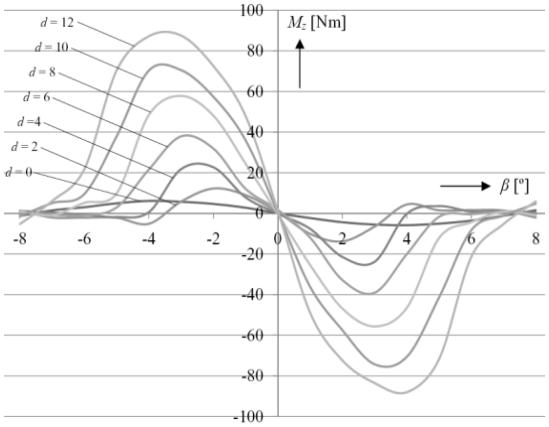
Rys. 9. Rozkłady indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej

Tabela 1. Wyniki badań indukcji magnetycznej

Model	$B_{y\text{av}}$ [T]	$b_{y\text{av}}$	p_B	p'_B
M1	0,81	1,00	0,71	1,00
M2	0,76	0,94	0,76	1,07
M3	1,08	1,34	0,85	1,20
M4	1,09	1,35	0,86	1,21
M5	0,64	0,79	0,88	1,24
M6	0,67	0,83	0,83	1,17
M7	0,93	1,15	0,85	1,19
M8	0,93	1,16	0,85	1,20
M9	0,77	0,96	0,86	1,22

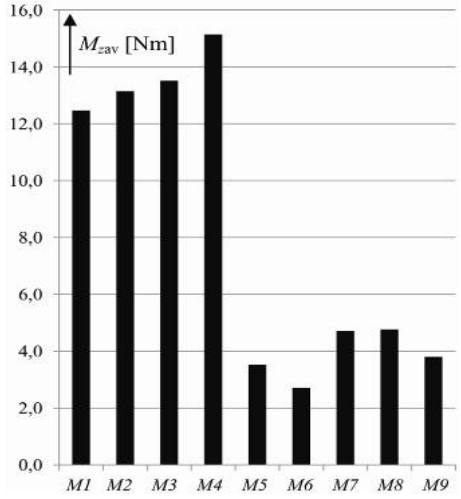
3.2. Moment zaczepowy

Moment zaczepowy został wyznaczony w stanie statycznym. Rozkłady momentów zaczepowych poszczególnych modeli pokazano na rysunku 10. Momenty te zostały wyznaczone przy obrocie wirnika z położenia –8º do +8º co jeden stopień mechaniczny. Punkt na rysunku 0º jest położeniem równowagi – wirnik względem stojana jest w układzie jak na rysunku 4. Na podstawie badań wyznaczono również wartości średnie modułów momentu zaczepowego M_{zav} w badanym zakresie, co prezentuje tabela 2. W tabeli zamieszczono również względny moment m_{zav}, który pokazuje ile razy wzrosła średnia wartość modułów momentu zaczepowego w stosunku do modelu bazowego, za który przyjęto model *M1*.



Rys. 10. Rozkłady momentu zaczepowego

Na rysunku 11 przedstawiono graficznie wyniki badań zawarte w tabeli 2.



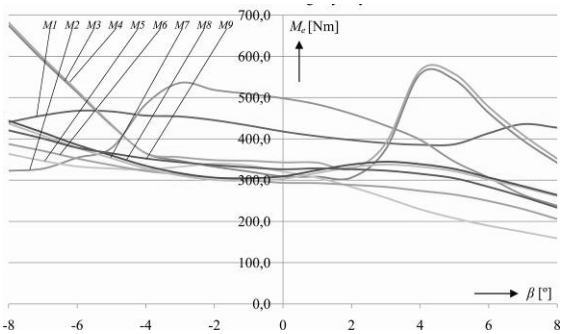
Rys. 11. Wartość średnia modułów momentu zaczepowego

Tabela 2. Wyniki badań momentu zaczepowego

Model	M_{zav} [Nm]	m_{zav}
M1	12,46	1,00
M2	13,14	1,05
M3	13,51	1,08
M4	15,14	1,21
M5	3,51	0,28
M6	2,71	0,22
M7	4,71	0,38
M8	4,77	0,38
M9	3,79	0,30

3.3. Moment elektromagnetyczny

Na rysunku 12 przedstawione zostały rozkłady momentu elektromagnetycznego przy wybranym wymuszeniu w zależności od kąta położenia wału β.

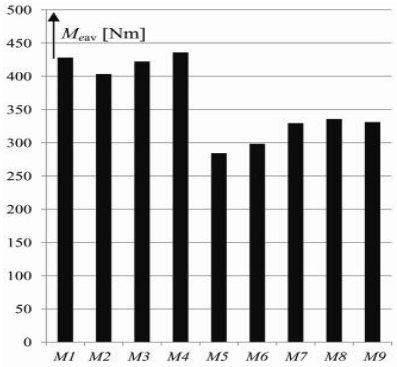


Rys. 12. Rozkłady momentu elektromagnetycznego

Tabela 3. Wyniki badań momentu elektromagnetycznego

Model	M_{zav} [Nm]	m_{eav}	p_M	p'_M
M1	428	1,00	0,19	1,00
M2	403	0,94	0,74	3,84
M3	422	0,99	0,87	4,54
M4	436	1,02	0,81	4,23
M5	284	0,66	0,72	3,74
M6	298	0,70	0,61	3,17
M7	330	0,77	0,53	2,77
M8	336	0,78	0,54	2,79
M9	331	0,77	0,57	2,94

Dla poszczególnych modeli wyznaczone zostały; wartość średnia momentu elektromagnetycznego M_{eav}, względny parametr wartości średniej momentu elektromagnetycznego m_{eav}, współczynnik pulsacji momentu elektromagnetycznego p_M oraz względny parametr pulsacji momentu elektromagnetycznego p'_M.



Rys. 13. Wartość średnia momentu elektromagnetycznego

Wszystkie wyznaczone wielkości zamieszczone są w tabeli 3, natomiast rysunek 13 przedstawia zależność wartości średniej momentu elektromagnetycznego od rodzaju zastosowanego wirnika. Wielkość m_{eav} informuje o zmianach wartości średniej M_e, natomiast wielkość p'_M – o ile zmienił się współczynnik pulsacji w stosunku do modelu bazowego *M1*.

4. Analiza uzyskanych wyników badań

Interpretując uzyskane wyniki badań symulacyjnych można zauważyć, że wartość średnia indukcji magnetycznej B_{yav}, wartość średnia momentu elektromagnetycznego M_{eav} pulsacje indukcji magnetycznej p_B oraz moment zaczepowy M_{zav} w sposób znaczący zależą od rodzaju zastosowanej konstrukcji wirnika. Z badań wynika, że największą wartość średnią momentu elektromagnetycznego osiąga model *M4*. Niestety w tym modelu występują największe wartości momentu zaczepowego. Z drugiej strony można zauważyć, że w strukturach z zagłębionymi magnesami trwałymi moment zaczepowy jest najmniejszy, odbywa to się jednak kosztem wartości średniej momentu elektromagnetycznego.

5. Literatura

[1] Afonin A. A., Kramarz W., Cierzniewski P.: *Elektromechaniczne przetworniki energii z komutacją elektroniczną*, Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2000.

[2] Azarewicz S., Śniegoń S., Węgliński B.: *Wpływ zamknięcia żłobków stojana klinami magnetycznymi na parametry silnika pracującego w ciekłym azocie*, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 63, 2006, wyd. BOBRME Komel.

[3] Ciurys M., Dudzikowski I.: *Analiza wpływu wymiarów i kształtu magnesów trwałych na moment elektromagnetyczny bezszczotkowego silnika prądu stałego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 58, Seria: Studia i Materiały Nr 25, Wrocław 2005.

[4] Gałuszkiewicz Z., Krykowski K., Miksiewicz R., Hetmańczyk J.: *Opracowanie i budowa wysokoobrotowego silnika wzbudzanego magnesami trwałymi*, Wiadomości Elektrotechniczne, Nr3/2010.

[5] Glinka T.: *Maszyny elektryczne wzbudzane magnesami trwałymi*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.

[6] Jahns T. M., Song W. L.: *Pulsating Torque Minimization Techniques for Permanent Magnet AC Motor Drives – A Review*, IEEE Trans. on Industrial *Electronics*, Vol. 43, No. 2, April 1996, pp. 321-330.

[7] Keyahani A., Murthy S. K., Studer C. B., Sebastian T.: *Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines, Electric Machines and Power Systems*, 27,1999, pp. 665-678

[8] Łukaniszyn M., Wróbel R., Jagieła M.: *Moment elektromagnetyczny silników prądu stałego wzbudzanych magnesami trwałymi*, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej Nr 1501, Seria: Elektryka z.177, Gliwice 2001, s. 247-254.

[9] Pochanke A.: *Moment silników bezzestykowych z magnesami trwałymi w stanie bez prądu*, Międzynarodowe XII Symp. Mikromaszyn i Serwonapędów 2000, s. 84–91.

[10] Wardach M.: *Cogging torque reducing in electric machine by poling modification of magnetic circuit*, Przegląd Elektrotechniczny, Nr 2/2009.

[11] Wardach M.: *Moment elektromagnetyczny i zaczepowy maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi,* Wiadomości Elektrotechniczne, Nr 2/2011, s. 21-25.

[12] Wiak S., Welfle H.: *Silniki tarczowe w napędach lekkich pojazdów elektrycznych*, Wyd. Politechniki Łódzkiej, Łódź 2001.

[13] www.stalprodukt.com.pl.

Autorzy

dr inż. Piotr Cierzniewski, tel. 91 449 42 70,
e-mail: cierz@zut.edu.pl.

prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka, tel. 91 449 48 70,
e-mail: rpalka@zut.edu.pl.

dr inż. Piotr Paplicki, tel. 91 449 45 45,
e-mail: paplicki@zut.edu.pl.

dr inż. Marcin Wardach, tel. 91 449 42 17,
e-mail: marwar@zut.edu.pl.

Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka