

Roman Nadolski, Zbigniew Gawęcki  
Politechnika Świętokrzyska, Kielce

## WPLYW PARAMETRÓW OBWODU MAGNETYCZNEGO SILNIKA BEZSZCZOTKOWEGO PRĄDU STAŁEGO NA POZIOM PULSACJI MOMENTU ELEKTROMAGNETYCZNEGO

### INFLUENCE OF MAGNETIC CIRCUIT PARAMETERS ON ELECTROMAGNETIC TORQUE RIPPLES OF BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dotyczących wpływu wybranych parametrów obwodu magnetycznego na poziom pulsacji momentu elektromagnetycznego silnika bezszczotkowego. Obliczenia przeprowadzono w środowisku Flux firmy Cedrat bazującego na metodzie elementów skończonych. W badaniach wykorzystano modele quasi-trójwymiarowe. Na podstawie wyników badań symulacyjnych określono wpływ kąta skosu żłobków stojana, szerokości otwarcia żłobka, wysokości i rozpiętości kątowej magnesów, wysokości szczeliny powietrznej na wartość i poziom pulsacji momentu elektromagnetycznego.

**Abstract:** This paper presents results of simulation studies influence of magnetic circuit parameters on electromagnetic torque ripple of brushless direct current motor. The simulation have been done using the finite elements method with Flux by Cedrat company. The quasi three-dimensional models used in the calculations. Based on simulation results effect of stator skew angle, slot opening, height and angular range magnets, height of air gap was examined on electromagnetic torque ripples.

**Słowa kluczowe:** silnik bezszczotkowy prądu stałego, obwód magnetyczny, pulsacje momentu elektromagnetycznego

**Keywords:** brushless direct current motor (BLDCM), magnetic circuit, electromagnetic torque ripples

#### 1. Wstęp

W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych dotyczących wpływu parametrów obwodu magnetycznego na moment elektromagnetyczny. Wykonane obliczenia stanowią kontynuację wcześniejszych prac związanych z analizą możliwości zmniejszenia amplitudy momentu zaczepowego w prototypowej konstrukcji silnika bezszczotkowego z zewnętrznym wirnikiem. W silnikach bezszczotkowych prądu stałego wzbudzanych magnesami trwałymi wartość momentu elektromagnetycznego jest wynikiem sumowania się dwóch składowych. Pierwsza składowa powstaje na skutek współdziałania pola magnetycznego wirnika, którego źródłem są magnesy trwałe, ze stojanem o kątowej zmienności reluktancji, wynikającej z niesymetrycznej szczeliny powietrznej [3]. Składowa wyznaczana jest przy braku zasilania uzwojeń stojana i nazywana jest momentem zaczepowym. W drugiej składowej określanej jako moment tętniący dominującą rolę stanowi moment wzajemny będący efektem współdziałania prądu płynącego przez uzwojenie stojana z polem magnetycznym wirnika [2,6]. Wy-

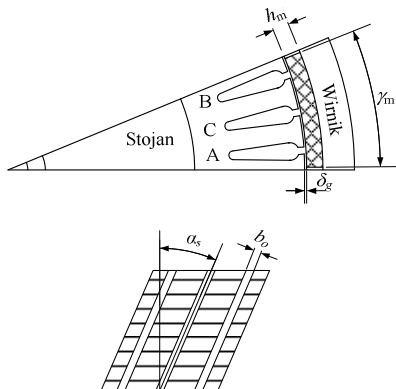
mienione składowe powodują pulsacje momentu elektromagnetycznego silnika bezszczotkowego, które utrudniają precyzyjne sterowanie, generują wibracje, hałas i są powodem dodatkowych strat mocy [1,3]. Wyniki wielu prac wskazują na możliwości zmniejszenia pulsacji momentu elektromagnetycznego silników bezszczotkowych na etapie projektowania [2,6,7]. Celem niniejszej pracy jest zbadanie wpływu wybranych parametrów obwodu magnetycznego tj. skos żłobków stojana, szerokość otwarcia żłobków, wysokość magnesów, rozpiętość kątowa magnesów, wysokość szczeliny powietrznej na wartość i poziom pulsacji momentu elektromagnetycznego.

#### 2. Obiekt badań

Jako bazowy obiekt badań posłużyła prototypowa konstrukcja silnika bezszczotkowego prądu stałego o budowie odwróconej przeznaczona do bezprzekładniowego napędu pojazdów lekkich. Podstawowe dane silnika: napięcie znamionowe  $U_N=24V$ , prąd znamionowy  $I_N=8A$ , prędkość znamionowa  $n_N=120obr/min$ , liczba żłobków stojana  $N_s=48$ , liczba biegunów wirnika  $p_r=16$ , wysokość magnesów

$h_m=3\text{mm}$ , wysokości szczeliny powietrznej  $\delta_g=0.5\text{mm}$ , skos żłobków stojana  $15^\circ$ , średnica zewnętrzna wirnika  $d_{re}=160\text{mm}$ .

Na rys. 1 przedstawiającym jedną podziałkę biegunową prototypowej konstrukcji, zaznaczono parametry geometryczne obwodu magnetycznego, których wartości modyfikowano w trakcie obliczeń.



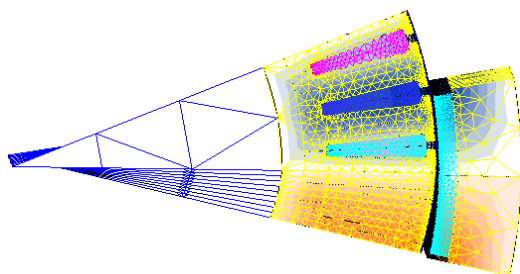
Rys .1. Jedna podziałka biegunowa analizowanej konstrukcji.

### 3. Badania symulacyjne

Badania symulacyjne przeprowadzono dla jednego przedziału komutacji odpowiadającego przemieszczeniu wirnika o  $7.5^\circ$  z krokiem  $0.25^\circ$ , przy znamionowych wartościach prądów w pasmach A i C. Aby uwzględnić skos żłobków stojana w symulacjach wykorzystano modele quasi-trójwymiarowe ( $2\frac{1}{2}D$ ) (rys.2) z odpowiednio dobraną liczbą warstw.

Moment elektromagnetyczny wyznaczono wykorzystując wewnętrzne funkcje programu Flux jako pochodną zmiany koenergii magnetycznej  $W'$  względem kąta obrotu wirnika  $\theta_m$  [5]:

$$T_e(\theta_m) = \frac{\partial W'}{\partial \theta_m} \quad (1)$$



Rys .2. Model quasi-trójwymiarowy ( $2\frac{1}{2}D$ ) analizowanej konstrukcji.

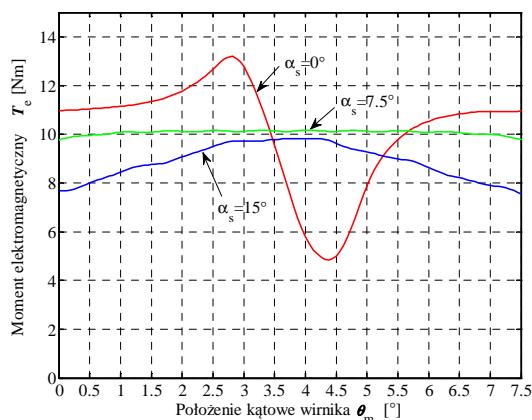
Wraz z kątową zmianą położenia wirnika przy zasilaniu określonych pasm uzwojeń stojana zmianie ulega wartość momentu elektromagnetycznego [1,3], w związku z tym, aby określić poziom pulsacji zdefiniowano procentowy wskaźnik pulsacji momentu elektromagnetycznego obliczany zgodnie z zależnością [4,6]:

$$\varepsilon_p = \frac{T_{e\max} - T_{e\min}}{T_{eav}} \quad (2)$$

gdzie:  $T_{e\max}$ ,  $T_{e\min}$ ,  $T_{eav}$  – oznaczają odpowiednio maksymalną, minimalną i średnią wartość momentu elektromagnetycznego.

#### 3.1 Wpływ skosu żłobków stojana na moment elektromagnetyczny

Badania symulacyjne dotyczące wpływu skosu żłobków stojana na moment elektromagnetyczny silnika bezszczotkowego przeprowadzono zadając kąt skosu od  $0^\circ$  do wartości  $15^\circ$  odpowiadającej dwóm podziałkom żłobkowym. Na rys. 3 przedstawiono moment elektromagnetyczny dla trzech charakterystycznych wartości kątów skosu żłobków stojana  $0^\circ$ ,  $7.5^\circ$ ,  $15^\circ$ . Największe pulsacje momentu elektromagnetycznego generowane są w konstrukcji bez skosu żłobków stojana, ponieważ brak skosu żłobków stojana (lub skosu magnesów) w silnikach wzbudzanych magnesami trwałymi jest jednoznaczny z największą amplitudą momentu zaczepowego. W tabeli 1. zamieszczono wyniki obliczeń wartości minimalnej, maksymalnej, średniej i współczynnika pulsacji momentu elektromagnetycznego dla różnych wartości kąta skosu żłobków stojana.



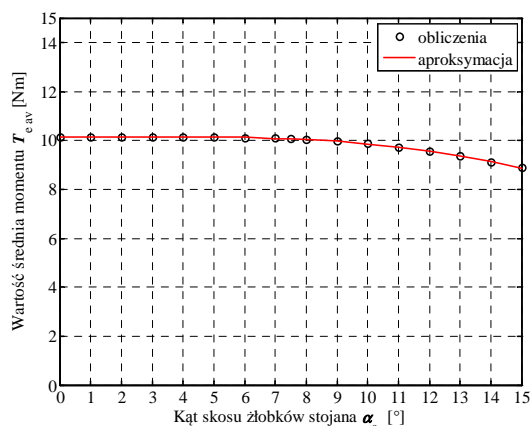
Rys .3. Moment elektromagnetyczny  $T_e$  w funkcji położenia wirnika  $\theta_m$  dla różnych wartości kąta skosu żłobków stojana  $\alpha_s$ .

Analizując dane zamieszczone w tabeli 1 można zauważyć, że dla rozpatrywanej konstrukcji wraz ze wzrostem kąta skosu żłobków stojana zmniejsza się poziom pulsacji momentu elektromagnetycznego, osiągając minimalną wartość przy kącie 7.5°, dla kąta większego od jednej podziałki żłobkowej poziom pulsacji zaczyna stopniowo wzrastać.

Tabela 1. Wyniki obliczeń dla różnych wartości kąta skosu żłobków stojana.

$\alpha_s$ [°]	$T_{e \text{ min}}$ [Nm]	$T_{e \text{ max}}$ [Nm]	$T_{e \text{ av}}$ [Nm]	$\epsilon_p$ [%]
0	4,85	13,18	10,14	82,18
1	4,85	13,18	10,14	82,18
2	6,96	12,11	10,14	50,84
3	8,09	12,11	10,14	36,33
4	8,79	11,57	10,13	27,48
5	9,22	11,40	10,13	21,49
6	9,54	11,10	10,11	15,43
7	9,83	10,45	10,09	6,07
7,5	9,74	10,16	10,07	4,12
8	9,55	10,23	10,05	6,76
9	9,01	10,40	9,98	13,89
10	8,53	10,50	9,87	19,89
11	8,23	10,53	9,73	23,61
12	8,12	10,60	9,55	25,97
13	7,92	10,58	9,35	28,38
14	7,71	10,39	9,12	29,42
15	7,54	9,83	8,88	25,74

Zależność średniej wartości momentu elektromagnetycznego dla różnych kątów skosu żłobków stojana przedstawiono na rys.4. Dla zakresu kątów skosu od 0° do ok.8° wartość średnia momentu elektromagnetycznego jest prawie stała, natomiast dla większych kątów maleje.

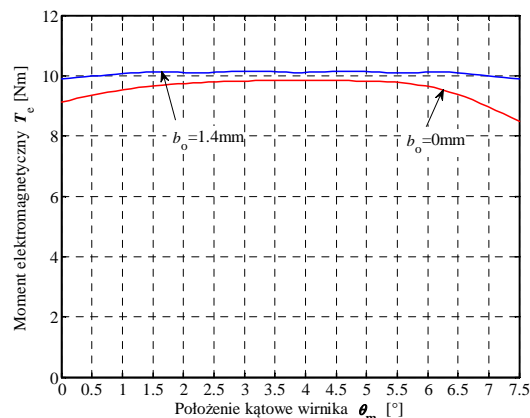


Rys .4. Wartość średnia momentu elektromagnetycznego  $T_{e \text{ av}}$  w zależności dla różnych wartości kąta skosu żłobków stojana  $\alpha_s$ .

Analizując wyniki obliczeń można stwierdzić, że dla rozpatrywanej konstrukcji najbardziej odpowiednim kątem skosu żłobków stojana będzie kąt 7.5° ponieważ uzyskiwany moment elektromagnetyczny będzie charakteryzował się najniższym poziomem pulsacji wynoszącym 4.12%. Do dalszych obliczeń przyjęto zatem taką wartość kąta skosu żłobków stojana.

### 3.2 Wpływ szerokości otwarcia żłobków stojana na moment elektromagnetyczny

Badania symulacyjne dotyczące wpływu otwarcia żłobka na moment elektromagnetyczny przeprowadzono dla szerokości otwarcia żłobka od 1.8 mm do całkowitego zamknięcia. Moment elektromagnetyczny dla dwóch szerokości otwarcia żłobka przedstawiono na rys.5.



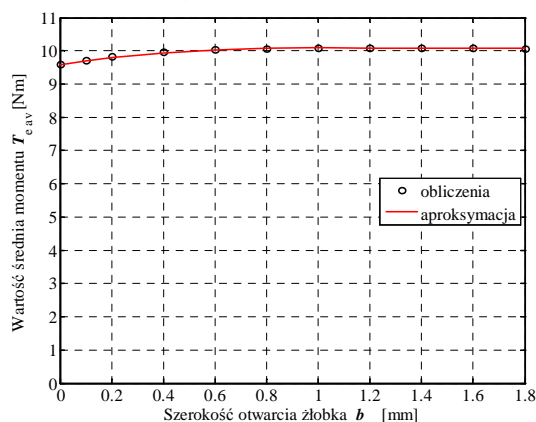
Rys .5. Moment elektromagnetyczny  $T_e$  w funkcji położenia wirnika  $\theta_m$  dla różnych szerokości otwarcia żłobka  $b_o$ .

Szerokość otwarcia żłobka w rozpatrywanej konstrukcji w niewielkim stopniu wpływa na kształt momentu elektromagnetycznego (rys 6) i poziom jego pulsacji. Szczegółowe wyniki obliczeń zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki obliczeń dla różnych szerokości otwarcia żłobków stojana.

$b_o$ [mm]	$T_{e \text{ min}}$ [Nm]	$T_{e \text{ max}}$ [Nm]	$T_{e \text{ av}}$ [Nm]	$\epsilon_p$ [%]
0	8,49	9,84	9,58	14,17
0,1	9,29	9,85	9,70	5,74
0,2	9,57	9,91	9,81	3,41
0,4	9,75	10,02	9,95	2,68
0,6	9,81	10,09	10,02	2,71
0,8	9,85	10,12	10,06	2,72
1	9,87	10,13	10,08	2,57
1,2	9,89	10,14	10,09	2,46
1,4	9,90	10,16	10,08	2,59
1,6	9,89	10,16	10,08	2,72
1,8	9,86	9,86	10,06	2,71

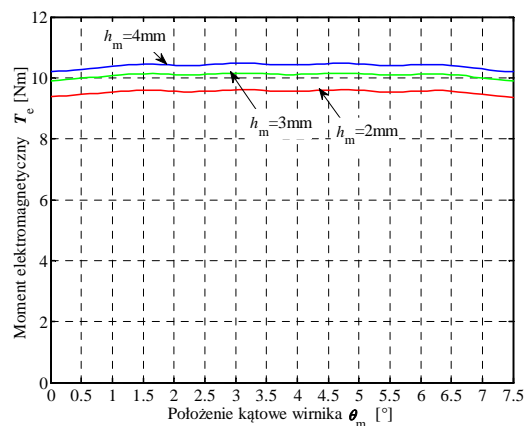
Wartość średnia momentu elektromagnetycznego przy całkowitym zamknięciu żłobka małej, ale zmniejszeniu ulega również amplituda momentu zaczepowego.



Rys. 6. Wartość średnia momentu elektromagnetycznego  $T_{eav}$  w zależności od szerokości otwarcia żłobków stojana  $b_o$ .

### 3.3 Wpływ wysokości i rozpiętości kątowej magnesów na moment elektromagnetyczny

Badania symulacyjne dotyczące wpływu wysokości magnesów na moment elektromagnetyczny przeprowadzono dla zmiany wysokości magnesu w zakresie  $\pm 1\text{mm}$  w stosunku do konstrukcji bazowej. Na rys.7. przedstawiono moment elektromagnetyczny dla trzech wybranych wysokości magnesu.



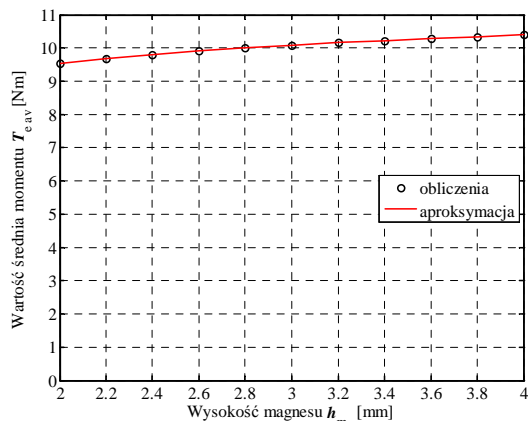
Rys. 7. Moment elektromagnetyczny  $T_e$  w funkcji położenia wirnika  $\theta_m$  dla wybranych wysokości magnesów  $h_m$ .

Analizując wyniki obliczeń zamieszczone w tabeli 3., można stwierdzić, że wysokość magnesu nie wpływa w istotny sposób na poziom pulsacji momentu elektromagnetycznego, ponieważ współczynnik pulsacji utrzymuje się na poziomie poniżej 3%

Tabela 3. Wyniki obliczeń dla różnych wysokości magnesów.

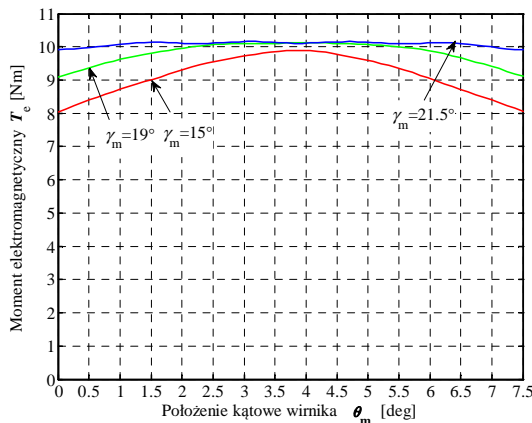
$h_m$ [mm]	$T_{e\ min}$ [Nm]	$T_{e\ max}$ [Nm]	$T_{e\ av}$ [Nm]	$\epsilon_p$ [%]
2,00	9,36	9,61	9,54	2,61
2,20	9,50	9,75	9,68	2,59
2,40	9,62	9,87	9,80	2,57
2,60	9,73	9,98	9,91	2,58
2,80	9,82	10,08	10,00	2,58
3,00	9,90	10,16	10,09	2,57
3,20	9,97	10,24	10,16	2,59
3,40	10,04	10,30	10,23	2,62
3,60	10,10	10,37	10,29	2,67
3,80	10,15	10,43	10,34	2,70
4,00	10,20	10,48	10,39	2,72

Wartość średnia momentu elektromagnetycznego wraz ze wzrostem wysokości magnesów również rośnie rys.8, ponieważ ma to związek ze wzrostem objętości materiału magnetycznie twardego w obwodzie magnetycznym silnika.



Rys. 8. Wartość średnia momentu elektromagnetycznego  $T_{eav}$  w zależności od wysokości magnesów  $h_m$ .

Badania dotyczące wpływu rozpiętości kątowej magnesów na moment elektromagnetyczny przeprowadzono w zakresie od  $15^\circ$  do  $22,5^\circ$ . Wybrany zakres rozpiętości kątowych wynika ze sposobu sterowania i liczby par biegunów magnetycznych wirnika,  $15^\circ$  odpowiada  $120^\circ$  elektrycznym,  $22,5^\circ$  odpowiada podziałce biegunowej, czyli  $180^\circ$  elektrycznym. Moment elektromagnetyczny dla trzech wybranych rozpiętości kątowych magnesów w przedstawiono na rys.9.. Jak można zauważyć, wraz ze wzrostem rozpiętości kątowej magnesu zmienia się kształt momentu, co ma bezpośredni związek ze zmniejszeniem współczynnika pulsacji (tabela 4.).



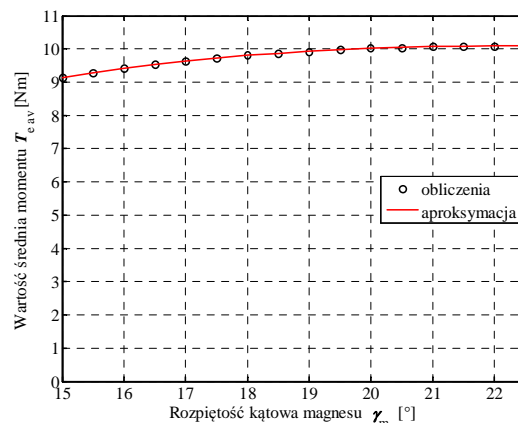
Rys .9. Moment elektromagnetyczny  $T_e$  w funkcji położenia wirnika  $\theta_m$  dla różnych rozpiętości kątowych magnesów  $\gamma_m$ .

W rozpatrywanym przedziale rozpiętości kątowych magnesów, współczynnik pulsacji momentu elektromagnetycznego zmniejsza się ok. dziesięciokrotnie od wartości ponad 20% do wartości ok. 2%, co ma bezpośredni związek z redukcją amplitudy momentu zaczepowego.

Tabela 4. Wyniki obliczeń dla różnych rozpiętości kątowych magnesów.

$\gamma_m$ [mm]	$T_{e \text{ min}}$ [Nm]	$T_{e \text{ max}}$ [Nm]	$T_{e \text{ av}}$ [Nm]	$\varepsilon_p$ [%]
15,00	8,03	9,90	9,14	20,47
15,50	8,22	9,94	9,28	18,56
16,00	8,41	10,06	9,43	17,57
16,50	8,58	10,08	9,54	15,80
17,00	8,76	10,09	9,63	13,87
17,50	8,91	10,10	9,72	12,27
18,00	9,09	10,12	9,82	10,55
18,50	9,25	10,14	9,87	9,07
19,00	9,36	10,12	9,92	7,62
19,50	9,51	10,14	9,99	6,33
20,00	9,65	10,16	10,02	5,10
20,50	9,70	10,13	10,04	4,24
21,00	9,82	10,14	10,08	3,25
21,50	9,90	10,16	10,09	2,57
22,00	9,91	10,13	10,09	2,14
22,50	9,90	10,14	10,09	2,41

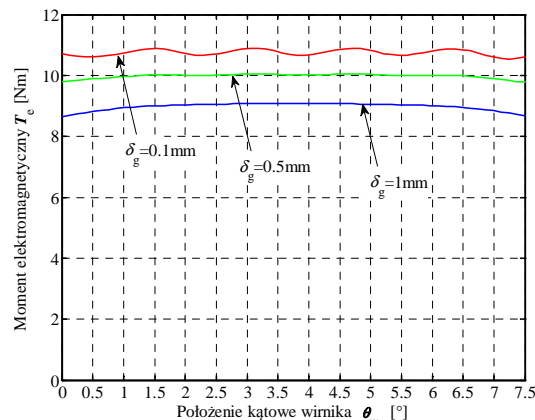
Jak wynika z przestawionej zależności wartości średniej momentu elektromagnetycznego od rozpiętości kątowej (rys.10), przy zwiększaniu rozpiętości kątowej magnesów od minimum ( $15^\circ$ ) do wartości odpowiadającej podziałce biegunowej średnia wartość momentu elektromagnetycznego wzrasta o ok. 10% przy znacznym zmniejszeniu pulsacji momentu.



Rys .10. Wartość średnia momentu elektromagnetycznego  $T_{e,av}$  w zależności od rozpiętości kątowych magnesów  $\gamma_m$ .

### 3.4 Wpływ wysokości szerokości szczeliny powietrznej na moment elektromagnetyczny

Badania symulacyjne dotyczące wpływu wysokości szczeliny powietrznej na moment elektromagnetyczny przeprowadzono dla zmian wysokości szczeliny powietrznej w zakresie od 0.1mm do 1mm. Moment elektromagnetyczny w zależności od położenia kątowego dla trzech wybranych wysokości szczeliny powietrznej przedstawiono na rys.11. Można zauważyć, że wraz ze wzrostem wysokości szczeliny powietrznej zmniejszeniu ulega wartość momentu elektromagnetycznego, ponieważ wzrasta reluktancja obwodu magnetycznego.



Rys .11. Moment elektromagnetyczny  $T_e$  w funkcji położenia wirnika  $\theta_m$  dla różnych wysokości szczeliny powietrznej  $\delta_g$

Na podstawie wyników obliczeń zamieszczonych w tabeli 5., można stwierdzić że dla analizowanej konstrukcji wraz ze zmianą wysokości szczeliny powietrznej wartość współ-

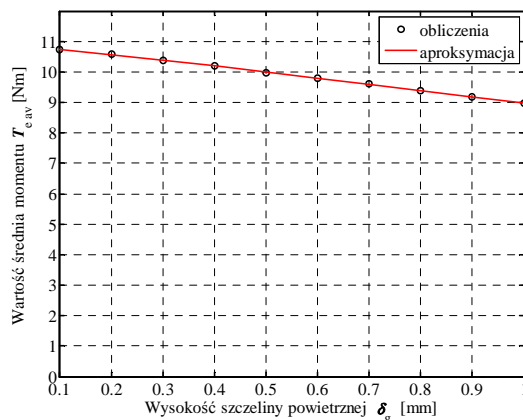


czynnika pulsacji momentu elektromagnetycznego nie przekracza 5%.

Tabela 5. Wyniki obliczeń dla różnych wysokości szczeliny powietrznej.

$\delta_g$ [mm]	$T_{e \text{ min}}$ [Nm]	$T_{e \text{ max}}$ [Nm]	$T_{e \text{ av}}$ [Nm]	$\varepsilon_p$ [%]
0,10	10,53	10,89	10,74	3,34
0,20	10,41	10,67	10,57	2,44
0,30	10,22	10,45	10,38	2,21
0,40	10,01	10,26	10,19	2,43
0,50	9,78	10,05	9,98	2,72
0,60	9,57	9,87	9,80	3,07
0,70	9,35	9,67	9,60	3,39
0,80	9,12	9,48	9,39	3,84
0,90	8,88	9,28	9,19	4,32
1,00	8,65	9,07	8,97	4,76

Zwiększanie wysokości szczeliny powietrznej powoduje zarówno spadek średniej wartości momentu elektromagnetycznego, co przedstawiono na (rys.12.), jak i amplitudy momentu zaczepowego.



Rys. 12. Wartość średnia momentu elektromagnetycznego  $T_{e \text{ av}}$  w zależności od wysokości szczeliny powietrznej  $\delta_g$ .

#### 4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych dotyczących wpływu zmian kąta skosu żłobków stojana, szerokości otwarcia żłobków, wysokości i rozpiętości kątowej magnesów, wysokości szczeliny powietrznej na moment elektromagnetyczny silnika bezszczotkowego prądu stałego w odniesieniu do konstrukcji prototypowej. Obliczenia momentu elektromagnetycznego przeprowadzono przy zasilaniu dwóch pasm uzwojenia stojana dla różnych położenia kątowych wirnika. Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że zmiana skosu żłobków z  $15^\circ$  do  $7,5^\circ$  powinna

spowodować zmniejszenie współczynnika pulsacji momentu elektromagnetycznego z ok.25% do ok.4%, ponieważ redukcji ulega również amplituda momentu zaczepowego. Wyniki badań wskazują, że istotny wpływ na poziom pulsacji momentu elektromagnetycznego w silnikach bezszczotkowych ma również rozpiętość kątowa magnesów. W odniesieniu do wpływu wysokości magnesów i szczeliny powietrznej na moment elektromagnetyczny należy uwzględnić dobór właściwego punktu pracy magnesu trwałego. Przy badaniu wpływu zmian parametrów geometrycznych obwodu magnetycznego na poziom pulsacji momentu elektromagnetycznego należy zwrócić również uwagę na amplitudę momentu zaczepowego.

#### Literatura

- [1]. Gieras J.F., Wing M.: „Permanent magnet motor technology. Design and Application”, Second Edition, Marcel Dekker Inc., New York, 2002.
- [2]. Hanselman D.C.: „Minimum torque ripple, maximum efficiency excitation of brushless permanent magnet motors, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 41, pp.292-300, 1994.
- [3]. Hanselman D.: „Brushless permanent magnet motor design”, Second Edition, The Writers’ Collective, Cranston, Rhode Island 2003.
- [4]. Hendershot Jr. J.R., Miller T.J.E.: „Design of brushless permanent-magnet motors”, Clarendon Press, Oxford, 1994.
- [5]. Keyhani A., Sebastian T.: „Study of cogging torque in permanent magnet machines”, IEEE IAS Annual Meeting, USA, pp.42-49, 1997.
- [6]. Korkosz M., Młot A.: „Analiza pulsacji momentu elektromagnetycznego w bezszczotkowym silniku prądu stałego z zastosowaniem skośnych magnesów”, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 88, s.47-51, 2010.
- [7]. 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.

#### 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, Katedra Energoelektroniki, Maszyn i Napędów Elektrycznych, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce