Wiadomości Elektrotechniczne

02 2011

CZASOPISMO STOWARZYSZENIA ELEKTRYKÓW POLSKICH

WYDAWNICTWO SIGMA NOT | ROK LXXIX | INDEX 38113 | ISSN 0043-5112 | Cena 26,25 zł (w tym 5% VAT)

ELEKTROBUDOWA

ELEKTROBUDOWA SA

WWW.ELBUDOWA.COM.PL

...od projektu do kompleksowej realizacji...

Wiadomości Elektrotechniczne

Każdy numer naszego czasopisma dostępny jest także w Internecie: http://www.sigma-not.pl

Miesięcznik naukowo-techniczny
Stowarzyszenia Elektryków Polskich

Rok założenia 1933
nr 2 (1012)
luty 2011

Redaktor naczelny:
dr inż. Krzysztof Woliński
Sekretarz redakcji:
mgr Olga Górczak-Żaczek
Redaktorzy:
dr inż. Andrzej Baranecki
dr inż. Witold Bobrowski
mgr inż. Andrzej Boczkowski
mgr Urszula Bugaj
prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko
mgr Barbara Kowalska
mgr inż. Miłosława Kujszczyk-Bożentowicz
dr hab. inż. Brunon Lejdy
mgr inż. Piotr Olszowiec
inż. Henryk Ptasiński
dr hab. inż. Aleksandra Rakowska
prof. dr hab. inż. Wojciech Żagan
mgr inż. Andrzej Żurek

Redakcja:
00-950 Warszawa, skr. poczt. 1004
tel./fax 22 619 43 60
22 818 95 30
e-mail: red.we@sigma-not.pl

Prenumerata i kolportaż:
Zakład Kolportażu
Wydawnictwa SIGMA-NOT
tel./fax 22 840 35 89
e-mail: kolportaz@sigma-not.pl

Reklamy i ogłoszenia:
Dział Reklamy i Marketingu
Wydawnictwa SIGMA-NOT
tel./fax 22 827 43 65
e-mail: reklama@sigma-not.pl

Skład i druk:
Drukarnia Wydawnictwa SIGMA-NOT
e-mail: drukarnia@drukarnia.sigma-not.pl

Czasopismo korzysta z dofinansowania Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Artykuły główne są recenzowane i w ocenie MNiSzW uzyskują 6 punktów.

Wydawca:
Wydawnictwo Czasopism
i Książek Technicznych
SIGMA NOT Sp. z o.o.
00-950 Warszawa, skr. poczt. 1004
ul. Ratuszowa 11, tel. 22 818 09 18
e-mail: informacja@sigma-not.pl
Internet: http://www.sigma-not.pl

Portal Informacji Technicznej
www.sigma-not.pl

Nakład: do 3000 egz.
Cena 26,25 zł (w tym 5% VAT)
Informacje o prenumeracie na str. 64
INDEX 38113 ISSN 0043-5112

SPIS TREŚCI

ANALIZY – BADANIA – PRZEGLĄDY

Energetyka słoneczna w Europie i na świecie
Jan M. Olchowik 3

Czy elektroenergetyka rozproszona może stanowić realną alternatywę dla elektroenergetyki konwencjonalnej?
Mirosław Gajer 6

Analiza niezawodności elektroenergetycznej sieci rozdzielczej średniego napięcia z wykorzystaniem sieci bayesowskich
Adam Klimaszewski, Włodzimierz Korniluk 10

Wyznaczanie stopnia zestrojenia kompensacji ziemnozwarciowej w sieciach SN na podstawie pomiaru drgań własnych obwodu doziemnego
Jacek Handke, Józef Lorenc 16

Moment elektromagnetyczny i zaczepowy maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi
Marcin Wardach 21

INFORMACJE FIRMOWE

Silniki z magnesami trwałymi zmieniają się stosownie do potrzeb rynkowych – mniejsze rozmiary i waga oraz większa sprawność 26

Nowoczesne rozwiązanie ZPUE S.A. – rozdzielnica Rotoblok VCB 33

OPRACOWANIA – WDROŻENIA – EKSPLOATACJA

Modelowanie obciążeń elektroenergetycznych obszaru w celu oceny zarządzania gospodarką energetyczną w przedsiębiorstwach
Wiktoria Grycan, Bogumiła Wnukowska 28

Wybrane problemy optymalnego doboru transformatorów rozdzielczych
Maciej Zieliński 36

Mikroobróbka folii metalowych za pomocą lasera nanosekundowego
Mateusz Tański, Robert Barbucha, Marek Kocik, Michał Janke, Katarzyna Garasz, Jerzy Mizeraczyk 39

Z HISTORII TECHNIKI 42

LUDZIE POLSKIEJ ELEKTRYKI 45

KONFERENCJE – SPOTKANIA – WYDARZENIA 49

WYDAWNICTWA 55

CO PISZĄ INNI 58

Moment elektromagnetyczny i zaczepowy maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi

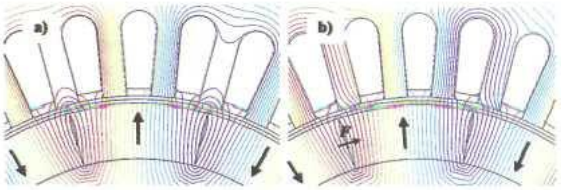
Marcin Wardach

Maszyny elektryczne ze stojanem użłobkowanym charakteryzują się mniejszą szczeliną i większym momentem elektromagnetycznym niż maszyny o strukturze bezżłobkowej. Ich wadą jest jednak występowanie momentu zaczepowego, spowodowanego różną reluktancją obszarów przyszczelinowych w pobliżu zębów i żłobków. Moment zaczepowy jest głównym składnikiem pulsacji momentu elektromagnetycznego [2, 6–8], które są przyczyną powstawania wyższych harmonicznych, powodujących powstawanie hałasu i drgań. Wpływa to niekorzystnie na trwałość łożysk i obniża sprawność maszyny. W artykule przedstawione zostały badania symulacyjne analizujące te problemy przy użyciu programu COMSOL oraz pokazano zależność momentu elektromagnetycznego i zaczepowego oraz indukcji magnetycznej w maszynie elektrycznej z magnesami trwałymi od szerokości otwarcia żłobka *d*.

Jednym z ważniejszych elementów obliczeń optymalizacyjnych w procesie projektowania maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi jest wyznaczenie wartości pulsacji momentu elektromagnetycznego [3]. Pulsacje momentu mają wpływ na właściwości napędu, co jest szczególnie istotne w napędach urządzeń precyzyjnych, które przede wszystkim utrudniają realizację sterowania ze stałą prędkością. Ponadto powodują powstawanie dodatkowych strat mocy oraz wibracje mechaniczne i hałas [9]. 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 (cogging torque) [6–8, 10]. W maszynach elektrycznych jest on szkodliwym momentem obrotowym, spowodowanym interakcją między magnesami trwałymi a zębami użłobkowanego stojana. Powstaje on w wyniku współdziałania pola magnetycznego, wytworzonego przez magnesy trwałe umieszczone w wirniku, ze stojanem użłobkowanym. 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 szerokości jednej podziałki zębowej wynosi zero.

Dr inż. Marcin Wardach – Katedra Elektroenergetyki i Napędów Elektrycznych Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie



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

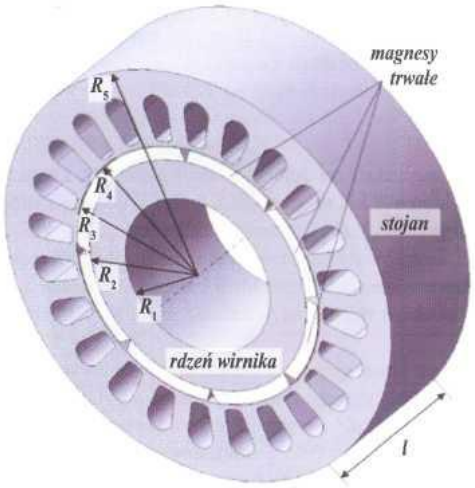
Moment zaczepowy powoduje powstanie drgań i hałasu, obniża sprawność oraz wpływa na szybsze zużywanie się części konstrukcyjnych maszyny elektrycznej, głównie łożysk.

W artykule przeanalizowany został wpływ szerokości otwarcia żłobków stojana na moment zaczepowy maszyny wyznaczony w stanie bezprądowym ($I = 0$) oraz moment elektromagnetyczny przy wybranej gęstości prądu $j = 10$ A/mm^2, przy założeniu, że współczynnik wypełnienia miedzią $k_{Cu} = 0{,}5$.

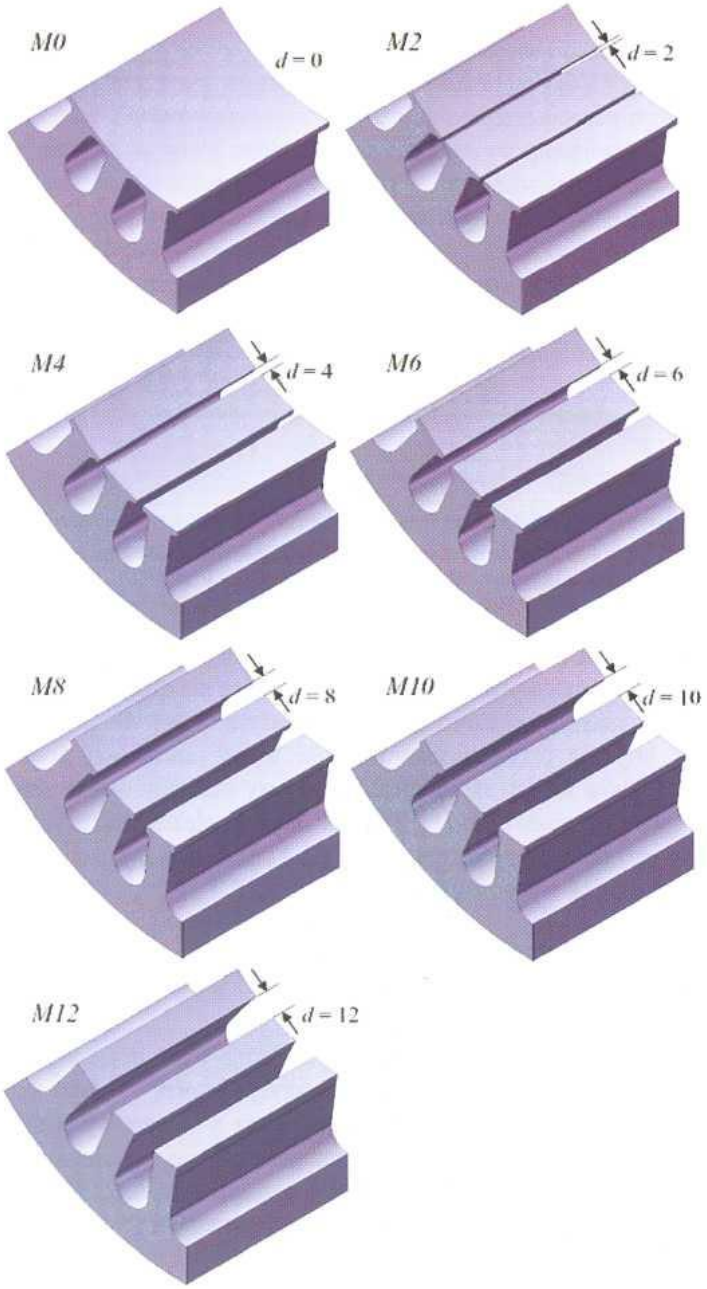
Badania symulacyjne

Modele numeryczne

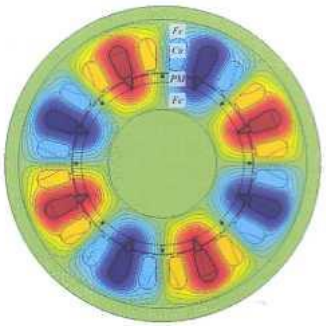
Strukturę obwodu magnetycznego, która była przedmiotem badań, przedstawia rysunek 2 (dla przejrzystości rysunku pominięto w nim uzwojenia). Struktura ta ma 8-biegunowy wirnik wewnętrzny składający się z ferromagnetycznego toroidu o promieniu wewnętrznym $R_1 = 60$ mm i zewnętrznym $R_2 = 90$ mm, na powierzchni którego umieszczone są na przemian promieniowo namagnesowane magnesy trwałe. Promień zewnętrzny całego wirnika wynosi $R_3 = 100$ mm.



Rys. 2. Model badanej maszyny



Rys. 3. Fragmenty stojanów badanych maszyn o różnych szerokościach d



Rys. 4. Model polowy badanej maszyny

Stojan z pakietu blach ze stali krzemowej składa się z 24 żłobków z uzwojeniami. Promień wewnętrzny stojana wynosi R_4 = 101 mm. Grubość szczeliny powietrznej wynosi zatem δ = 1 mm, natomiast promień zewnętrzny stojana wynosi R_5 = 160 mm. Długość części aktywnych badanego modelu wynosi l = 100 mm. Zbadanych zostało 7 modeli maszyny elektrycznej. Każdy z modeli różnił się budową żłobków w stojanie, w którym zmianie ulegała szerokość ich otwarcia d. Wymiar d przyjmował wartości: 0 (żłobek zamknięty) oraz 2, 4, 6, 8, 10, i 12 mm. Rysunek 3 przedstawia wycinki poszczególnych obwodów stojana na szerokości jednej podziałki biegunowej.

Przykładowy model polowy obwodu magnetycznego badanej maszyny elektrycznej o otwarciu żłobka d = 6 mm – M6 przedstawiono na rysunku 4. Symbolem PM oznaczone zostały magnesy trwałe typu Nd-Fe-B, natomiast symbolem Cu – uzwojenia w żłobku. Pozostałe powierzchnie modelu obliczeniowego stanowi powietrze. Siatka dyskretyzacyjna, w zależności od badanego modelu, zawierała od ok. 325 tys. do ok. 422 tys. elementów skończonych.

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:

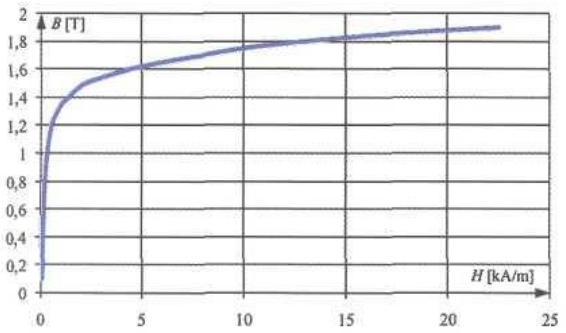
α_p – współczynnik łuku podziałki biegunowej stojana,
η – sprawność maszyny,
B – indukcja magnetyczna w szczelinie powietrznej,
A – okład prądowy na przyszczelinowej średnicy stojana,
D – przyszczelinowa średnica stojana,
l – długość części aktywnej maszyny elektrycznej.

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. Dlatego w badaniach analizowano również rozkłady indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej badanych modeli symulacyjnych.

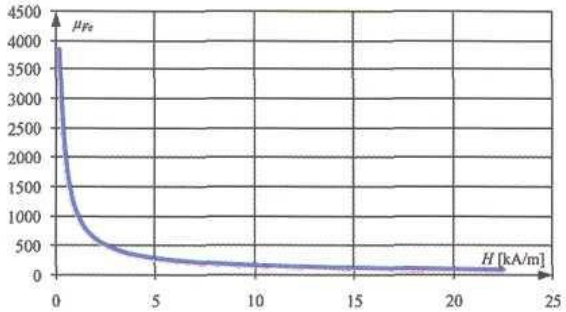
Parametry przyjęte w modelach symulacyjnych

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 mają parametry stali krzemowej z trzyprocentową zawartością krzemu. Na rysunku 5 przedstawiono pierwotną krzywą magnesowania $B = f(H)$ [12], natomiast rysunek 6 przedstawia zależność względnej przenikalności magnetycznej μ_{Fe} w funkcji natężenia pola magnetycznego H dla stali krzemowej 3% Si.

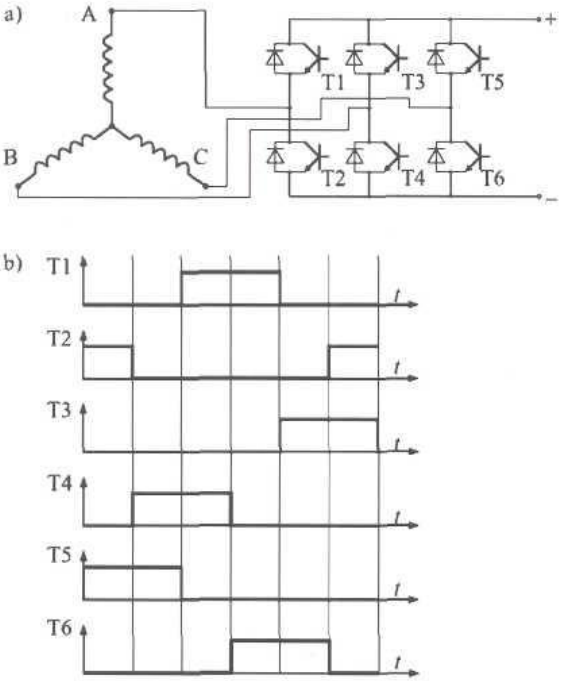
W celu pomięcia wpływu źródła zasilania na pulsacje momentu elektromagnetycznego, podczas badań założono idealną komutację zaworów energoelektronicznych. Przyjęto, że prąd podawany jest na uzwojenia poszczególnych faz maszyny poprzez klucze tranzystorowe [5], zgodnie z sekwencją przełączeń pokazaną na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



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



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



Rys. 7. Schemat zasilania maszyny (a) oraz sekwencja przełączeń zaworów komutatora elektronicznego (b)

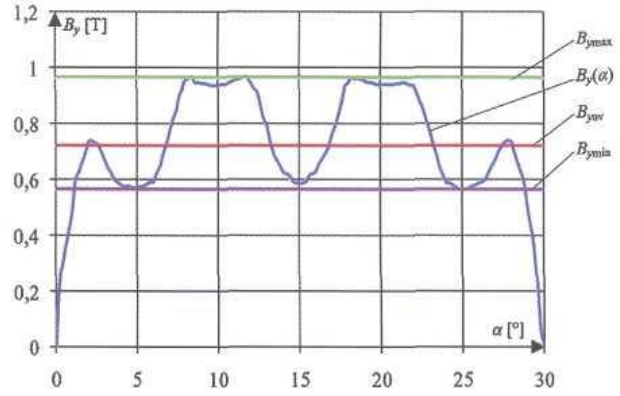
Wielkości wyznaczone z badań

Na podstawie badań zostały wyznaczone:
- 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.

Współczynniki pulsacji momentu elektromagnetycznego p_M oraz indukcji magnetycznej p_B wyliczono na podstawie wzorów [11]:

$$p_M = \frac{M_{e\max} - M_{e\min}}{M_{eav}}$$
$$p_B = \frac{B_{y\max} - B_{y\min}}{B_{yav}} \qquad (2)$$

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



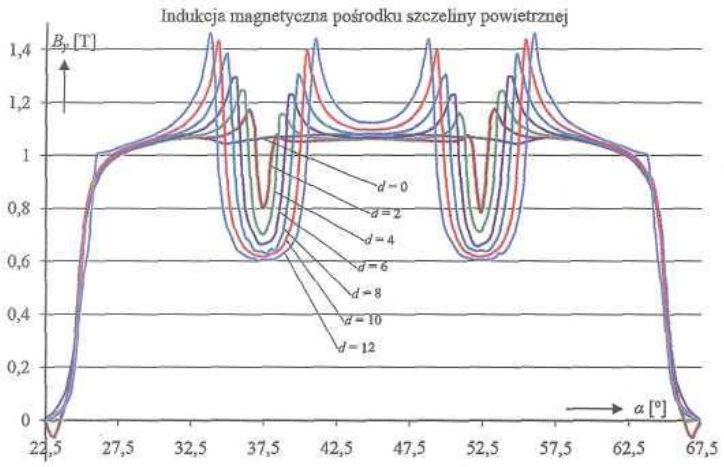
Rys. 8. Interpretacja graficzna wzoru (2), na przykładowym rozkładzie indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej

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

Rezultaty badań

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



Rys. 9. Rozkłady indukcji magnetycznej pośrodku szczeliny powietrznej

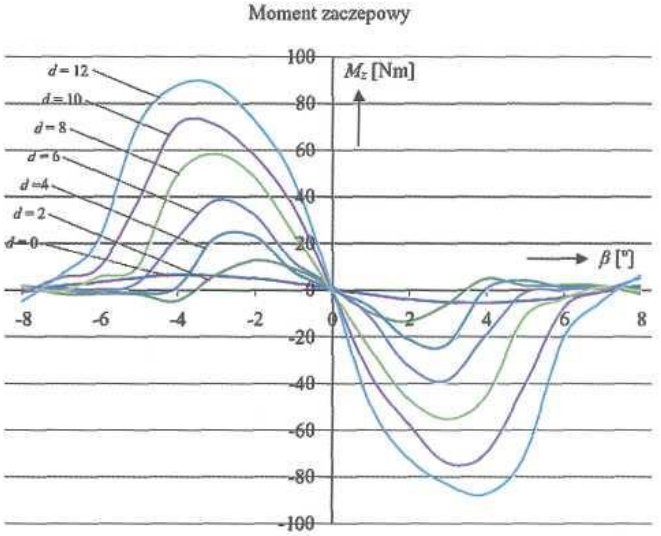
magnetycznej p_B. Współczynniki te oraz wartości średnie indukcji magnetycznej zestawiono w tabeli I. W celu porównania wyników wprowadzono wielkości względne: b_{yav} – wartości średniej indukcji magnetycznej oraz p'_B – pulsacji indukcji magnetycznej. Względne wielkości uzyskano poprzez podzielenie odpowiednich wartości przez wartości bazowe, otrzymane podczas badań modelu M0 ze żłobkami zamkniętymi.

Moment zaczepowy

Moment zaczepowy został wyznaczony w stanie statycznym. Rozkłady momentów zaczepowych poszczególnych modeli zostały pokazane na rysunku 10. Momenty te zostały wyznaczone przy obrocie wirnika z położenia –8° do +8° co jeden stopień mechaniczny. Punkt na rysunku 0° jest położeniem równowagi – wirnik względem stojana jest w układzie jak na rysunku 4.

TABELA I. Wyniki badań indukcji magnetycznej

Model	B_{yav} [T]	b_{yav}	p_B	p'_B
M0	0,94	1,00	0,04	1,00
M2	0,92	0,98	0,42	11,12
M4	0,91	0,98	0,59	15,56
M6	0,91	0,97	0,70	18,44
M8	0,90	0,96	0,84	21,85
M10	0,89	0,95	0,91	23,93
M12	0,87	0,93	0,98	25,66



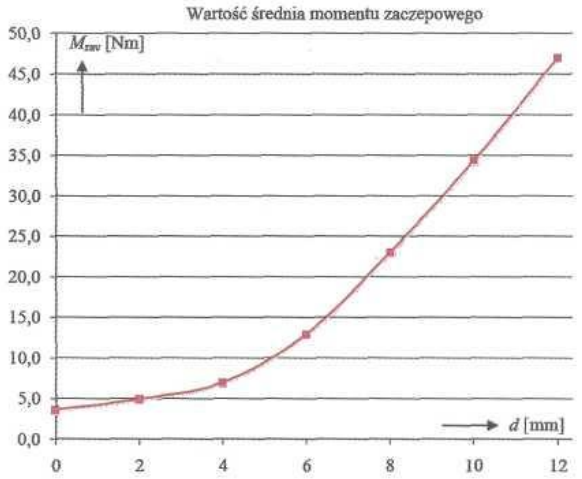
Rys. 10. Rozkłady momentu zaczepowego

TABELA II. Wyniki badań momentu zaczepowego

Model	M0	M2	M4	M6	M8	M10	M12
M_{zav} [Nm]	3,5	4,8	6,8	12,8	22,9	34,3	46,9
m_{zav}	1,0	1,4	2,0	3,7	6,5	9,8	13,4

TABELA III. Wyniki badań momentu elektromagnetycznego

Model	M_{eav} [Nm]	m_{eav}	p_M	p'_M
M0	337,3	1,00	0,23	1,00
M2	418,5	1,24	0,20	0,84
M4	428,0	1,27	0,17	0,75
M6	430,9	1,28	0,22	0,93
M8	428,1	1,27	0,28	1,22
M10	424,4	1,26	0,38	1,64
M12	418,7	1,24	0,47	2,01



Rys. 11. Wykres M_{zav} = f(d) – wartość średnia momentu zaczepowego w funkcji szerkości d

Na podstawie badań wyznaczono również wartości średnie modułów momentu zaczepowego M_{zav} w badanym zakresie (tab. II). W tabeli zamieszczono również względny moment m_{zav}, który pokazuje, ile razy wzrosła średnia wartość modułów momentu zaczepowego w stosunku do modelu bazowego ze żłobkami zamkniętymi.

Rysunek 11 przedstawia zależność $M_{zav} = f(d)$. W programie Excel wyznaczono ponadto wzór krzywej aproksymującej (3) otrzymane wyniki badań przy współczynniku determinacji wynoszącym $R^2 = 0{,}998$, a więc przy bardzo dużej zbieżności.

$$M_{zav} = 0{,}332d^2 - 0{,}323d + 3{,}517 \qquad (3)$$

Moment elektromagnetyczny

Na rysunku 12 przedstawione zostały rozkłady momentu elektromagnetycznego przy wybranym wymuszeniu, tj. $j = 10$ A/mm^2 (współczynnik wypełnienia miedzią wynosi $k_{Cu} = 0{,}5$), w zależności od kąta położenia wału β. 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. Wszystkie wyznaczone wielkości zostały zamieszczone w tabeli III. 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 M0.

Zależność wartości średniej momentu elektromagnetycznego M_e od szerokości otwarcia żłobka d przedstawiono na rysunku 13. Wyznaczono także funkcję aproksymującą $M_{eav} = f(d)$ (4), przy współczynniku determinacji wynoszącym $R^2 = 0{,}993$.

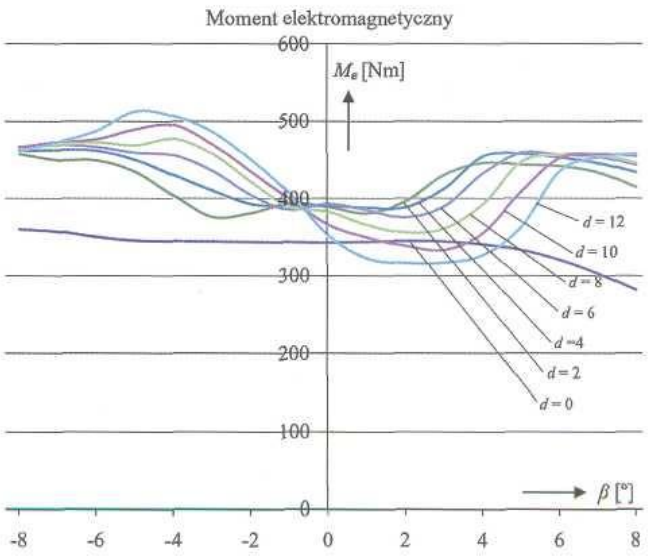
$$M_{eav} = -0{,}045d^4 + 1{,}344d^3 - 14{,}24d^2 + 62{,}02d + 338{,}1 \qquad (4)$$

Analiza uzyskanych wyników badań

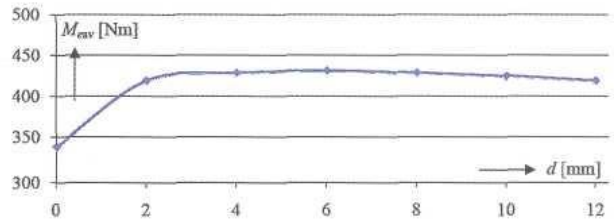
Interpretując uzyskane wyniki badań symulacyjnych można zauważyć, że pulsacje indukcji magnetycznej p_B oraz wartość średnia momentu zaczepowego M_{zav} rosną wraz ze wzrostem szerokości otwarcia żłobków d (tab. I i II oraz rys. 11). Pulsacje indukcji w modelu M12 są aż 25-krotnie większe niż w modelu M0.

Z drugiej strony widać, że wraz ze wzrostem szerokości d, maleje wartość średnia indukcji magnetycznej B_{yav}. Należy podkreślić, że kształt indukcji magnetycznej decyduje o kształcie napięcia indukowanego, a wysokie pulsacje indukcji powodują wysoką zawartość wyższych harmonicznych w napięciu indukowanym maszyny, co m.in. niekorzystnie wpływa na proces sterowania maszyną.

Odmiennie przedstawia się charakterystyka wartości średniej momentu elektromagnetycznego w funkcji szerokości d. Zależność ta osiąga maksimum dla $d_{max} = 4{,}25$ mm i ma wartość $M_{eav}(d_{max}) = 432{,}0$ Nm. Wstawiając z kolei $d_{max} = 4{,}25$ mm do wzoru (3) – na wartość średnią momentu zaczepowego – uzyskujemy $M_{zav}(d_{max}) = 8{,}1$ Nm.



Rys. 12. Rozkłady momentu elektromagnetycznego



Rys. 13.
Wykres $M_{eav} = f(d)$ – wartość średnia momentu elektromagnetycznego w funkcji szerokości d

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 BOBRME Komel Maszyny Elektryczne* 2006 nr 63

[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, Studia i Materiały* 2005 nr 25

[4] Gałuszkiewicz Z. i in.: Opracowanie i budowa wysokoobrotowego silnika wzbudzanego magnesami trwałymi. *Wiadomości Elektrotechniczne* 2010 nr 3

[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 Ind. Electron.* 1996 No 2

[7] Keyahani A., Murthy S.K., Studer C.B., Sebastian T.: Study of Cogging Torque in Permanent Magnet Machines. *Electric Machines and Power Systems* 1999 No 27

[8] Łukaniszyn M., Wróbel R., Jagieła M.: Moment elektromagnetyczny silników prądu stałego wzbudzanych magnesami trwałymi. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka* 2001 z. 177

[9] Pochanke A.: Moment silników bezzestykowych z magnesami trwałymi w stanie bez prądu. XII Sympozjum „Mikromaszyny i Serwonapędy" 2000

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

[11] Wiak S., Welfle H.: Silniki tarczowe w napędach lekkich pojazdów elektrycznych. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, 2001

[12] www.stalprodukt.com.pl