

WŁAŚCIWOŚCI UZWOJEŃ KONCENTRYCZNYCH UŁAMKOWO-ŻŁOBKOWYCH W ASPEKcie JAKOŚCI NAPIĘCIA GENERATORÓW SYNCHRONICZNYCH

Jarosław WŁASZYNOWICZ¹, Michał MICHNA²

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
e-mail: jarwlasz@student.pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
tel.: 58 347-29-79 e-mail: michal.michna@pg.gda.pl

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki analizy właściwości uzwojeń koncentrycznych ułamkowo żłobkowych. Porównano wartość współczynnika uzwojenia dla podstawowej harmonicznej oraz zawartość wyższych harmonicznych. Obliczenia wykonano w oparciu o zależności analityczne zaimplementowane w specjalnie przygotowanym programie komputerowym. W celu weryfikacji wyników przygotowano model numeryczny maszyny bezszczotkowej maszyny prądu przemiennego z magnesami trwałymi montowanymi powierzchniowo na wirniku w programie FEMM i obliczono rozkład pola magnetycznego. Poprawne zaprojektowanie uzwojenie jest jednym z podstawowych warunków jakości generowanego napięcia (generator) i ograniczenia pulsacji momentu (silnik).

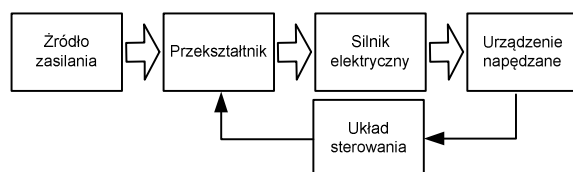
Słowa kluczowe: uzwojenia koncentryczne ułamkowo żłobkowe, maszyna bezszczotkowa, magnesy trwałe.

1. WSTĘP

Uzwojenia ułamkowo-żłobkowe są przedmiotem wielu badań i publikacji [1]. Są one stosowane głównie w maszynach elektrycznych wykorzystywanych w napędach bezpośrednich o małej prędkości obrotowej (rys. 1):

- napędy trakcyjne [1],
- napędy maszyn przemysłowych np. miazadła [2],
- generatory wolnoobrotowe np. w elektrowniach wiatrowych [3].

W napędzie bezpośrednim wyeliminowana jest przekładnia mechaniczna pomiędzy maszyną elektryczną a urządzeniem napędzanym (rys. 1). W konsekwencji prędkość obrotowa wału maszyn elektrycznej i urządzenia napędzanego jest taka sama.



Rys. 1. Uproszczony schemat blokowy bezpośredniego układu napędowego

Prędkość obrotowa maszyny prądu przemiennego zależy od częstotliwości oraz liczby par biegunów:

$$n = 60 \frac{f_s}{p} \quad (1)$$

gdzie: n – prędkość obrotowa, f_s – częstotliwość prądu uzwojenia stojana, p – liczba par biegunów.

Zmniejszenie prędkości obrotowej silnika uzyskuje się przez zmniejszenie częstotliwości prądów zasilających lub przez zwiększenie liczby par biegunów (1). Również w przypadku pracy prądnicowej uzyskanie odpowiedniej częstotliwości przy małej prędkości urządzenia napędzającego generator (turbiny) wymaga zastosowania maszyny o dużej liczbie par biegunów.

Zwiększenie liczby par biegunów prowadzi do konieczności budowy maszyn elektrycznych o dużej średnicy. Wynika to bezpośrednio z zależności na moc wewnętrzną [4, 5]

$$D_s = \left(\frac{4}{\pi^2} \frac{p S_i}{\lambda K_I K_P K_E \frac{f_s}{p} (A_s B_m)} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

gdzie: D_s – średnica przyszczelinowa maszyny, S_i – moc wewnętrzna maszyny, współczynniki konstrukcyjne: λ – współczynnik smukłości, K_I – współczynnik kształtu prądu, K_P – współczynnik kształtu mocy, K_E – współczynnik kształtu napięcia; parametry materiałowe: A_s – gęstość liniowa prądu, B_m – indukcja maksymalna w szczelinie powietrznej [6,7].

Całkowitą liczbę żłobków pakietu stojana (Q_s) oblicza się z zależności:

$$Q_s = 2 p m_s q_s \quad (3)$$

gdzie: m_s – liczba faz stojana, q_s – liczba żłobków na biegun i fazę.

W przypadku projektu standardowego uzwojenia liczbę żłobków na biegun i fazę dobiera się z szeregu liczb całkowitych [7]. Zmniejszenie całkowitej liczby żłobków,

a tym samym zmniejszenie średnicy zewnętrznej maszyny, uzyskuje się przez dobranie liczby żłobków na biegun i fazę $q < 1$. Takie uzwojenia nazywane są uzwojeniami ułamkowo-żłobkowymi. Właściwości takich uzwojeń oraz prawidłowe konfiguracje są w dalszym ciągu przedmiotem licznych badań i publikacji.

2. UZWOJENIA KONCENTRYCZNE UŁAMKOWO-ŻŁOBKOWE

Uzwojenia maszyn elektrycznych wykonywane są najczęściej w postaci odpowiednio połączonych grup przewodów (okrągłych lub profilowanych) lub w postaci prętów (głównie klatki wirników silników indukcyjnych). Podstawowym elementem każdego uzwojenia jest zezwój składający się z kilku zwojów. Leżące obok siebie, w sąsiednich żłobkach zezwoje mogą być łączone szeregowo tworząc tzw. grupy. Grupa charakteryzuje się tym, że wszystkie jej zezwoje przynależą do jednej pary biegunów. Z kolei połączenie kilku grup tworzy tzw. pasmo fazowe tj. uzwojenie jednej fazy maszyny wielofazowej [8,9].

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi uzwojenia maszyn elektrycznych są:

- liczba żłobków na biegun i fazę (q);
- poskok uzwojenia – określający rozpiętość pojedynczego zezwoju pomiędzy jego lewym i prawym bokiem, poskok (y) nazywamy średnicowym jeżeli jest on równy podziałce biegunowej (τ_p):

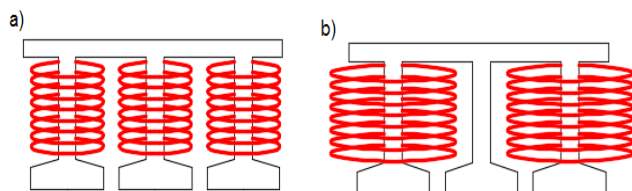
$$y = \tau_p = \frac{Q}{2p}, \quad (4)$$

poskok większy od średnicowego nazywamy wydłużonym, natomiast mniejszy – skróconym;

- liczba warstw uzwojenia – określająca bezpośredni sposób rozmieszczenia boków zezwojów w żłobkach, wyróżniamy uzwojenia jedno- i dwuwarstwowe.

Oprócz wymienionych podstawowych parametrów uzwojeń, wyróżnia się też pozostałe, takie jak: liczba gałęzi równoległych, liczba grup zezwojów na fazę, czy sposób połączenia uzwojeń (w trójkąt lub w gwiazdę) [8].

W artykule dokonano analizy właściwości uzwojeń koncentrycznych ułamkowo-żłobkowych. Uzwojenia takie charakteryzują się liczbą żłobków na biegun i fazę $q < 1$, przy czym rozpiętość pojedynczego zezwoju jest równa $y = 1$. Uzwojenia tego typu wykonywane są poprzez nawijanie kolejnych zwojów wokół zębów stojana, co przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Uzwojenia koncentryczne: a) dwuwarstwowe, b) jednowarstwowe

Uzwojenia koncentryczne najczęściej spotyka się wykonaniu dwuwarstwowym. Wykonanie jednowarstwowe o poskoku $y = 1$, charakteryzowałoby się tym, że co drugi

zęb stojana byłby nieuzwojony. W niektórych publikacjach analizowane są maszyny, o takiej konstrukcji uzwojenia, np. w pozycji [10] badany jest m.in. wpływ szerokości nieuzwojonego zęba na rozkład pola magnetycznego w szczelinie powietrznej. Natomiast w pozycji [11] analizowane są konstrukcje maszyn o różnej szerokości zębów stojana, pod kątem tętnień momentu silnika.

