

Wojciech Burlikowski
Politechnika Śląska, Gliwice

DOBÓR PARAMETRÓW KONSTRUKCYJNYCH MODUŁU WIBRACYJNEGO RELUKTANCYJNEGO WZBUDNIKA DRGAŃ HARMONICZNYCH SKRĘTNYCH

DESIGN PARAMETER SELECTION FOR VIBRATION MODULE OF RELUCTANCE TORSIONAL VIBRATION EXCITER

Abstract: In the paper selection of basic design parameters for vibration module using reluctance motor is presented. The module is a part of torsional vibration exciter which is a device enabling measurement evaluation of properties of complex drive systems in steady state conditions (e.g. eigenfrequencies). The goal of the design process is decrease of angle harmonics in electromagnetic torque, in particular slot harmonics. Analysis is based on analytical approach using Fourier series method applied to results obtained with the help of 2D Finite Element Method. The most important design alteration resulting from obtained results is the step skew of the rotor core, which enables compensation of chosen torque harmonics. The other result of research is introduction of magnetic wedges in stator slots. Resulting torque – angle characteristic is very smooth and should enable easier control of torque which is the basic requirement for the designed vibration exciter.

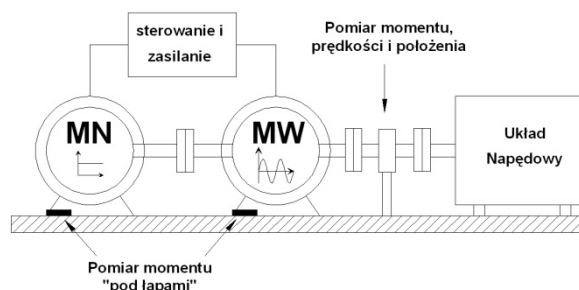
1. Wstęp

Badania własności dynamicznych złożonych układów napędowych wymagają wykorzystania odpowiednich metod pomiarowych pozwalających na wyznaczenie związanych z nimi parametrów, w szczególności częstotliwości drgań własnych. Najpopularniejszą wśród nich jest wykorzystanie analizy częstotliwościowej, polegającej na poddaniu układu działaniu zewnętrznego momentu o regulowanych parametrach (częstotliwość, amplituda) i badaniu jego odpowiedzi w stanie ustalonym lub quasi-ustalonym [8, 14]. Zastosowanie w roli źródła momentu, typowego silnika elektrycznego (indukcyjny, synchroniczny) zasilanego z układów energoelektronicznych, nie zapewnia regulacji chwilowej wartości momentu elektromagnetycznego w stanie ustalonym ze względu na istnienie składowych momentu, które nie są uwzględniane przez wykorzystywane w tych układach regulacji modele silników. Jest to związane m.in. z efektami pasożytniczymi w silnikach indukcyjnych oraz istnieniem momentów zaczepowych w silnikach z magnesami trwałymi. Ich wpływ jest traktowany jako zaburzenie wpływające na jakość regulacji położenia lub prędkości. Sprzężenie zwrotne wykorzystywane w tego typu napędach pozwala zminimalizować błąd (uchyby) wielkości regulowanej (prędkość, położenie). Dzieje się to kosztem chwilowych zmian wartości momentu elektromagnetycznego. Nie jest natomiast moż-

liwe bezpośrednio wykorzystanie wartości mierzonej momentu i jej porównanie z wartością zadaną gdyż jego pomiar jest obciążony dużym błędem ze względu m.in. na rezonanse występujące w układzie napędowym.

2. Geneza projektu

Idea budowy wzбудnika drgań z wykorzystaniem silnika reluktancyjnego stanowi kontynuację wcześniejszych prac prowadzonych w Katedrze Mechatroniki Politechniki Śląskiej [3]. Wiązały się one z analizą zjawisk pasożytniczych w maszynach elektrycznych, zarówno indukcyjnych [14] jak i reluktancyjnych [7, 11, 12]. Na bazie tych doświadczeń zaproponowano modułową strukturę wzbudnika (rys. 1), tworzoną przez:



Rys. 1. Schemat ideowy projektowanego układu pomiarowego z modułowym wzbudnikiem drgań

- **moduł napędowy MN** – zapewniający stabilizację prędkości obrotowej układu,

- **moduł wibracyjny MW** - zapewniający generację składowej przemiennej momentu.

3. Założenia projektu

W artykule zostanie przedstawiona analiza koniecznych zmian konstrukcyjnych, których zastosowanie pozwoli wykorzystać tradycyjną maszynę reluktancyjną (rys. 2) jako moduł wibracyjny. Podstawowym celem projektu jest minimalizacja pulsacji momentu elektromagnetycznego związanych z obustronnym żłbkowaniem rdzenia silnika. W ramach prac projektowych przyjęto następujące założenia dla konstrukcji modułu wibracyjnego:

- wykorzystanie standardowego stojana silnika z możliwością wprowadzenia klinów magnetycznych [15],
- wykorzystanie klasycznej konstrukcji rdzenia wirnika z możliwością wprowadzenia jego podziału na segmenty o odpowiednio zmienionym położeniu kątowym (rys. 11).

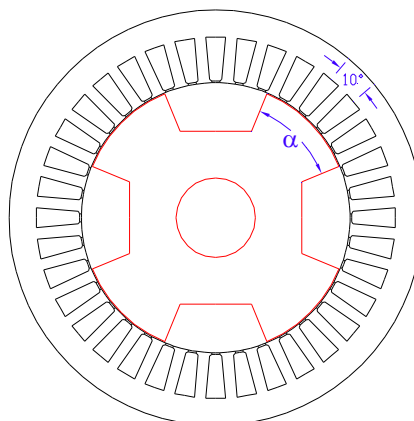
Jako podstawę do wykonania modułu wibracyjnego przyjęto silnik RSg 80-4B produkowany przez firmę BESEL. Jego podstawowe dane istotne z punktu widzenia konstrukcji wzbudnika są następujące:

- prąd znamionowy $I_n = 2.2$ [A],
- liczba par biegunów $2p_b = 4$,
- liczba żłbków stojana $Q_s = 36$,
- liczba biegunów wirnika $Q_r = 4$,
- długość pakietu blach wirnika 72 [mm],
- liczba zwojów w żłbku 90,
- szczelina powietrzna 0.25 [mm].

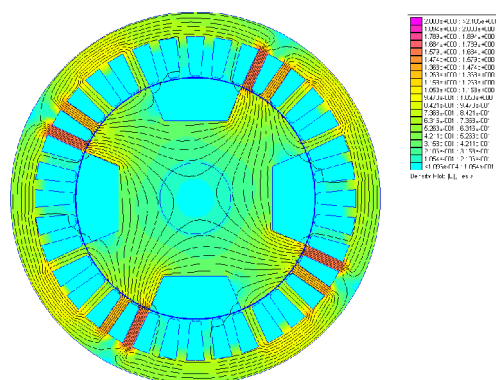
Najistotniejszą zmianą w stosunku do konstrukcji wyjściowej jest zastąpienie wirnika z klatką rozruchową przez wirnik jawnobiegunowy, przedstawiony na rysunkach 2 i 3.



Rys. 2. Stojan i wirnik silnika reluktancyjnego



Rys. 3. Wykroje blach silnika reluktancyjnego



Rys. 4. Rozkład pola dla $\alpha = 45$ deg (FEMM)

W celu określenia wpływu konstrukcji wirnika na przebieg momentu elektromagnetycznego przeanalizowano wprowadzenie następujących zmian konstrukcyjnych (rys. 3):

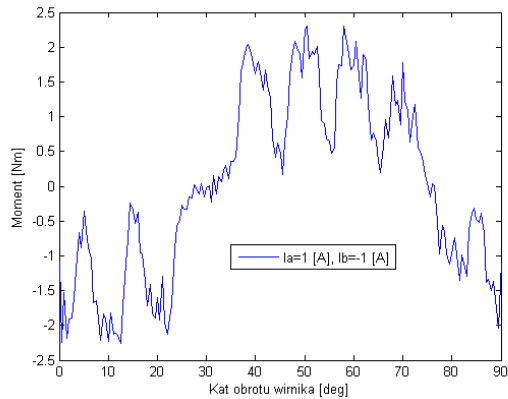
- szerokości kątowej bieguna α wirnika,
- wprowadzenia klinów magnetycznych w żłbkach stojana [15],
- podział rdzenia wirnika na przesunięte względem siebie segmenty (rys. 11).
- skrót uzwojenia stojana.

Obliczenia przebiegu momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika przy stałej wartości przepływu uzwojeń [1], przeprowadzono metodą elementów skończonych, w oparciu o analizę FOURIERA (rys. 5). Zastosowanie analizy harmonicznej jest związane z istnieniem różnego typu harmonicznych w momencie elektromagnetycznym. Są one związane z istnieniem wyższych harmonicznych przestrzennych przepływu uzwojeń stojana oraz permeancji szczeliny powietrznej [12]. Dla ułatwienia weryfikacji pomiarowej wybrano zasilanie 2 faz [4].

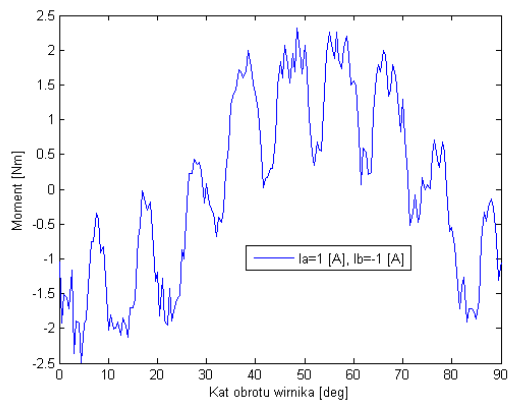
4. Wyniki obliczeń

4.1. Szerokość kątowna bieguna α

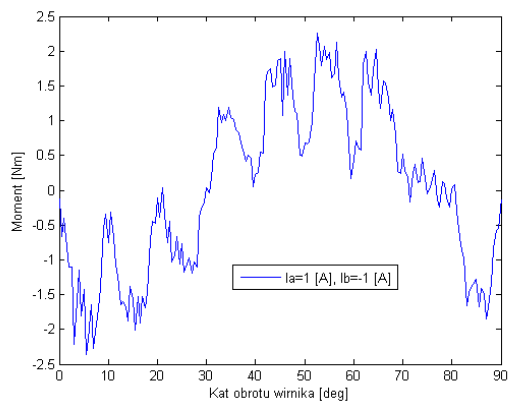
Obliczenia momentu elektromagnetycznego wykonano dla zakresu $\alpha \in (40-50)$ deg. Wyniki obliczeń w funkcji kąta obrotu wirnika dla $\alpha = 40, 45$ i 50 deg przedstawiono na rysunku 5. Analiza harmoniczna otrzymanych rezultatów została przedstawiona na rysunku 6.



a) $\alpha = 40$ deg

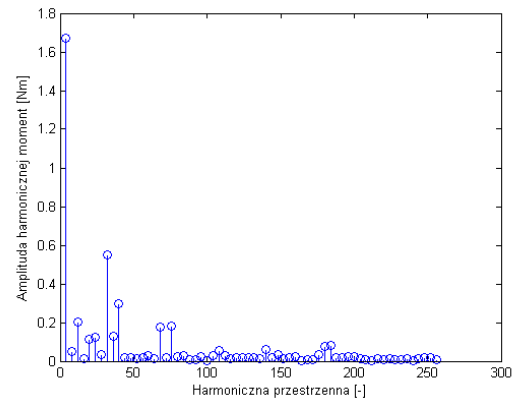


b) $\alpha = 45$ deg

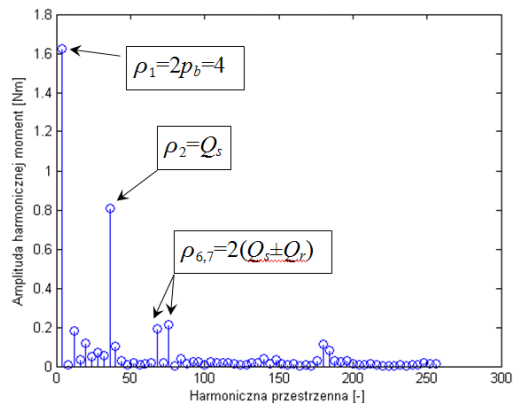


c) $\alpha = 50$ deg

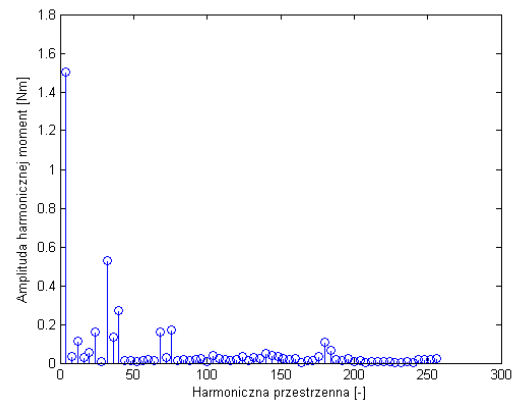
Rys. 5. Przebieg momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika



a) $\alpha = 40$ deg



b) $\alpha = 45$ deg



c) $\alpha = 50$ deg

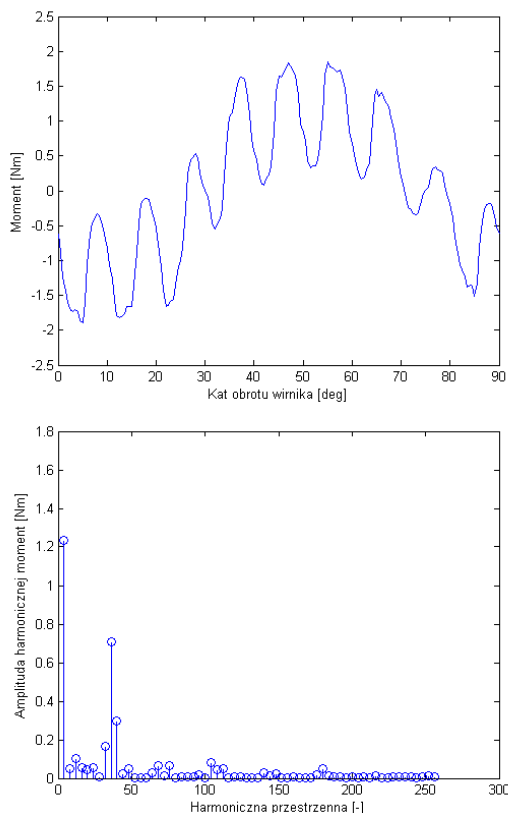
Rys. 6. Rozkład harmoniczny charakterystyki kątowej momentu elektromagnetycznego

Otrzymane wyniki prowadzą do wniosków zgodnych z modelami analitycznymi [12]. Decydujący wpływ na przebieg kątowy momentu posiadają harmoniczne przestrzenne o rządach:

- $\rho_1 = 2p_b = 4$ – odpowiadająca podstawowej harmonicznej momentu reluktancyjnego,
- $\rho_2 = Q_s$ – odpowiadająca podstawowej harmonicznej żłbkowej momentu reluktancyjnego,

- $\rho_{3,4} = Q_s \pm Q_r$ – odpowiadające podstawowemu harmonicznemu różnicowemu momentu reluktancyjnego,
- $\rho_5 = 2Q_s$ – odpowiadająca drugiej harmonicznej żłbkowej momentu reluktancyjnego,
- $\rho_{6,7} = 2(Q_s \pm Q_r)$ – odpowiadające harmonicznemu różnicowemu momentu reluktancyjnego drugiego rzędu.

W wynikach na rysunku 5 pojawiają się dość silne zaburzenia wynikające z trudności wyznaczenia momentu elektromagnetycznego w oparciu o rozwiązanie połowe [5]. Z tego względu dokonano oceny otrzymanych wyników bazując na obliczeniach strumienia sprzężonego i indukcyjności zasilanych uzwojeń, które w tym przypadku możemy traktować jako pojedyncze uzwojenie złożone z szeregowo połączonych uzwojeń fazy A, B (rys. 7) [10].



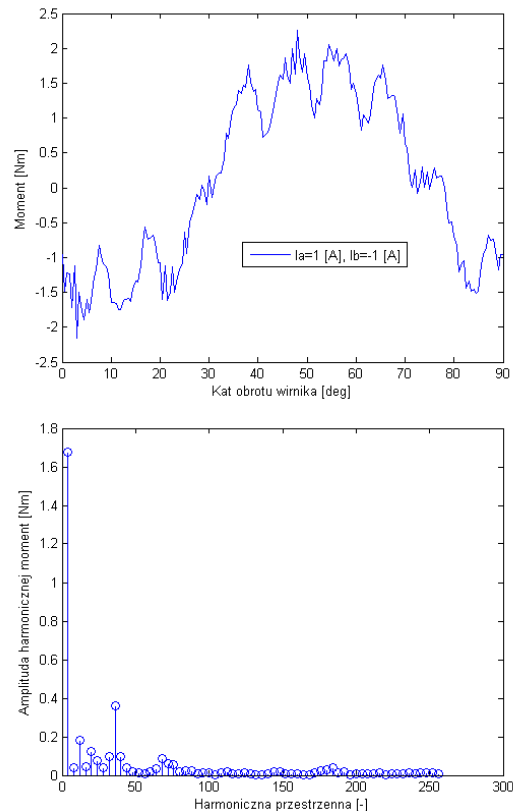
Rys. 7. Moment elektromagnetyczny oraz jego rozkład harmoniczny wyznaczone na podstawie indukcyjności uzwojeń ($\alpha = 45 \text{ deg}$)

Otrzymane wyniki są jakościowo zgodne, niezależnie od tego czy otrzymano je na podstawie obliczeń momentu elektromagnetycznego czy też strumienia sprzężonego (przy założeniu liniowości obwodu magnetycznego). W dalszych

rozważaniach ograniczono się do analizy przypadku $\alpha = 45 \text{ deg}$.

4.2. Kliny magnetyczne

Słumienie harmonicznych żłbkowych w momencie elektromagnetycznym można osiągnąć przez wprowadzenie klinów magnetycznych w żłbkach stojana [15]. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 8. W przypadku przenikalności magnetycznej relatywnej klinów o wartości $\mu_r = 10$ pozwala to ograniczyć harmoniczną żłbkową $\rho_2 = Q_s$ o połowę i w jeszcze większym stopniu harmoniczne żłbkowe i różnicowe wyższych rzędów dzięki zmniejszeniu amplitud generujących je harmonicznych pola magnetycznego (rys. 8).



Rys. 8. Moment elektromagnetyczny oraz jego rozkład harmoniczny po wprowadzeniu klinów magnetycznych w stojanie ($\mu_r = 10$)

4.3. Podział wirnika na segmenty

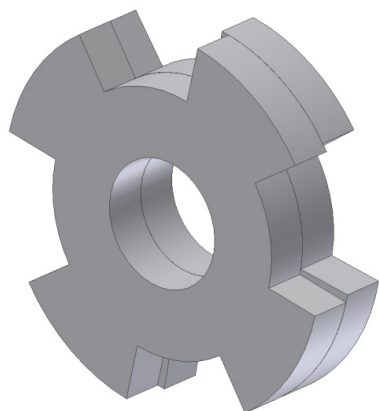
Całkowitą eliminację wybranych wyższych harmonicznych przestrzennych w momencie elektromagnetycznym można osiągnąć przez podział wirnika na segmenty przesunięte o odpowiednio dobrane kąty. Rozwiązanie to jest używane zarówno w silnikach z magnesami trwałymi dla eliminacji momentu zaczepowego [13] jak i w silnikach indukcyjnych dla elimi-

nacji momentów pasożytniczych [6]. Pozwala to na eliminację kątowych składowych harmonicznych momentu wypadkowego poprzez ich wzajemne skompensowanie polegające na przesunięciu o połowę okresu charakterystyki kątowej danej składowej momentu [1]. W analizowanym przypadku do kompensacji wybrano harmoniczne żłobkowe: podstawową oraz drugą, czyli harmoniczne o rzędach $\rho_2 = Q_s$ oraz $\rho_5 = 2Q_s$. Przesunięcie o połowę okresu charakterystyki kątowej wymaga odpowiednio:

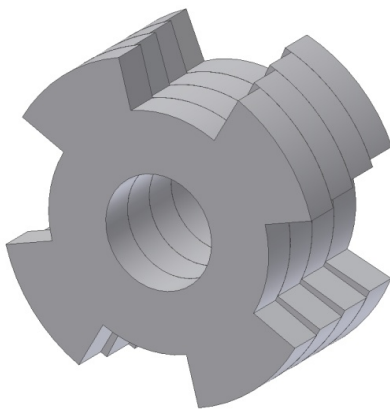
- skręcenia segmentów o kąt 5 deg dla stłumienia harmonicznej rzędu $\rho_2 = Q_s$,
- skręcenia segmentów o kąt 2,5 deg dla stłumienia harmonicznej rzędu $\rho_5 = 2Q_s$.

Równoczesne spełnienie powyższych wymagań wymaga:

- utworzenia segmentu blach wirnika złożonego z 2 elementarnych pakietów przesuniętych o 2,5 deg, (rys. 9),
- złożenie dwóch segmentów przesuniętych o 5 deg (rys. 10).

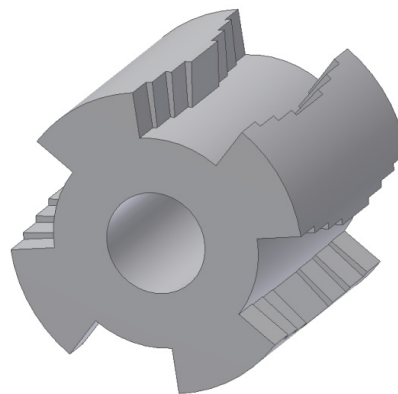


Rys. 9. Segment wirnika tworzony przez dwa elementarne pakiety blach



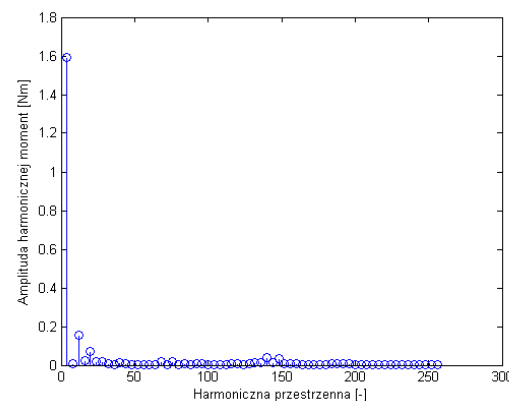
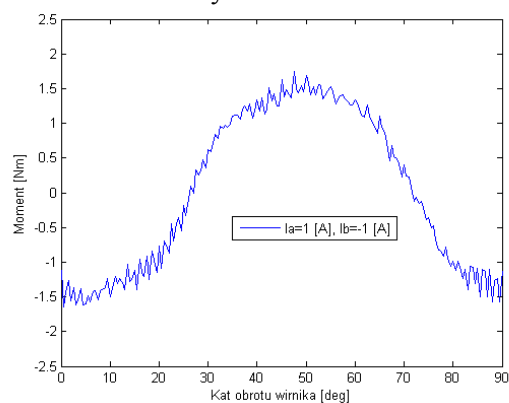
Rys. 10. Segment wirnika tworzony przez cztery elementarne pakiety blach

Ze względu na możliwość pojawienia się sił osiowych wywołanych niesymetrią naciągu magnetycznego wskazane jest wykonanie pakietu blach wirnika w postaci przedstawionej na rysunku 11 [4]. Stanowi ono złożenie konstrukcji z rysunku 10 z jego odbiciem lustrzanym.



Rys. 11. Ostateczny kształt rdzenia wirnika

Wynikowy przebieg charakterystyki kątowej momentu elektromagnetycznego wynikający z jednoczesnego wprowadzenia klinów magnetycznych oraz segmentowej konstrukcji wirnika przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Moment elektromagnetyczny oraz jego rozkład harmoniczny po wprowadzeniu klinów ($\mu_r = 10$) i zastosowaniu segmentowej konstrukcji wirnika

Wyniki uzyskano sumując wielkości otrzymane na podstawie obliczeń dwuwymiarowych. W otrzymanych przebiegach istnieją składniki związane z harmonicznymi przepływu o rzędach $v = 5p_b$, $v = 7p_b$. Możliwość ich redukcji z wykorzystaniem skrótu uzwojenia stojana zostanie przedstawiona w trakcie konferencji.

5. Wnioski

Otrzymane wyniki wskazują na możliwość konstrukcji modułu wibracyjnego wzbudnika drgań skrętnych z wykorzystaniem tradycyjnego silnika reluktancyjnego po wprowadzeniu pewnych zmian projektowych. Dotyczą one wprowadzenia klinów magnetycznych w stojanie oraz dokonania podziału pakietu blach wirnika na wzajemnie przesunięte względem siebie segmenty. Zmiany te pozwalają na eliminację wyższych harmonicznymi przestrzennych momentu elektromagnetycznego, w szczególności związanych z żłobkowaniem rdzenia stojana, dzięki czemu ułatwią sterowanie wartością chwilową momentu elektromagnetycznego. Ze względu na planowany zakres częstotliwości momentu przemiennego generowanego przez moduł wibracyjny (0-1000) [Hz] konieczne jest zapewnienie zasilania wzbudnika w zakresie (0-500) [Hz]. Związane są z tym dodatkowe wymogi wynikające ze stratności blach oraz wartości napięcia zasilania wzbudnika dla tego zakresu częstotliwości, których dokładna analiza zostanie przedstawiona w dalszych pracach. Konieczne jest m.in. wykorzystanie do budowy pakietów stojana i wirnika blach o grubości 0,2 [mm] oraz zmniejszenie liczby zwojów uzwojenia stojana dla zmniejszenia jego impedancji wejściowej [4].

6. Literatura

[1] Bianchi N., Bolognani S., Bon D., Dai Pr'e M.: *Torque Harmonic Compensation in a Synchronous Reluctance Motor*, IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 23, NO. 2, JUNE 2008, pp. 466-473

[2] Boldea I.: *Reluctance Synchronous Machines & Drives*, Oxford Univ Press, 1996

[3] Burlikowski W., Kielan P., Kluszczyński K., Kowol P., Pilch Z., Trawiński T.: *Koncepcja elektromagnetycznego, reluktancyjnego wzbudnika drgań harmonicznymi skrętnych do badania parametrów częstotliwościowych układów napędowych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych PWr, Nr 62, Seria: Studia i Materiały Nr 28, Zagadnienia maszyn, napędów

i pomiarów elektrycznych, Oficyna Wyd. PWr, Wrocław, 2008, ss. 512-519

[4] Dąbrowski M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. W-wa, WNT, 1988

[5] Demenko A.: *Symulacja dynamicznych stanów pracy maszyn elektrycznych w ujęciu polowym*. Poznań, Wyd. Politechniki Poznańskiej, 1997

[6] Kłapyta G., Kluszczyński K.: *Thumienie synchronicznych momentów pasożytniczych w silniku klatkowym z wirnikiem podzielonym na podpakiety. Cz. I Zasada thumienia momentów i model matematyczny silnika*. Proceedings of XLI International Symposium on Electrical Machines, Poland, Opole-Jarnołtówek, 2005, ss. 68-73

[7] Krawczyk D.: *Procedura określania warunków generowania momentów reluktancyjnych w silnikach elektrycznych o obustronnie użłobkowanym obwodzie magnetycznym*. - Zesz. Nauk. PŚI. nr 1640, Elekt. z. 193, 2004, ss. 89-95

[8] Michalczyk J.: *Maszyny wibracyjne – obliczenia dynamiczne, drgania, hałas*. WNT, W-wa, 1995

[9] Miljavec D.: *Finite element method in evaluation of torque ripple in synchronous reluctance motor*, COMPEL, Vol. 17 No. 1/2/3, 1998, pp. 369-373

[10] Sobczyk T.J.: *Metodyczne aspekty modelowania matematycznego maszyn indukcyjnych*. W-wa, WNT, 2004

[11] Spalek D.: *Moment reluktancyjny a permeancyjny - definicje oraz różnice*. Zesz. Nauk. PŚI. nr 1321 Elekt. 1996, z. 149, ss. 137-149

[12] Szymański D.: *Użłobkowanie stojana i wirnika maszyny elektrycznej jako przyczyna odkształcenia pola magnetycznego w szczelinie powietrznej oraz generowania dodatkowych momentów elektromagnetycznych*. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska. Wydział Elektryczny. Gliwice, 2001

[13] Touzhu Li, Slemmon G.: *Reduction of cogging torque in permanent magnet motors*, IEEE Transactions on Magnetics, vol. 24, Issue: 6, Nov. 1988, pp. 2901-2903

[14] Trawiński T., Pilch Z., Burlikowski W., Kluszczyński K.: *Elektromagnetyczny generator drgań skrętnych cz. I – podstawy teoretyczne, koncepcja i możliwości zastosowań*. Wybrane Zagadnienie Elektrotechniki i Elektroniki, WZEE'2004, Rzeszów, 2004

[15] Wardach M.: *Badanie maszyny elektrycznej z magnesami trwałymi i klinami magnetycznymi*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, Nr 77, 2007, wyd. BOBRME Komel, ss. 155-159

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako projekt badawczy N N510 348434

Autor

Dr inż. Wojciech Burlikowski,
e-mail: wojciech.burlikowski@polsl.pl
Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny,
Katedra Mechatroniki,
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice