

Roman Nadolski, Zbigniew Gawęcki
Politechnika Świętokrzyska, Kielce

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZMNIEJSZENIA MOMENTU ZACZEPOWEGO W SILNIKU BEZSZCZOTKOWYM PRĄDU STAŁEGO

ANALYSIS OF A POSSIBILITY OF COGGING TORQUE REDUCTION FOR BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dotyczących zmniejszenia amplitudy momentu zaczepowego w silniku bezszczotkowym prądu stałego wzbudzonym magnesami trwałymi. Obliczenia zrealizowano przy użyciu środowiska Flux firmy Cedrat opartego na metodzie elementów skończonych przy wykorzystaniu modeli quasi-trójwymiarowych. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych dokonano analizy możliwości zmniejszenia wartości amplitudy momentu zaczepowego w konstrukcji silnika poprzez dokonanie modyfikacji obwodu magnetycznego. Zbadano wpływ na moment zaczepowy kąta skosu i szerokości otwarcia żłobków stojana, wysokości i rozpiętości kątowej magnesów, a także wysokości szczeliny powietrznej.

Abstract: This paper presents the results of simulation studies on reduction cogging torque in brushless direct current motor with permanent magnets. The simulations have been done using the finite element method with Flux by Cedrat company using quasi three-dimensional models. Based on simulation studies analyzes the possibility of reducing cogging torque amplitude by magnetic circuit modification in motor design. Investigated the effect of stator slot skew angle, slot opening width, height and angular range magnets, height of air gap on cogging torque.

Słowa kluczowe: silnik bezszczotkowy prądu stałego, moment zaczepowy, magnesy trwałe

Keywords: brushless direct current motor (BLDCM), cogging torque, permanent magnet

1. Wstęp

Silniki bezszczotkowe prądu stałego wzbudzone wysokoenergetycznymi magnesami trwałymi charakteryzują się wysokim wskaźnikiem mocy uzyskiwanej z jednostki objętości, bardzo dobrymi parametrami dynamicznymi, wysoką sprawnością i trwałością [3,4,6,7]. Magnesy trwałe stosowane w silnikach bezszczotkowych wytwarzane są na bazie pierwiastków ziem rzadkich tj. neodym, samar, charakteryzujących się dużą gęstością energii. Pomimo wielu zalet, jednym z głównych problemów przy konstruowaniu tego typu maszyn elektrycznych jest ograniczenie wartości momentu zaczepowego. Moment zaczepowy powstaje na skutek współdziałania pola magnetycznego pochodzącego od magnesów trwałych umieszczonych na wirniku ze stojanem o nierównomiernej szczeliny powietrznej, a więc o kątowej zmienności reluktancji. Moment zaczepowy można opisać zależnością [2,5]:

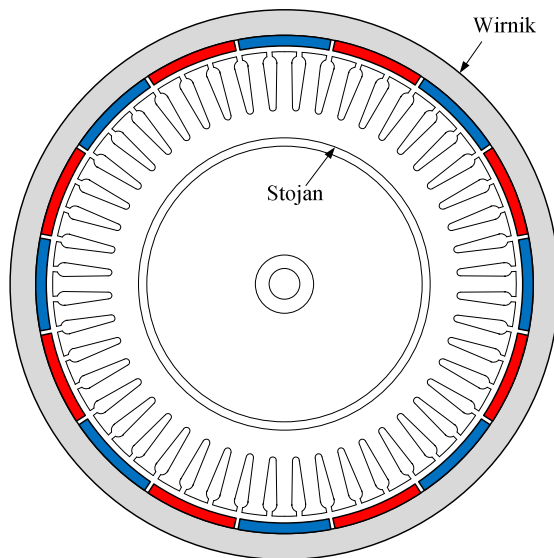
$$T_z = \sum_1^p \left(-\frac{1}{2} \Phi^2 \frac{dR_\mu}{d\theta_m} \right) \quad (1)$$

gdzie: Φ – strumień magnetyczny w szczeliny powietrznej, R_μ – reluktancja obwodu magnetycznego, której główną część stanowi reluktancja szczeliny powietrznej $R_{\mu\delta}$ o wysokości δ_g , θ_m – kąt przemieszczenia wirnika, p – liczba zębów stojana. Moment zaczepowy jest momentem niekorzystnym, w wyniku istnienia którego pojawiają się niepożądane pulsacje momentu elektro-magnetycznego, dodatkowe straty mocy, drgania i hałas, powodując zmniejszenie sprawności [1,3]. Na wartość momentu zaczepowego można wpływać poprzez zamykanie żłobków stojana klinami wykonanymi z materiałów ferro-magnetycznych lub nacinanie zębów stojana uzyskując w ten sposób szczelinę powietrzną charakteryzującą się mniejszymi zmianami reluktancji przy przemieszaniu się wirnika z magnesami trwałymi [7]. Ograniczanie zmian reluktancji obwodu magnetycznego podczas przemieszczania wirnika można osiągnąć przez zgłębianie magnesów w rdzeniu wirnika lub poprzez niesymetryczne ich rozmieszczenie na wirniku [1,2,6]. Wpływ na wartość momentu zaczepowego w silnikach bezszczotkowych ma również kształt, wymiary i dobór optymalnego punktu pracy

magnesów trwałych [3,4]. Kolejną metodą redukcji amplitudy momentu zaczepowego jest stosowanie odpowiedniego skosu żłobków stojana lub skosu magnesów trwałych. Analizując różne możliwości ograniczenia wartości momentu zaczepowego należy brać pod uwagę wpływ ewentualnych zmian w obwodzie magnetycznym na wartość momentu elektromagnetycznego [6], ponieważ zmniejszenie momentu zaczepowego w niektórych przypadkach może spowodować np. ograniczenie pulsacji momentu elektromagnetycznego z jednoczesnym zmniejszaniem jego wartości średniej [3,4]. Ponadto w niektórych konstrukcjach silników bezszczotkowych zastosowanie wyżej wymienionych metod napotyka na istotne ograniczenia techniczne i ekonomiczne.

2. Analizowana konstrukcja silnika

Celem niniejszych badań było poszukiwanie możliwości zmniejszenia amplitudy momentu zaczepowego w prototypowej konstrukcji silnika bezszczotkowego, która powstała w wyniku wcześniejszych prac autorów dotyczących bezprzekładniowego napędu pojazdów lekkich. Uproszczoną konstrukcję silnika przedstawiono na rys. 1. Jest to konstrukcja odwrócona o zewnętrznym wirniku i wewnętrznym stojanie.



Rys .1 Przekrój analizowanej konstrukcji silnika bezszczotkowego.

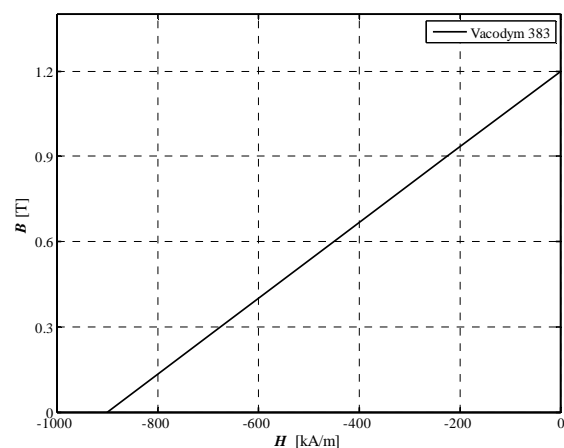
Rozpatrywany przetwornik elektro-mechaniczny należy do grupy silników wolnoobrotowych (120 obr/min), wysoko-momentowych $T_N=10\text{Nm}$ zasilanych napięciem 24V. Podstawowe parametry elektryczne i konstrukcyjne

zamieszczone w tabeli nr 1. W analizowanym obiekcie badań magnesy zostały wykonane przez firmę Vacuumschmelze z pierwiastków ziem rzadkich (Nodym–Żelazo–Bor) z materiału o nazwie handlowej Vacodym 383.

Tabela 1. Wybrane parametry elektryczne i dane konstrukcyjne

Napięcie zasilania	$U_N = 24 \text{ V}$
Prąd znamionowy	$I_N = 8 \text{ A}$
Prędkość znamionowa	$n_N = 120 \text{ obr/min}$
Liczba żłobków	$N_s = 48$
Liczba żłobków na biegun i fazę	$q = 1$
Liczba pasm	$N_p = 3$
Materiał magnesów	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$
Wysokość magnesów	$h_m = 3 \text{ mm}$
Wysokość szczeliny powietrznej	$\delta_g = 0.5 \text{ mm}$
Natężenie koercji	$H_c = 900 \text{ kA/m}$
Indukcja remanentu	$B_r = 1.2 \text{ T}$
Gęstość energii	$(BH_{\max}) = 270 \text{ kJ/m}^3$
Liczba biegunów wirnika	$p_r = 16$
Średnica zewnętrzna wirnika	$D_{re} = 160 \text{ mm}$

Charakterystyka odmagiesowania magnesów trwałych z uwagi na dużą wartość natężenia koercji wynoszącą ok. 900kA/m jest w istocie linią prostą. Charakterystykę odmagiesowania magnesów wykonanych z materiału Vacodym 383 przedstawiono na rys.2.



Rys .2 Charakterystyka odmagiesowania materiału Vacodym 383.

W stojanie znajduje się 48 żłobków, w których umieszczono symetryczne trójfazowe uzwojenie. W trakcie pracy silnika w zależności od położenia wirnika zasilane są dwa spośród

trzech pasm uzwojenia stojana. W rozpatrywanej konstrukcji położenie wirnika identyfikowane jest na podstawie sygnałów z trzech czujników hallotronowych rozmieszczonych na stojanie co 120 stopni elektrycznych, na tej podstawie zasilane są poszczególne pasma zgodnie z przyjętą sekwencją.

W pierwszym etapie celem badań było poszukiwanie rozwiązania konstrukcyjnego obwodu magnetycznego charakteryzującego się niższą amplitudą momentu zaczepowego w stosunku do rozwiązania prototypowego przy niezmiennych gabarytach zewnętrznych silnika, takim samym sposobie sterowania i niezmiennym uzwojeniu stojana.

Wykorzystując przetwornik momentu i prędkości obrotowej zarejestrowano przebieg momentu przy braku zasilania pasm uzwojeń i napędzeniu wirnika z niewielką prędkością. Umożliwiło to zmierzenie rzeczywistej amplitudy momentu zaczepowego na poziomie ok. $T_{zmax}=0.8Nm$ co stanowiło ok. 8% średniej wartości momentu elektromagnetycznego przy znamionowym zasilaniu i obciążeniu.

3. Badania symulacyjne

Biorąc pod uwagę symetrię obrotową analizowanej konstrukcji ograniczono obszar obliczeniowy do 1/16 całości, czyli do jednej podziałki biegunowej. Obliczenia momentu zaczepowego przeprowadzono w stanie bezprądowym przy zmianie położenia wirnika w zakresie jednej podziałki żłobkowej co 0.25° . Założono zerowanie się składowej normalnej indukcji magnetycznej na brzegu dostatecznie oddalonym od analizowanego obiektu i uwzględniono nieliniowość obwodu magnetycznego [2,4].

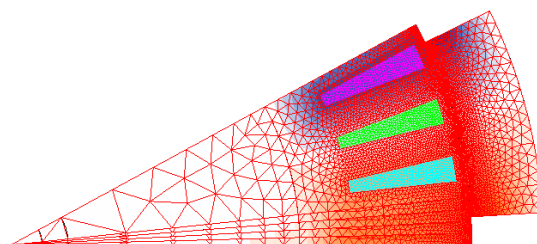
Moment zaczepowy wyznaczono wykorzystując wewnętrzne funkcje programu Flux jako pochodną zmiany koenergii magnetycznej W' względem kąta obrotu wirnika θ_m [2,5]:

$$T_z(\theta_m) = -\frac{\partial W'}{\partial \theta_m} \quad (2)$$

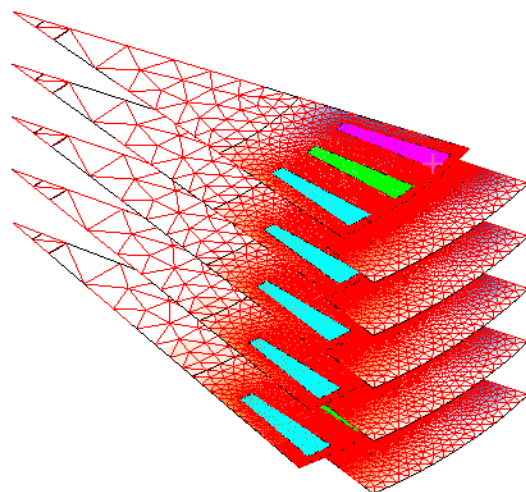
W celu uwzględnienia skosu żłobków stojana opracowano model wielowarstwowy. Maszynę podzielono na długości czynnej l_a na określoną liczbę warstw N_L , każda warstwa stanowiła $1/N_L$ długości maszyny. W poszczególnych warstwach region rdzenia stojana został obrócony w stosunku do poprzedniej warstwy o odpowiedni kąt, wynikający z wewnętrznej procedury modułu FluxSkew.

We wstępnym etapie symulacji dobrano odpowiednią liczbę warstw kierując się kryterium dokładności i czasu obliczeń. Liczbę warstw zmieniano w zakresie od 1 do 20. Po porównaniu wyników symulacji dobrano liczbę pięciu warstw, ponieważ większa liczba warstw nie wpływała zasadniczo na zwiększenie dokładności obliczeń momentu zaczepowego, natomiast wydłużał się czas obliczeń.

a)



b)

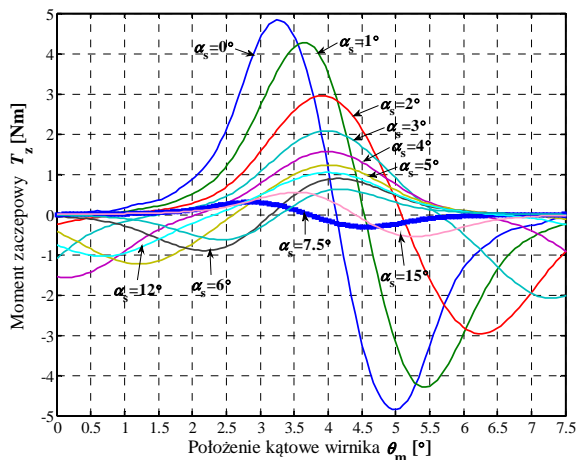


Rys .3. Model quasi-trójwymiarowy ($2\frac{1}{2}D$): a) widok XY, b) widok XYZ..

3.1 Wpływ skosu żłobków stojana na amplitudę momentu zaczepowego

Wyniki badań zamieszczonych w pracach [1,5,6] wskazują, że jedną z najbardziej efektywnych metod minimalizacji amplitudy momentu zaczepowego jest stosowanie skosu żłobków stojana lub stosowanie skosu magnesów. W analizowanej konstrukcji praktyczna realizacja skosu magnesów z uwagi na liczbę biegunów wirnika $p_r=16$ i naklejanie magnesów po wewnętrznej stronie wirnika byłaby trudna do zrealizowania, dlatego zdecydowano się na analizę wpływu skosu żłobków stojana

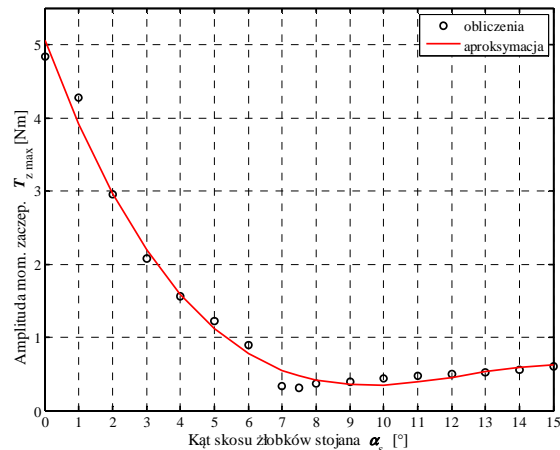
na wartość momentu zaczepowego. Badania symulacyjne przeprowadzono dla zmiany kąta skosu żłobków stojana α_s w zakresie od 0° do kąta równego dwóm podziałkom żłobkowym która dla rozwiązania prototypowego wynosi 15° . Wyniki badań symulacyjnych przedstawiono na rys.4., z których wynika że maksymalna wartość amplitudy momentu zaczepowego wynosząca 4.84Nm występuje dla konstrukcji bez skosu żłobków stojana, natomiast najmniejszą amplitudę momentu zaczepowego wynoszącą 0.331Nm można uzyskać dla kąta skosu żłobków stojana $\alpha_s=7.5^\circ$.



Rys. 4. Charakterystyki kątowe momentu zaczepowego T_z w funkcji położenia wirnika θ_m dla różnych wartości kąta skosu żłobków stojana α_s .

W konstrukcji bazowej silnika dla której kąt skosu żłobków stojana jest równy $\alpha_s=15^\circ$ obliczona amplituda momentu zaczepowego wyniosła $T_{z\max}=0.611\text{Nm}$. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że dla analizowanej konstrukcji najmniejszą amplitudę momentu zaczepowego można uzyskać dla kąta skosu żłobków stojana równego pojedynczej podziałce żłobkowej.

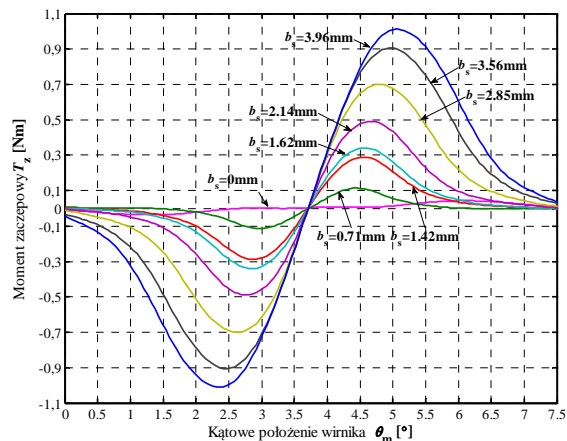
Analizując wyniki badań symulacyjnych przedstawionych na rys.5 dotyczących wpływu kąta skosu żłobków stojana na amplitudę momentu zaczepowego, można zauważyć znaczny spadek amplitudy od wartości 4.84Nm dla kąta 0° do 0.331Nm dla kąta 7.5° . Zwiększanie skosu żłobków stojana ponad 7.5° powoduje stopniowy wzrost amplitudy momentu zaczepowego. Do dalszych obliczeń przyjęto kąt skosu żłobków stojana równy 7.5° odpowiadający najmniejszej wartości momentu zaczepowego.



Rys. 5. Zależność amplitudy momentu zaczepowego $T_{z\max}$ od kąta skosu żłobków stojana α_s .

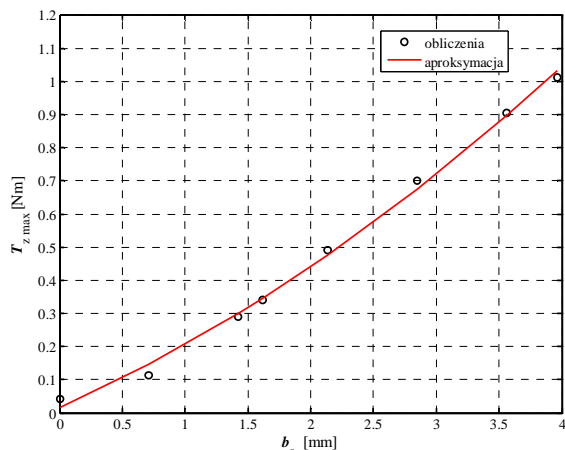
3.2 Wpływ szerokości otwarcia żłobków stojana na amplitudę momentu zaczepowego

Szerokość otwarcia żłobka wpływa na kształt szczeliny powietrznej, a tym samym zgodnie z zależnością (1) na całkowitą reluktancję drogi strumienia magnetycznego. Wyniki badań przedstawione na rys. 6 wskazują, że najmniejszą wartość amplitudy momentu zaczepowego wynoszącą 0.04Nm można uzyskać dla całkowitego zamknięcia żłobka.



Rys. 6. Charakterystyki kątowe momentu zaczepowego T_z w funkcji położenia wirnika θ_m dla różnych szerokości otwarcia żłobka b_s .

W niektórych rozwiązaniach konstrukcyjnych, zwłaszcza większych mocy, efekt zamknięcia żłobka można uzyskać poprzez zastosowanie klinów magnetycznych z materiałów o dużej przenikalności magnetycznej.

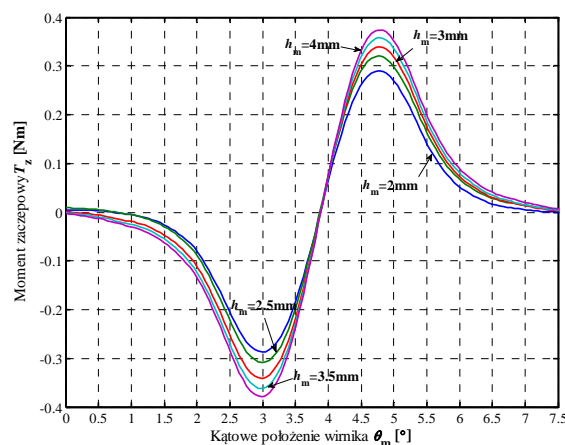


Rys .7. Zależność amplitudy momentu zaczepowego $T_{z\max}$ od szerokości otwarcia żłobków stojana b_s .

Wraz ze wzrostem szerokości otwarcia żłobka rośnie amplituda momentu zaczepowego (rys.7), przy całkowitym otwarciu żłobka amplituda wynosi 1.01Nm. W analizowanej konstrukcji z uwagi na dużą ilość żłobków i konieczność uzwojenia stojana określoną średnicą drutu nawojowego, przyjęto szerokość otwarcia żłobka wynoszącą 1.4mm.

3.3 Wpływ wysokości i rozpiętości kątowej magnesów na amplitudę momentu zaczepowego

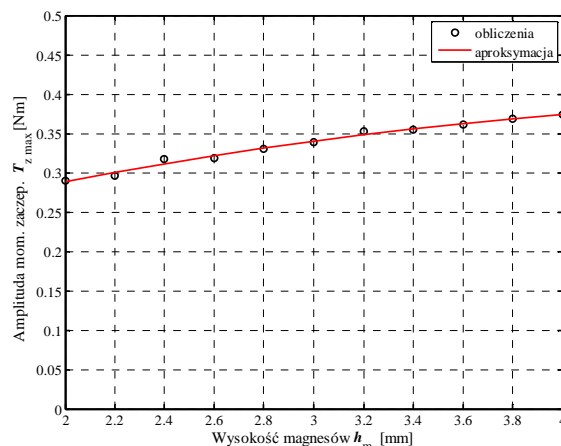
Wzrost wysokości magnesu wpływa na zwiększenie amplitudy momentu zaczepowego (rys.8), ponieważ rośnie objętość materiału magnesu trwałego, a tym samym wzrasta gęstość energii magnetycznej w silniku [3,4].



Rys .8. Charakterystyki kątowe momentu zaczepowego T_z w funkcji położenia wirnika θ_m dla różnych wysokości magnesów h_m .

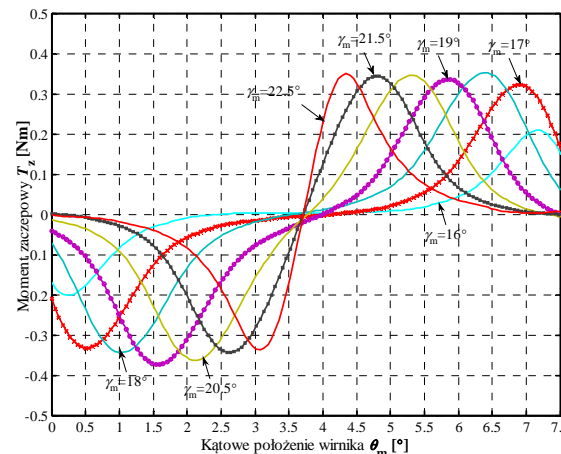
Podczas badań symulacyjnych zmiana wysokości magnesów o 50% (odpowiednio 2mm i

4mm) powodowała zmianę amplitudy momentu zaczepowego nieprzekraczającą 15% w stosunku do bazowej wysokości 3mm (rys.9).



Rys .9. Zależność amplitudy momentu zaczepowego $T_{z\max}$ od wysokości magnesów h_m .

Rozpiętość kątowa magnesów w konstrukcji bazowej wynosiła $\gamma_m=21.5^\circ$. Badania symulacyjne przeprowadzono przy temperaturze magnesów wynoszącej 20°C . Przy stałej wysokości magnesu $h_m=3\text{mm}$ rozpiętość kątowa magnesów ma niewielki wpływ na amplitudę momentu zaczepowego (rys.10), natomiast w istotny sposób wpływa na kształt charakterystyki kątowej momentu zaczepowego a także na wartość i poziom pulsacji momentu elektromagnetycznego [5].

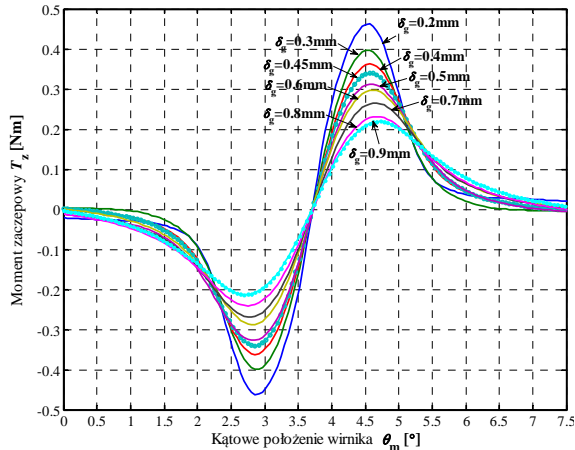


Rys .10. Charakterystyki kątowe momentu zaczepowego T_z w funkcji położenia wirnika θ_m dla różnych rozpiętości kątowych magnesów γ_m .

3.4 Wpływ wysokości szczeliny powietrznej na amplitudę momentu zaczepowego

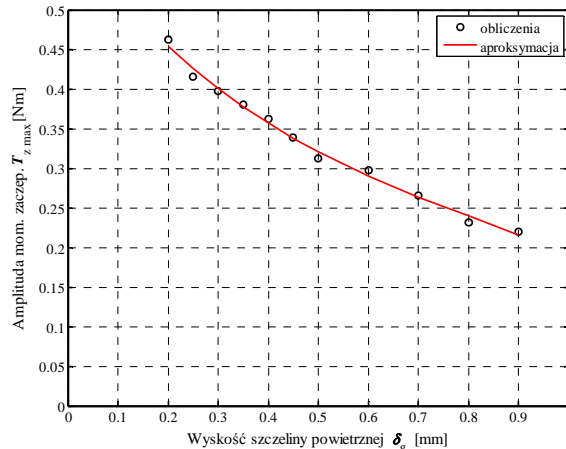
Wraz ze zwiększaniem wysokości szczeliny powietrznej wzrasta wypadkowa reluktancja

drogi strumienia magnetycznego, co przy stałych wymiarach magnesów skutkuje zmniejszeniem amplitudy momentu zaczepowego (rys.11 i rys.12). Badania symulacyjne przeprowadzono dla wysokości szczeliny powietrznej od 0.2mm do 0.9mm.



Rys .11. Charakterystyki kątowe momentu zaczepowego T_z w funkcji położenia wirnika θ_m dla różnych wysokości szczeliny powietrznej δ_g .

W rozpatrywanym przedziale zmian wysokości szczeliny powietrznej amplituda momentu zmieniała się od 0.46Nm do 0.22Nm (rys.12).



Rys .12. Zależność amplitudy momentu zaczepowego $T_{z \max}$ od wysokości szczeliny powietrznej δ_g .

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dotyczących wpływu zmian parametrów geometrycznych obwodu magnetycznego prototypowej konstrukcji silnika bezszczotkowego silnika prądu stałego wzbudzanego magnesami trwałymi o budowie odwróconej. Dla analizowanego rozwiązania konstrukcyjnego

zbadano wpływ zmiany kąta skosu zębów stojana, wysokości i rozpiętości kątowej magnesów trwałych, wysokości szczeliny powietrznej na wartość amplitudy momentu zaczepowego, przy czym w kolejnych obliczeniach rozpatrywano zmianę pojedynczego parametru. Otrzymane wyniki pozwalają na wstępne stwierdzenie, że dla analizowanego silnika istnieją możliwości zmniejszenia momentu zaczepowego przy przyjętych ograniczeniach. Niezbędne jest zbadanie wpływu ewentualnych zmian w obwodzie magnetycznym na wartość i poziom pulsacji momentu elektromagnetycznego, co będzie tematem kolejnego artykułu. Wyniki otrzymanych obliczeń będą stanowić również podstawę do dalszych prac związanych z próbami optymalizacji niniejszej konstrukcji.

Literatura

- [1]. Dosiek L., Pillay P.: „Cogging torque reduction in permanent magnet machines”, IEEE Transactions on Industry Application, Vol.43, No.6, p.1565-1571, 2007.
- [2]. Gawęcki Z., Nadolski R.: „Construction methods of reducing cogging torque of a DC brushless motor”, Prace Instytutu Elektrotechniki, Zeszyt nr 253, str.39-51, 2011.
- [3]. Gieras J.F., Wing M.: „Permanent magnet motor technology. Design and Application”, Second Edition, Marcel Dekker Inc., New York, 2002.
- [4]. Hanselman D.: „Brushless permanent magnet motor design”, Second Edition, The Writers' Collective, Cranston, Rhode Island 2003.
- [5]. Keyhani A., Sebastian T.: Study of cogging torque in permanent magnet machines, IEEE IAS Annual Meeting, Louisiana, USA, pp.42-49, 1997
- [6]. Młot A., Łukaniszyn M., Korkosz M.: „Wpływ skosu stojana na redukcję pulsacji momentu elektromagnetycznego w bezszczotkowym silniku prądu stałego”, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 88, str.41-45, 2010.
- [7]. Wardach M.: „Badanie maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi i klinami magnetycznymi”, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 77, str.155-159, 2007.

Autorzy

prof. dr hab. inż. Roman Nadolski, tel.(41)3424225, e-mail:r.nadolski@tu.kielce.pl
 dr inż. Zbigniew Gawęcki, tel.(41)3424683, e-mail: z.gawecki@tu.kielce.pl
 Politechnika Świętokrzyska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Zakład Energoelektroniki, Maszyn i Napędów Elektrycznych, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce