

Adrian Młot*, Marian Łukaniszyn*, Mariusz Korkosz**

***Politechnika Opolska**

****Politechnika Rzeszowska**

WPLYW SKOSU STOJANA NA REDUKCJĘ PULSACJI MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO W BEZSZCZOTKOWYM SILNIKU PRĄDU STAŁEGO

COGGING TORQUE RIPPLE REDUCTION IN BRUSHLESS DC MOTOR BASED ON THE STATOR SKEW

Abstract: Three-dimensional and two-dimensional multi-slice models based on the finite element method for the analysis of an electromagnetic torque of permanent magnet DC motor were applied. The cogging torque and electromagnetic torque versus the rotor angle of the motors with skewed and unskewed stator core were calculated.

1. Wstęp

Silniki o magnesach trwałych znalazły szerokie zastosowania w różnych układach napędowych. Niejednokrotnie takie napędy muszą sprostać wysokim wymaganiom, dotyczącym precyzji pozycjonowania w manipulatorach, robotach bądź serwonapędach. Dlatego też początkowy etap projektowania niniejszych maszyn powinien być ukierunkowany na ograniczenie do minimum pulsacji momentu elektromagnetycznego.

W literaturze przedmiotu można znaleźć różne podejścia dotyczące redukcji pulsacji momentu elektromagnetycznego [6, 7, 10]. Do często używanych technik redukcji pulsacji momentu można zaliczyć skos magnesów oraz skos żłobków wirnika (bądź stojana) [1, 2, 3, 5, 8]. Trudności związane z budową silnika o skomplikowanych konstrukcjach pod kątem ograniczenia pulsacji wiążą się jednak często z kosztami. Tanią i stosunkowo prostą metodą redukcji pulsacji momentu jest stosowanie skosu magnesów bądź zębów rdzenia silnika.

W niniejszym artykule pokazano sposób redukcji momentu zaczepowego i tym samym drgań wzbudzanych elektromagnetycznie poprzez zastosowanie skośnych żłobków o odpowiednio dobranym kącie względem podziałki biegunowej rdzenia stojana. W tym celu by przedstawić wpływ zmian konstrukcyjnych na parametry całkowite maszyny, wybrano typową konstrukcję silnika bezszczotkowego prądu stałego o magnesach trwałych (BLDC) namagnesowanych radialnie. Prototyp A tegoż silnika o prostych żłobkach stojana i magnesach trwałych omówiono w

pracy [7]. Zasadniczą wadą silnika jest duży moment zaczepowy – jedna ze składowych tętnień momentu elektromagnetycznego [7]. Dodatkowo powstają drgania i hałas, które są pochodzenia elektromagnetycznego i wynikają z występowania wyższych harmoniczných pola w szczelinie. W maszynach prądu stałego wielkość drgań zależeć będzie od czynników konstrukcyjnych tj. podziałki biegunowej stojana jak i jego żłobków. Zmieniając te elementy można w istotny sposób wpływać na wielkość pulsacji momentu. W związku z tym dokonano modyfikacji konstrukcji prototypu A silnika, która dotyczyła zastosowania skosu rdzenia stojana – prototyp B. Dodatkowo, zbadano w obydwu prototypach wpływ sposobu namagnesowania magnesów trwałych radialnego i osiowego na moment zaczepowy oraz moment całkowity.

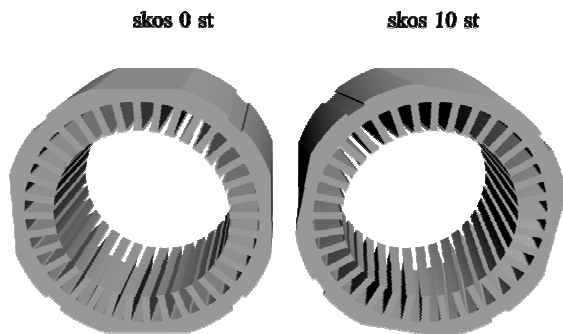
Obliczenia związane z uwzględnieniem skosu rdzenia stojana wykonano przy zastosowaniu modelu quasi-trójwymiarowego ($2\frac{1}{2}D$). Otrzymane wyniki obliczeń porównano z modelem trójwymiarowym prototypu A silnika (proste żłobki i magnesy bez skosu). Analizę modeli polowych wykonano przy zastosowaniu komercyjnego pakietu oprogramowania FLUX firmy Cedrat [4] wykorzystującego metodę elementów skończonych (MES).

2. Modele silnika BLDC

2.1. Prototyp B silnika BLDC o skośnych żłobkach

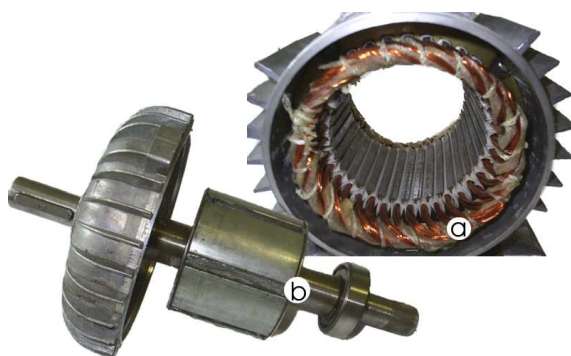
Na rysunku 1 pokazano modele numeryczne stojanów rozpatrywanych silników. W jednym ze stojanów zastosowano skos pakietu stojana (prototyp B silnika). Blachy rdzenia stojana

zostały tak umieszczone, że na całej długości czynnej silnika powstałe zęby tworzą kąt skręcenia o $\alpha_s=10^\circ$. Kąt ten odpowiada rozpiętości kątowej podziałki żłobkowej. Pozostałe wymiary geometryczne silników są identyczne.



Rys.1. Modele numeryczne stojanów silników-prototypy A i B

Na rysunku 2 pokazano model rzeczywisty silnika (prototyp B) z zastosowanym skosem pakietu stojana.



Rys.2. Prototyp B silnika ze skośnymi żłobkami w stojanie (a) oraz sześciobiegunowy wirnik (b)

W tabeli 1 zamieszczono ważniejsze parametry prototypu A bez skosu żłobków i prototypu B silnika ze skosem żłobków. Prototypy zostały wykonane na bazie konstrukcji silnika asynchronicznego typu Sh 80-A. Wirniki zostały wykonane z litego materiału ferromagnetycznego.

Analiza skosu żłobków stojana wymaga zamodelowania skosu w modelu uwzględniającym podział maszyny na warstwy wzdłuż długości czynnej silnika. Na taki model składa się k warstw, a każda reprezentuje $1/k$ długości silnika. W każdej warstwie żądany region obrócony jest w porównaniu z poprzednią warstwą o kąt $\alpha_s((n_w-1)/(k-1)-1/2)$ gdzie: α_s – kąt skosu, n_w – numer kolejnej warstwy. Liczba warstw ma wpływ na

dokładność uzyskanych wyników w odniesieniu do obiektów rzeczywistych. W obliczeniach przyjęto pięć warstw. Z przeprowadzonych badań wynika, że stosowanie większej liczby warstw nie ma już większego wpływu na zmianę momentu zaczepowego.

We wszystkich analizowanych modelach uwzględniono współczynnik pakietowania rdzenia stojana.

Tabela 1. Parametry prototypów: A (o prostych żłobkach) i B (o skośnych żłobkach)

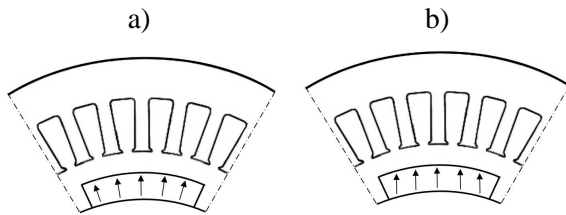
Typ magnesu	Nd-Fe-B
Wysokość magnesu	$h = 3 \text{ mm}$
Rozpiętość kątowa magnesu	$\gamma = 47^\circ$
Indukcja remanentu	$B_r = 1.21 \text{ T}$
Natężenie koercji	$H_c = 892 \text{ kA/m}$
Liczba żłobków stojana	$z = 36$
Liczba żłobków na biegun i fazę	$q = 2$
Liczba zwojów w jednej cewce	$N = 5$
Liczba zwojów w jednej cewce	$N = 5$
Długość czynna pakietu silnika	$l = 62 \text{ mm}$
Średnica wewnętrzna stojana	$D_{sw} = 78 \text{ mm}$
Szczelina powietrzna	$\delta = 1.5 \text{ mm}$
Średnica zewnętrzna stojana	$D_{sz} = 120 \text{ mm}$
Kąt skosu pakietu (prototyp B)	10°

2.2. Magnetyzacja radialna i osiowa magnesów trwałych

Przebieg charakterystyki momentu elektromagnetycznego silnika BLDC zależy od materiału, z którego wykonano magnes trwały, jego kształtu, wymiarów, a także konfiguracji biegunów magnetycznych.

Analizowane prototypy silników posiadają spiekane magnesy trwałe ze stopu Nd-Fe-B o magnetyzacji radialnej, tak jak to pokazano na rysunku 3a. Stosowanie magnesów o innym sposobie magnesowania niż magnesowanie radialne pozwala na kształtowanie indukcji magnetycznej w szczeliny roboczej od sinusoidalnego po trapezoidalny, a także wpływa na wielkość tętnień momentu elektromagnetycznego, wartość prądu, strumienia i siły elektromotorycznej. Do najbardziej popularnych sposobów

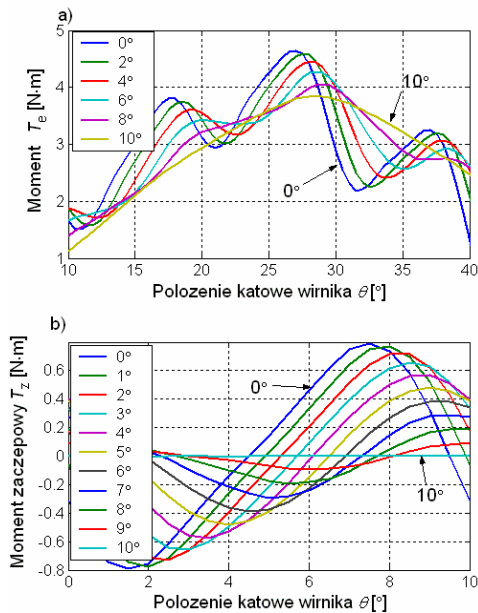
magnesowania magnesów trwałych poza radialną, jest magnesowanie osiowe (rys.3b).



Rys.3. Ilustracja kierunków wektora magnetyzacji przy namagnesowaniu radialnym (a) oraz osiowym (b)

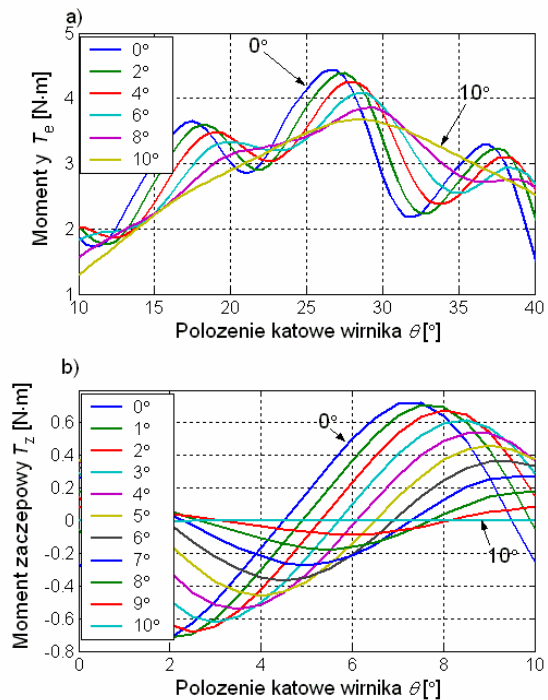
3. Wybrane wyniki badań

Celem sprawdzenia skuteczności redukcji momentu zaczepowego w silniku ze skosem żłobków w stojanie, wykonano szereg obliczeń numerycznych. Na rysunku 4 pokazano zależność momentu elektromagnetycznego T_e (rys. 4a) oraz momentu zaczepowego T_z (rys.4b) w funkcji kąta obrotu wirnika, dla różnych wartości kąta skosu stojana przy kierunku magnesowania radialnym magnesów trwałych.



Rys.4. Charakterystyki kątowe momentu całkowitego (a) oraz zaczepowego (b) w funkcji kąta obrotu wirnika, dla różnych wartości kąta skosu stojana, przy magnesowaniu radialnym magnesów

Zależność momentu elektromagnetycznego T_e oraz momentu zaczepowego T_z w funkcji kąta obrotu wirnika θ dla różnych wartości kąta skosu stojana przy polaryzacji osiowej magnesów zamieszczono na rysunku 5.



Rys.5. Charakterystyki kątowe momentu całkowitego (a) oraz zaczepowego (b) w funkcji kąta obrotu wirnika, dla różnych wartości kąta skosu stojana, przy magnesowaniu osiowym magnesów

Zastosowanie skosu żłobków pozwoliło, niezależnie od sposobu polaryzacji magnesów trwałych, uzyskać znaczącą redukcję amplitudy momentu zaczepowego w porównaniu z silnikiem o prostych żłobkach.

Poniżej pokazano porównanie wyników obliczeń silnika o zadanym kierunku wektora magnetyzacji radialnym bądź osiowym oraz wpływu kierunku magnetyzacji na moment zaczepowy oraz elektromagnetyczny dla prototypu A (rys.6) i prototypu B (rys.7). Parametry i wymiary magnesów oraz wymiary obwodu magnetycznego były identyczne dla obydwu modeli silników.

W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń wartości maksymalnej momentu zaczepowego (T_{zmax}), wartości średniej momentu całkowitego (T_{eav}), przy zasilaniu prądem $I=10$ A.

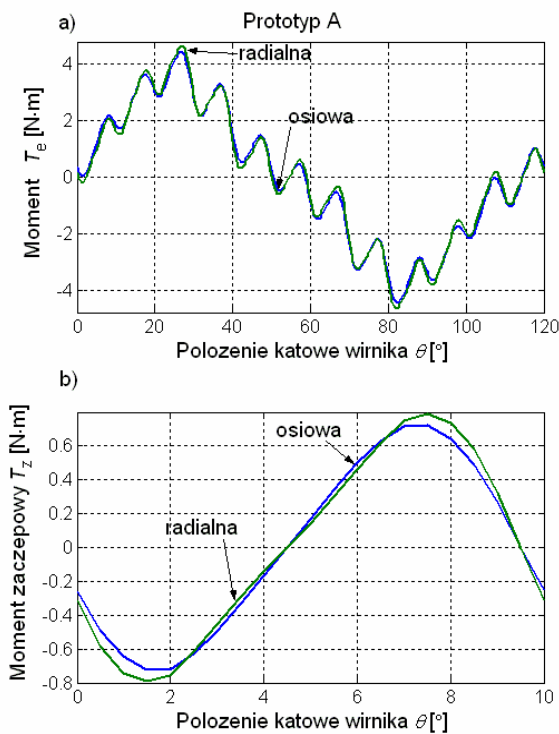
Dodatkowo uwzględniono względny współczynnik pulsacji momentu elektromagnetycznego (ε), który wyznaczono z zależności:

$$\varepsilon = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{av}} \quad (1)$$

gdzie: T_{\max} – wartość maksymalna momentu elektromagnetycznego,

T_{\min} – wartość minimalna momentu elektromagnetycznego,

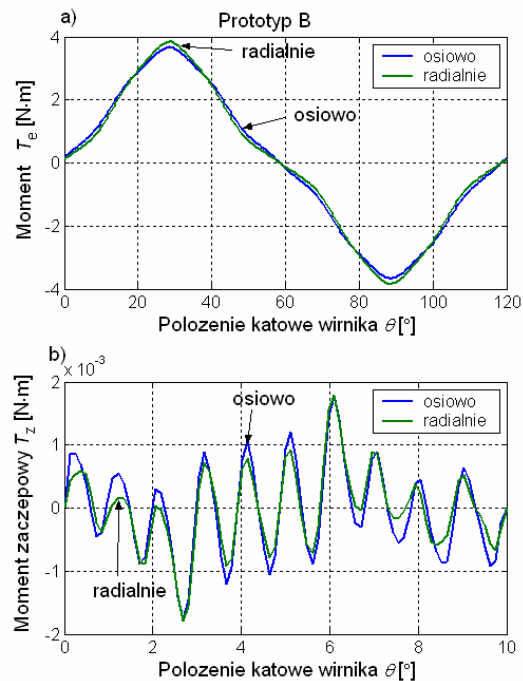
T_{av} – wartość średnia momentu elektromagnetycznego.



Rys.6. Charakterystyki kątowe momentu całkowitego (a) oraz zaczepowego (b) w funkcji położenia wirnika prototypu A dla różnych sposobów magnesowania magnesów

Tabela 2. Obliczone parametry badanych modeli silnika ($I=10\text{ A}$)

prototyp	Rodzaj magnesowania	T_{eav} N·m	$T_{z\text{max}}$ N·m	ε -
A	radialny	3.4	0.79	72.2
	osiowy	3.29	0.72	68.9
B	radialny	3.35	0.0017	49.7
	osiowy	3.25	0.0017	37.6



Rys.7. Charakterystyki kątowe momentu całkowitego (a) oraz zaczepowego (b) w funkcji położenia wirnika prototypu B dla różnych sposobów magnesowania magnesów

4. Wnioski

Wyniki obliczeń pokazują, że poprzez właściwy dobór kąta skosu zębów stojana można uzyskać znaczną redukcję momentu zaczepowego, bez konieczności stosowania dodatkowych zmian konstrukcyjnych w silniku. Zastosowanie skosu zębów stojana pozwoliło w analizowanym przypadku zmniejszyć tętnienia momentu elektromagnetycznego o około 20%. Warto podkreślić, że przy jednoczesnej redukcji momentu zaczepowego i tętnień momentu elektromagnetycznego T_e wartość średnia momentu T_{eav} na wale silnika jest praktycznie stała (zmniejsza się o około 1.3%). Jak wykazują obliczenia stosowanie skosu zębów stojana z punktu widzenia redukcji wartości maksymalnej momentu zaczepowego daje podobny efekt jak skos lub pseudo skos magnesów trwałych.

W analizowanym przypadku sposób magnesowania magnesów trwałych nie miał znaczącego wpływu na wyznaczone parametry silnika. Dla magnesowania radialnego magnesów uzyskano nieznacznie większą wartość średnią momentu T_{eav} .

Do zasadniczych zalet stosowania skosu zębów stojana można zaliczyć ograniczenie zawartości wyższych

harmonicznych w polu magnetycznym, co wpływa na zmniejszenie drgań i hałasu. Skos żłobków stojana nie wymaga dodatkowych nakładów materiałowych związanych z uzyskaniem efektu skręcenia. Jest to niewątpliwie zaleta metody. Jednak już uzyskanie efektu skręcenia w procesie technologicznym pakietowania stojana jest znacznie trudniejsze. Komplikuje się również proces uzwojenia silnika. Są to niewątpliwe wady tej metody, pomimo jej dużej skuteczności.

Literatura

- [1] Dudzikowski I., Gierak D.: *Pulsacje momentu elektromagnetycznego i ich ograniczenie w silnikach magnetoelektrycznych prądu stałego*. SME'2004, 15-18 czerwca, Hajnówka, s.406-414.
- [2] Dudzikowski I., Janiszewski S., Gierak D.: *Polowo-obwodowa analiza momentu elektromagnetycznego w komutatorowym silniku magnetoelektrycznym*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 54, Studia i Materiały Nr 23, 2003, s. 406-413.
- [3] Fang D.: *An improved iron loss estimation for permanent magnet brushless machines*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.14, No.4, December 1999, pp.1391-1395.
- [4] Flux 10.3 *Documentation*, 2009, Cedrat Group.
- [5] Gajewski M.: *Porównanie parametrów silników bezszczotkowych z magnesami trwałymi o prostych i o skośnych żłobkach*. Proceedings of XLI International Symposium on Electrical Machines, SME'2005, 14-17 June, Jarnołtówek, 2005, s.181-186.
- [6] Gierak D., Dudzikowski I.: *Analiza wpływu sposobu namagnesowania magnesów na parametry silnika komutatorowego o magnesach trwałych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 60, Studia i Materiały Nr 27, 2007.
- [7] Łukaniszyn M., Młot A.: *Analiza momentu elektromagnetycznego i składowych pulsujących w bezszczotkowym silniku prądu stałego wzbudzonym magnesami trwałymi*. Proceedings of XLI International Symposium on Electrical Machines, SME,2005, 14-17 June, Jarnołtówek, s.157-162.
- [8] Mrozek A.: *Wpływ pseudoskosu biegunów wirnika i skosu żłobków stojana na pulsacje momentu i SEM w bezszczotkowych silnikach z magnesami trwałymi*. Politechnika Śląska, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 69/2004, s.29-34.
- [9] Zhu Z.Q., Thomas A.S., Chen J.T, Jewell G.W.: *Cogging torque in flux-switching permanent magnet machines*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.45, No.10, October 2009, pp.4708-4711.
- [10] Xintong J., Jingwei X., Yong L., Yongping L.: *Theoretical and simulation analysis of influences of stator width on cogging torque of BLDC motors*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol.45, No.10, October 2009.

Autorzy

dr inż. Adrian Młot, Politechnika Opolska, ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole, (077)4538447, a.mlot@po.opole.pl

Prof. dr hab. inż. Marian Łukaniszyn, Politechnika Opolska, ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole, (077)4538447, m.lukaniszyn@po.opole.pl.

dr inż. Mariusz Korkosz, Politechnika Rzeszowska, 35-959 Rzeszów, ul. W. Pola 2, (017)8544777, mkosz@prz.edu.pl.

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Lech Nowak