Uzwojenia skupione, charakteryzują się bardzo krótkimi połączeniami czołowymi. Mniejsza jest całkowita długość przewodów i rezystancja uzwojenia, a w konsekwencji maleją straty w miedzi. Krótsze połączenia czołowe pozwalają również na zmniejszenie całkowitych wymiarów maszyny. Powoduje to pożądane w wielu aplikacjach zmniejszenie masy maszyny i zwiększenie gęstości mocy. Uzwojenia skupione zapewniają również większą niezawodność pracy maszyny. Krótkie połączenia czołowe sprawiają, że kontakt cewek należących do dwóch różnych faz jest minimalny [12] i zmniejsza się ryzyko zwarć. Do wad uzwojeń ułamkowych zaliczyć można niestandardową konstrukcję, a tym samym większe koszty wykonania (seryjnie wytwarzane są przeważnie silniki z uzwojeniem całkowitym). Przede wszystkim uzwojenia takie wprowadzają niesymetryczny rozkład gęstości pola magnetycznego w szczelinie maszyny, co w konsekwencji przyczynia się do powstawania drgań mechanicznych obniżających żywotność silnika oraz hałasu.

Wielofazowe uzwojenia maszyn elektrycznych mogą być wykonywane w różnych wariantach, a jedną z ich najważniejszych cech jest symetria. W ogólności wyróżnić można uzwojenia: symetryczne, względnie symetryczne oraz niesymetryczne. Przeważnie zalecane jest wykonywanie uzwojeń symetrycznych. Symetria uzwojenia m -fazowego polega na spełnieniu dla każdej harmonicznej dwóch cech symetrii [6,7,13]:

- symetrii amplitudowej – wartości bezwzględne SEM kolejnych wektorów fazowych powinny być jednakowe,
- symetrii kątowej – poszczególne kąty między wektorami SEM (kąty między poszczególnymi wektorami gwiazdy napięć żłobkowych) powinny być jednakowe dla kolejnych uzwojeń fazowych.

Uzwojenie całkowite jest stosunkowo proste w konstruowaniu. Pod każdym biegunem maszyny znajdują się grupy złożone z q zezwojów należących do danej fazy. Tak więc w uzwojeniu całkowitym m -fazowym, każdy biegun tego uzwojenia utworzony jest przez boki zezwojów zajmujące $m \cdot q$ kolejnych żłobków. Pod kolejnymi biegunami sytuacja powtarza się, z zachowaniem przeciwnego kierunku włączenia (nawinięcia) zezwojów. W przypadku uzwojeń ułamkowych sytuacja się komplikuje. Na rys. 3 przedstawiono algorytm ułatwiający równomierne rozłożenie faz w żłobkach stojana [13]. Szczegółowy opis algorytmu zawarto w [14].

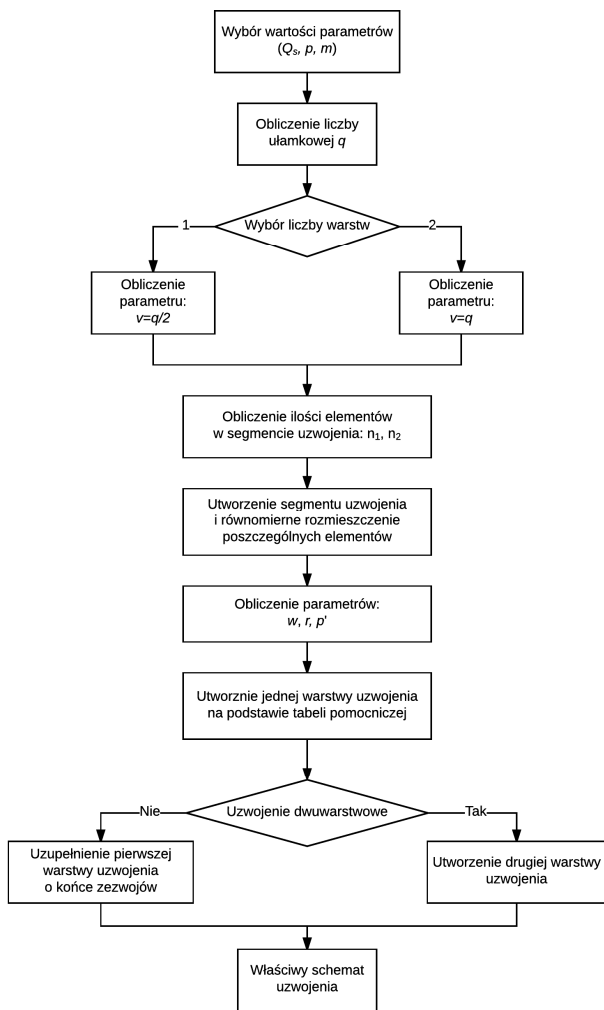
3. WSPÓŁCZYNNIK UZWOJENIA

Współczynnik uzwojenia maszyny elektrycznej służy do oceny poprawności zaprojektowanego uzwojenia. Wyznaczany jest dla kolejnych harmonicznych, a jego wartość dla harmonicznej podstawowej powinna być jak największa.

Współczynnik uzwojenia dla v -tej harmonicznej obliczany jest najczęściej jako iloczyn trzech składników według poniższego wzoru:

$$k_w(v) = k_p(v)k_d(v)k_s(v), \quad (5)$$

gdzie: k_w – współczynnik uzwojenia, k_p – współczynnik skrótu, k_d współczynnik grupy, k_s – współczynnik skosu, v – rząd harmonicznej.



Rys. 3. Algorytm rozmieszczania faz w żłobkach stojana

W niektórych pozycjach literatury przedstawiane są współczynniki uzwojenia dla konkretnej liczby ułamkowej q , np. w publikacji [12] zestawione są analityczne zależności dla uzwojeń o $q = 0,5$ czy $q = 0,25$.

W artykule zastosowano metodę obliczania współczynnika uzwojenia w funkcji harmonicznych w oparciu o gwiazdę napięć żłobkowych (rys. 4) [15,16].

Na podstawie gwiazdy napięć dla każdej fazy tworzona jest specjalna macierz S zawierająca indeksy żłobków, w których znajdują się cewki uzwojenia wybranej fazy. Numery żłobków, w których leżą końce uzwojeń, zapisano w macierzy S ze znakiem minus. Przykładowa macierz S dla fazy a , przedstawionej na rys. 4, ma postać $S = [1 \ 6 \ -7 \ -12]$. Poszczególne wektory napięć można obliczyć jako:

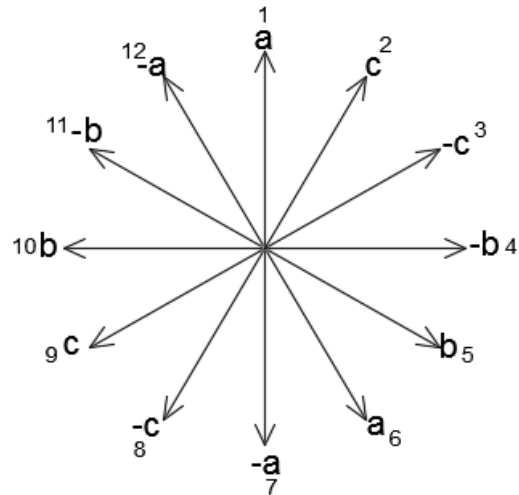
$$\vec{E}_{iv} = \text{sign}(S_i) e^{\frac{j\pi |S_i| v}{Q_s}}. \quad (6)$$

Całkowitą wartość współczynnika uzwojenia dla v -tej harmonicznej uzyskuje się uśredniając geometryczną sumę wszystkich wektorów zgodnie z zależnością:

$$k_w(v) = \frac{1}{n_w} \left| \sum_{i=1}^{n_w} \vec{E}_{iv} \right|, \quad (7)$$

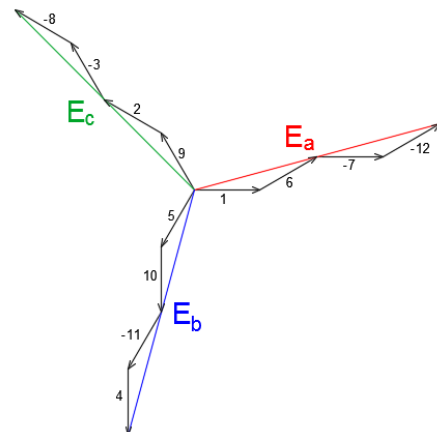
$$n_w = n_l \frac{Q_s}{m}, \quad (8)$$

gdzie: n_w – liczba wektorów jednej fazy, n_l – liczba warstw uzwojenia.



Rys. 4. Gwiazda napięć żłobkowych dla uzwojenia trójfazowego o parametrach: $Q_s=12$ i $p=5$

Graficzną interpretację współczynnika uzwojenia przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Wykres fazorowy do wyznaczenia współczynnika uzwojenia trójfazowego o parametrach: $Q_s=12$ i $p=5$

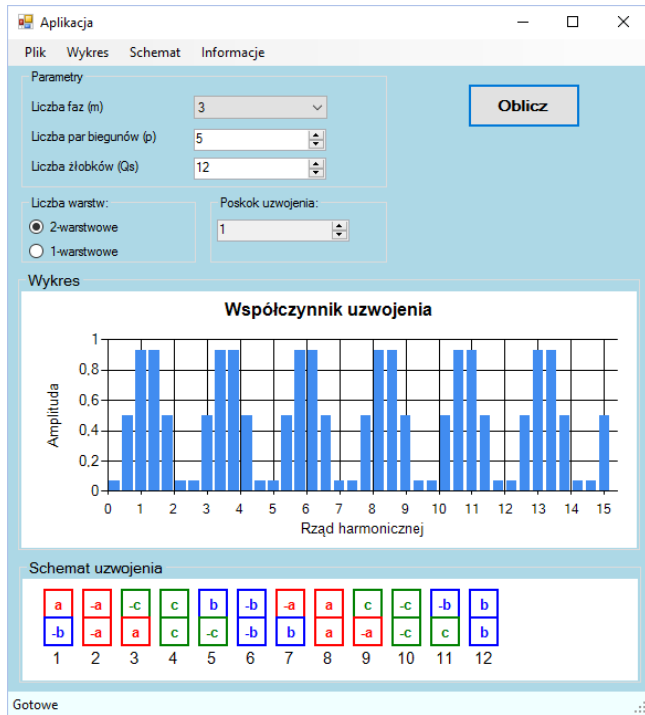
Powyższy sposób obliczania współczynnika uzwojenia jest sposobem uniwersalnym. Pozwala na obliczanie współczynnika uzwojenia o dowolnej konfiguracji, zarówno dla uzwojeń jedno- jak i dwuwarstwowych. W obliczeniach nie uwzględniany jest skos stojana.

3. PROGRAM DO PROJEKTOWANIA UZWOJEŃ UŁAMKOWO- ŻŁOBKOWYCH

Wykonano aplikację komputerową wspomagającą proces projektowania uzwojeń maszyn elektrycznych, w szczególności uzwojeń koncentrycznych ułamkowo-żłobkowych. Dwie podstawowe funkcje programu to symetryczne rozmieszczenia faz uzwojenia w żłobkach stojana oraz obliczenie współczynnika uzwojenia

dla kolejnych harmonicznych. Program działa w oparciu o algorytm przedstawiony na rys. 3. Aplikacja wykonana została w środowisku Microsoft Visual Studio z wykorzystaniem języka zarządzanego C# oraz technologii Windows Forms.

Aplikacja składa się z jednej głównej formy (*Form1*), w której wyświetlane są wszystkie parametry uzwojenia oraz wyniki obliczeń. Widok okna programu przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Widok okna głównego aplikacji do projektowania uzwojeń

Dla zadanych parametrów uzwojenia (liczby par biegunów, liczby żłobków) obliczane są wartości współczynnika uzwojenia i przedstawione w formie wykresu słupkowego. Program umożliwia zapisanie wartości współczynnika uzwojenia jako bitmapa lub jako plik tekstowy. Pomocne przy projektowaniu schematu uzwojenia jest przedstawienie rozmieszczenia faz w żłobkach (rys. 6).

4. ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI UZWOJEŃ KONCENTRYCZNYCH UŁAMKOWO-ŻŁOBKOWYCH

W celu weryfikacji poprawności działania opracowanej aplikacji komputerowej wykorzystano program FEMM do obliczeń rozkładu pola magnetycznego metodą elementów skończonych [17].

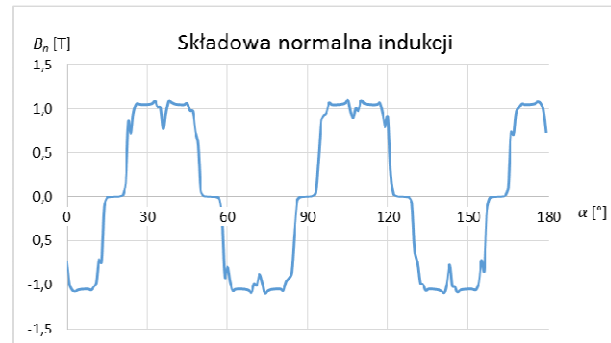
W programie FEMM wykonano model numeryczny bezszczotkowej maszyny prądu przemiennego z magnesami trwałymi montowanymi powierzchniowo na wirniku o liczbie par biegunów $p = 5$ oraz liczbie żłobków stojana $Q_s = 30$.

W wyniku analizy w programie FEMM obliczono rozkład składowej normalnej indukcji w szczelinie powietrznej (rys. 7) oraz przebieg strumienia sprzężonego z poszczególnymi fazami uzwojenia (rys. 8).

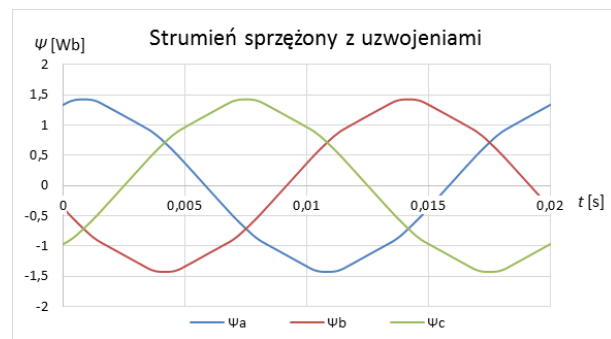
Przebieg strumienia posłuży do obliczenia przebiegu napięcia indukowanego rotacji (rys. 9) zgodnie z zależnością:

$$e(t) = -\frac{d\psi(\alpha)}{dt} = -\frac{d\alpha}{dt} \frac{d\psi(\alpha)}{d\alpha} = \omega_m \frac{d\psi(\alpha)}{d\alpha}, \quad (9)$$

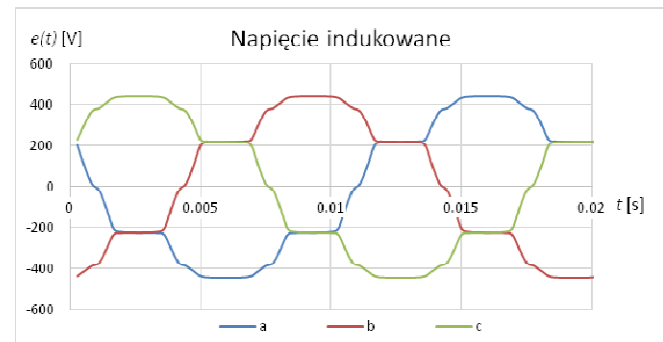
gdzie: α [rad] – kąt obrotu wirnika, ω_m [rad/s] – prędkość kątowa wirnika.



Rys. 7. Składowa normalna indukcja magnetycznej w szczelinie powietrznej maszyny bezszczotkowej z magnesami trwałymi



Rys. 8. Przebieg strumienia sprzężonego z poszczególnymi fazami uzwojenia maszyny bezszczotkowej z magnesami trwałymi



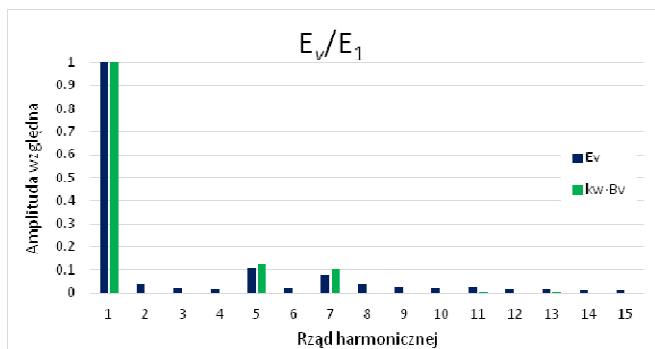
Rys. 9. Przebieg napięcia indukowanego w poszczególnych fazach uzwojenia maszyny bezszczotkowej z magnesami trwałymi

Następnie wyznaczono wartości składowych harmonicznych przebiegu napięcia indukowanego i porównano je z iloczynem harmonicznych rozkładu indukcji i współczynnika uzwojenia (rys. 10):

$$\frac{E_v}{E_1} = \frac{B_v \cdot k_{wv}}{B_1 \cdot k_{w1}}, \quad (9)$$

gdzie: E_v - wartość amplitudy v -tej harmonicznej napięcia, B_v - wartość amplitudy v -tej harmonicznej rozkładu indukcji, k_{wv} - wartość współczynnika uzwojenia v -tej harmonicznej.

Wyniki porównania przedstawione na rys. 10 uznano za satysfakcjonujące i dowodzące poprawności działania opracowanego programu.



Rys. 10. Porównanie wartości harmonicznych przebiegu napięcia oraz iloczynu współczynnika uzwojenia i rozkładu indukcji

Opracowana aplikacja została wykorzystana do obliczenia współczynników uzwojeń i analizy właściwości uzwojeń koncentrycznych ułankowo-żłobkowych o różnych parametrach.

W tabeli 1. zestawiono wartości współczynnika uzwojenia dla podstawowej harmonicznej uzwojenia o rozpiętości $y = 1$. Należy zauważyć, że największa wartość współczynnika uzwojenia dla pierwszej harmonicznej występuje, gdy liczba żłobków stojana zbliżona jest do liczby biegunów ($Q_s \cong 2p$). Najlepsze zatem właściwości wśród koncentrycznych uzwojeń ułankowo-żłobkowych wykazują uzwojenia o liczbie żłobków na biegun i fazę $q \cong 1/m$ (gdzie: m – liczba faz).

Tabela 1. Wartość współczynnika uzwojenia dla podstawowej harmonicznej k_{w1}

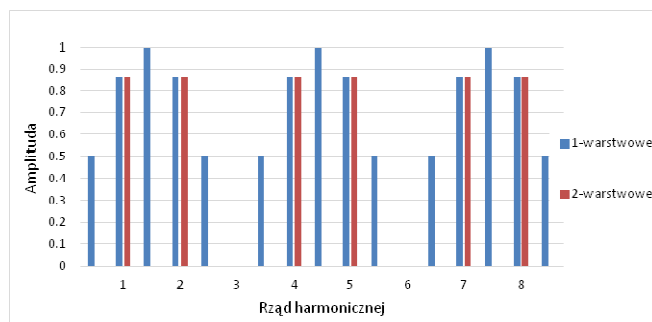
Q_s	Liczba faz $m=3$		Q_s	Liczba faz $m=5$	
	$p=5$	$p=8$		$p=7$	$p=12$
6	0,500	0,866	10	0,809	0,588
9	0,945	0,328	15	0,980	0,588
12	0,933	0,866	20	0,880	0,951
15	0,866	0,951	25	0,758	0,983
18	0,735	0,945	30	0,659	0,951
21	0,650	0,831	35	0,588	0,832
24	0,583	0,866	40	0,514	0,832

Uzwojenia jednowarstwowe zazwyczaj charakteryzują się większą wartością współczynnika uzwojenia dla harmonicznej podstawowej w porównaniu do uzwojeń dwuwarstwowych (tabela 2). Jednocześnie uzwojenia jednowarstwowe charakteryzują się większą zawartością wyższych harmonicznych (rys. 11).

Tabela 2. Porównanie wartości współczynnika k_{w1} dla wybranych uzwojeń jedno- i dwuwarstwowych

Q_s/p	uzw. 1-warstw.	uzw. 2-warstw.
12/5	0,966	0,933
12/8	0,866	0,866
18/5	0,735	0,735
24/5	0,588	0,583
24/7	0,766	0,760
24/10	0,966	0,933

Wybór liczby warstw uzwojenia, powinien być kompromisem pomiędzy wartością współczynnika uzwojenia dla podstawowej harmonicznej a zawartością wyższych harmonicznych.



Rys. 11. Wartości współczynnika uzwojenia w funkcji harmonicznych dla uzwojenia jedno i dwuwarstwowego o liczbie żłobków $Q_s = 24$ i liczbie par biegunów $p = 8$

5. WNIOSKI KOŃCOWE

W artykule przedstawiono analizę właściwości uzwojeń koncentrycznych ułankowo-żłobkowych. Maszyny z takimi uzwojeniami charakteryzują się stosunkowo dużą zawartością wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia indukowanego. Poprawny dobór parametrów uzwojenia jest istotny z punktu widzenia jakości generowanego napięcia w prądnicach wolnoobrotowych i ograniczenia tętnień momentu zaczepowego. Na potrzeby badań symulacyjnych opracowano aplikację komputerową wspomagającą projektowanie uzwojeń koncentrycznych ułankowo-żłobkowych. Poprawność jej działania zweryfikowano porównując wyniki obliczeń z analizą rozkładu pola magnetycznego wybranej konstrukcji maszyny elektrycznej w programie FEMM.

6. BIBLIOGRAFIA

- Bailey J., McKeever J.: Fractional-Slot Surface Mounted PM Motors with Concentrated Windings for HEV Traction Drives. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Październik-2005.
- Libert F.: Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer, Royal Institute of Technology Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, Sztokholm, 2004.
- Lampola P.: Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications, Helsinki University of Technology, Helsinki, 2000.
- Huang S., Luo J., Leonardi F., Lipo T. A.: A general approach to sizing and power density equations for comparison of electrical machines. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 34, no. 1, pp. 92-97, Jan/Feb 1998.
- Honsinger V. B.: Sizing Equations for Electrical Machinery. IEEE Power Engineering Review, vol. PER-7, no. 3, pp. 39-40, March 1987.
- Pyrhonen J., Jokinen T., Hrabovcova V.: Design of Rotating Electrical Machines. Wiley, 2008
- Dąbrowski M.: Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego, 2. wyd. Warszawa: WNT, 1994

8. Zembrzuski J.: Atlas uzwojeń silników indukcyjnych, 8. wyd. Warszawa: WNT, 1991.
9. Dąbrowski M.: Konstrukcja maszyn elektrycznych. Warszawa: WNT, 1965.
10. Ishak D., Zhu Z. Q., Howe D.: Comparison of PM brushless motors, having either all teeth or alternate teeth wound, IEEE Trans. Energy Convers., t. 21, nr 1, ss. 95–103, mar. 2006.
11. Cros J., Viarouge P.: Synthesis of high performance PM motors with concentrated windings. IEEE Trans. Energy Convers., t. 17, nr 2, ss. 248–253, cze. 2002.
12. Salminen P.: Fractional Slot PMSM Motor for Low Speed Applications. Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, 2004.
13. Wach P.: Uzwojenia ułamkowe maszyn elektrycznych prądu przemiennego. Warszawa: PWN, 1997.
14. Właszyłowicz J.: Właściwości uzwojeń koncentrycznych ułamkowo-żłobkowych stosowanych w maszynach bezszczotkowych z magnesami trwałymi. Politechnika Gdańska, Gdańsk 2016.
15. Meier F.: Permanent-Magnet Synchronous Machines with Non-Overlapping Concentrated Windings for Low-Speed Direct-Drive Applications, Royal Institute of Technology, Sztokholm, 2008.
16. Libert F., Soulard J.: Investigation on Pole-Slot Combinations for Permanent-Magnet Machines with Concentrated Windings, ResearchGate, sty. 2004.
17. Finite Element Method Magnetics: HomePage”. www.femm.info/wiki/HomePage. 24-lip-2016.

PROPERTIES OF THE FRACTIONAL SLOT CONCENTRATED WINDINGS

The paper presents results of the analysis of the fractional slot concentrated windings properties. The values of the fundamental winding coefficient and the content of higher harmonics has been compared. The special application was developed to assist in the winding design process. The calculation of the winding coefficient was based on the voltage star diagram. In order to verify the results the numerical model of the PMSM was prepared in the FEMM and the magnetic field distribution was calculated. The proper design of the winding is one of the essential conditions for the quality of the induced voltage (generator) and reduce the torque ripple (motor).

Keywords: fractional slot concentrated windings, permanent magnet, brushless machine.