

Wojciech BURLIKOWSKI, Zbigniew PILCH
Politechnika Śląska, Gliwice

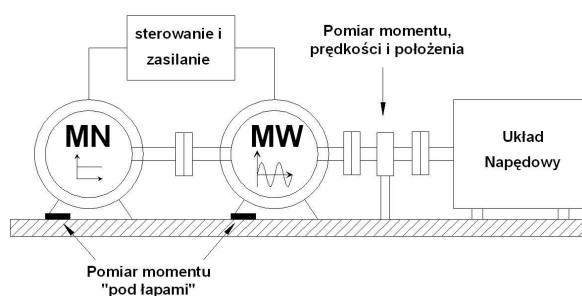
KONSTRUKCJA RELUKTANCYJNEGO WZBUDNIKA DRGAŃ SKRĘTNYCH: ELEMENTY MECHANICZNE, UZWOJENIA I RDZEŃ MAGNETYCZNY

DESIGN OF RELUCTANCE TORSIONAL VIBRATION EXCITER: MECHANICAL COMPONENTS, WINDINGS AND MAGNETIC CORE

Abstract: In the paper the main mechanical, electrical and magnetic components used in torsional vibration exciter design are described. The exciter is a special actuator enabling fatigue test for blocked-rotor conditions and evaluation of properties of complex drive systems in steady state conditions (e.g. eigenfrequencies). The main 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 sinusoidally distributed stator windings. Resulting torque – angle characteristic is very smooth, thus enabling easier control of instantaneous torque (constant and pulsating components) which is the basic requirement for the designed vibration exciter. In order to verify mechanical properties of the design a 3D Finite Element Model was created. It enabled calculation of eigenfrequencies of the rotor, which are much higher than expected maximum operation frequency of the exciter equal to 1 kHz.

1. Wstęp

Wzbudnik drgań harmoniczných skrętných jest specjalnym przetwornikiem elektromechanicznym przeznaczonym do prowadzenia badań zmęczeniowych (przy zatrzymanym wirniku) oraz do wyznaczania parametrów układów napędowych (w stanie ustalonym) [3,8]. Wymaga to skoordynowanego doboru danych określających parametry mechaniczne (m.in. częstotliwości drgań własnych) oraz parametry obwodu elektrycznego i magnetycznego związane z generacją składowych momentu elektromagnetycznego. W przypadku doboru uzwojeń konieczne jest zapewnienie minimalizacji harmoniczných przestrzenných przepływu [6,7] oraz uwzględnienie maksymalnej częstotliwości napięcia zasilania dochodzącej do 500 Hz.



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

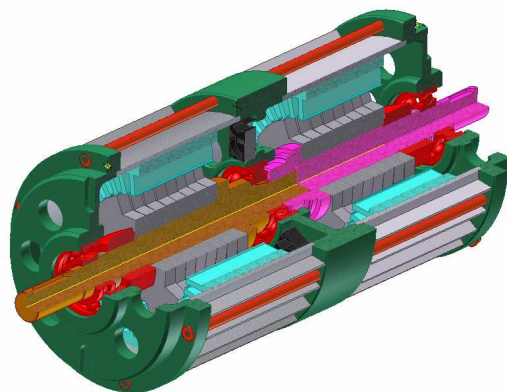
Konstrukcja rdzenia magnetycznego wirnika wymaga z kolei zapewnienia kompensacji harmoniczných żłbkowych momentu [1].

2. Konstrukcja mechaniczna

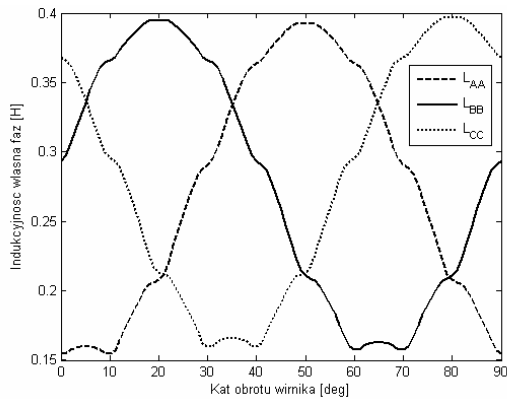
Zgodnie z ideą przedstawianą w poprzednich publikacjach reluktancyjny wzbudnik drgań skrętných (rys.1) składa się z [3,4]:

- **modułu napędowego MN** – zapewniającego stabilizację prędkości obrotowej układu,
- **modułu wibracyjnego MW** - zapewniającego generację składowej przemiennej momentu.

Widok kompletnego wzbudnika z wycięciem fragmentu pozwalającym na przedstawienie jego wewnętrznej struktury przedstawia rys.2.



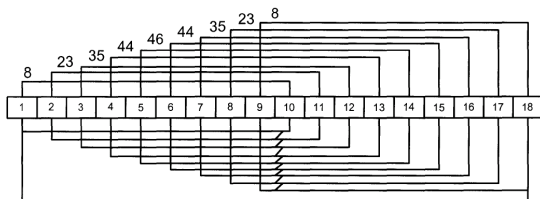
Rys. 2. Wzbudnik reluktancyjny – idea budowy



Rys.5. Charakterystyka katowa indukcyjności własnych uzwojeń fazowych silnika

Zapewnienie odpowiedniego zakresu częstotliwości generowanego momentu wymaga zróżnicowania liczby zwojów w uzwojeniach modułu napędowego i wibracyjnego. Liczba zwojów w kolejnych żłobkach obejmujących boki cewek fazy dla pojedynczego bieguna wyniosła odpowiednio:

- a) **moduł napędowy MN:**
 {8, 23, 35, 44, 46, 44, 35, 23, 8}
- b) **moduł wibracyjny MW**
 {2, 7, 11, 14, 15, 14, 11, 7, 2}

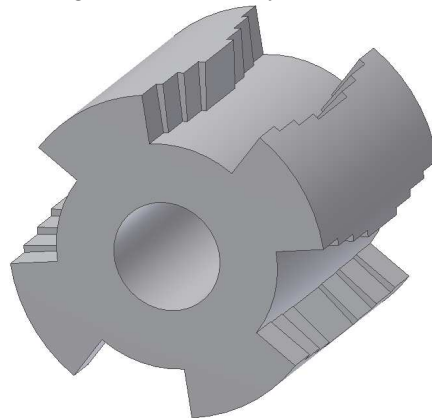


Rys.6. Dane nawojowe dla modułu napędowego RSg 80-4B/PLG 1 (za zgodą FSE BESEL S.A.)

Wartości te otrzymano na podstawie założonej równości liczby zwojów uzwojenia o rozłożeniu sinusoidalnym dla modułu napędowego MN i dla uzwojenia silnika RSg 80-4B obejmującego 90 zwojów na żłobek przy 3 żłobkach na biegun i fazę. W przypadku modułu wibracyjnego wprowadzono redukcję liczby zwojów o czynnik ok. 3 przez nawinięcie uzwojenia równoległe 3 przewodami o identycznym przekroju jak w przypadku modułu napędowego. Spowodowało to ok. 9-krotne zmniejszenie reaktancji i rezystancji uzwojeń. W wyniku tej zmiany napięcie zasilania modułu wibracyjnego przy częstotliwości 500 Hz, koniecznej dla generacji momentu przemiennego o częstotliwości 1000 Hz, nie powinno znacząco przekraczać wartości napięcia w przypadku modułu napędowego (dla 50 Hz).

4. Budowa rdzenia wirnika

Konstrukcja pakietów wirnika została uwarunkowana możliwościami technicznymi. Rozpiętość katowa bieguna wirnika wyniosła ostatecznie 50 deg mimo iż wartość optymalna otrzymana na podstawie obliczeń wynosiła 45 deg [4]. Wynikało to z wykorzystania standardowego wykrojnika przeznaczonego dla silnika indukcyjnego o 28 żłobkach wirnika wykorzystywanego w konstrukcji silnika RSg 80-4B (rys.8,9). Wcześniejsze obliczenia dotyczące kształtu rdzenia wirnika doprowadziły do rozwiązania przedstawionego na rysunku 7 [4]. Rdzeń magnetyczny wirnika składa się z 8 segmentów. Pierwsze cztery są skrócone względem siebie kolejno o kąt dobrany z zakresu 2,5-2,8 deg a pozostałe stanowią ich lustrzane odbicie. Pozwala to zminimalizować wypadkowy wpływ momentów reluktancyjnych związanych z głównymi harmonicznymi żłobkowymi poprzez ich wzajemną kompensację na wale każdego z modułów (rys.10,11) [1].

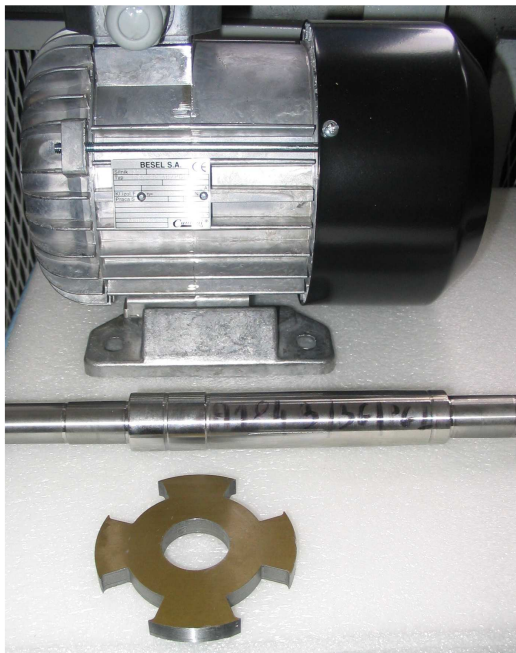


Rys.7. Widok rdzenia magnetycznego wirnika segmentowego

Zmiana w stosunku do wyników przedstawionych uprzednio, dla których segmenty były skracane o 2,5 deg, wynika z rzeczywistego kształtu blachy wirnika (rozdział 5) [4].



Rys.8. Pojedynczy segment rdzenia



Rys. 9. Elementy składowe wzbudnika: stojan, wał oraz pojedynczy segment blach wirnik

5. Wyniki obliczeń

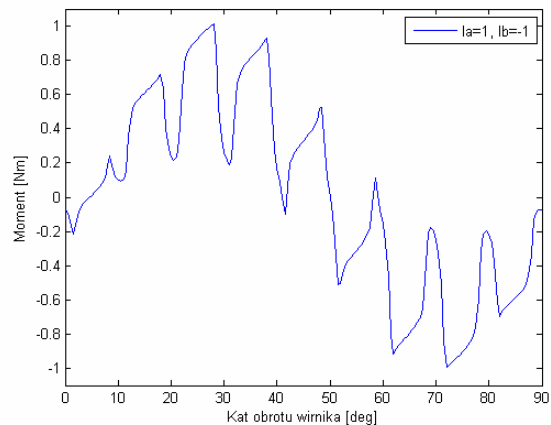
Obliczenia dla wzbudnika przeprowadzono w dwóch zasadniczych obszarach. Pierwszy obszar dotyczy wyznaczenia charakterystyki momentu elektromagnetycznego. Drugi obszar obliczeń dotyczył wyznaczenia wartości naprężeń jakie można uzyskać w znormalizowanej próbce przeznaczonyj do badań zmęczeniowych (zgodna z normą PN-80/H-04310). Wyznaczono również rozkład naprężeń redukowanych w proponowanym dla wzbudnika układzie mocowania, który ma stanowić jednocześnie układ pomiarowy momentu.

5.1 Moment elektromagnetyczny

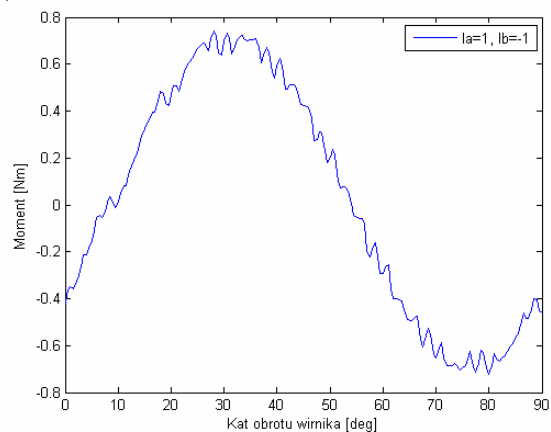
Obliczenia oparto o analizę FOURIERA przebiegu momentu elektromagnetycznego obliczonego metodą elementów skończonych (rys.10) jako funkcji kąta obrotu wirnika przy stałej wartości przepływu uzwojeń. Zastosowanie analizy harmonicznej jest związane z istnieniem różnego typu harmonicznych w momencie elektromagnetycznym. Są one związane z istnieniem wyższych harmonicznych przestrzennych przepływu uzwojeń stojana oraz permeancji szczeliny powietrznej. Dla ułatwienia weryfikacji pomiarowej wybrano zasilanie 2 faz [4].

Obliczenia momentu elektromagnetycznego wykonano dla modułu napędowego. Rezultaty otrzymano dla zasilania prądami $i_A=1$ A,

$i_B=-1$ A. Wyniki dla wirnika z rdzeniem prostym przedstawiono na rys.10a,11a zaś z wirnikiem segmentowym na rys.10b,11b. Przebiegi kątowe momentu przedstawiono na rys. 10. Analiza harmoniczna otrzymanych rezultatów została przedstawiona na rys.11.



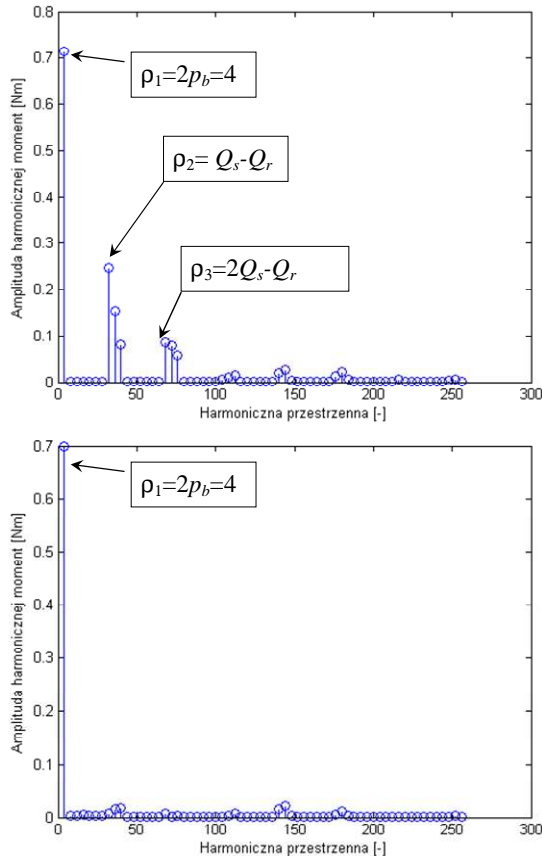
a)



b)

Rys. 10. Momentu elektromagnetycznego w funkcji kąta obrotu wirnika: a) wirnik prosty, b) wirnik segmentowy

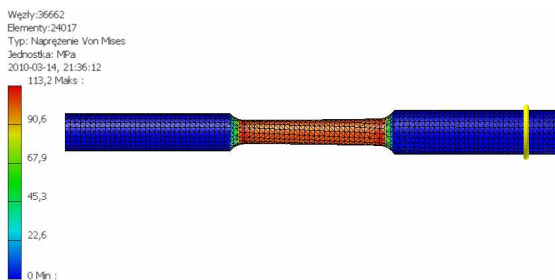
Decydujący wpływ na przebieg kątowy momentu dla wirnika prostego (rys.11a) posiadają harmoniczne przestrzenne o rzędach $\rho_1=2p_b=4$ (odpowiadająca podstawowej harmonicznej momentu reluktancyjnego) oraz harmoniczne żłobkowe $\rho_2=Q_s-Q_r$ i $\rho_3=2Q_s-Q_r$. Dobór kąta skręcenia segmentów (rozdział 4) jest określony koniecznością eliminacji harmonicznych ρ_2, ρ_3 . Otrzymany wynik dla wirnika segmentowego przedstawiono na (rys.11b).



Rys. 11. Rozkład harmoniczny charakterystyki kątowej momentu elektromagnetycznego
a) wirnik prosty, b) wirnik segmentowy

5.2 Obliczenia naprężeń

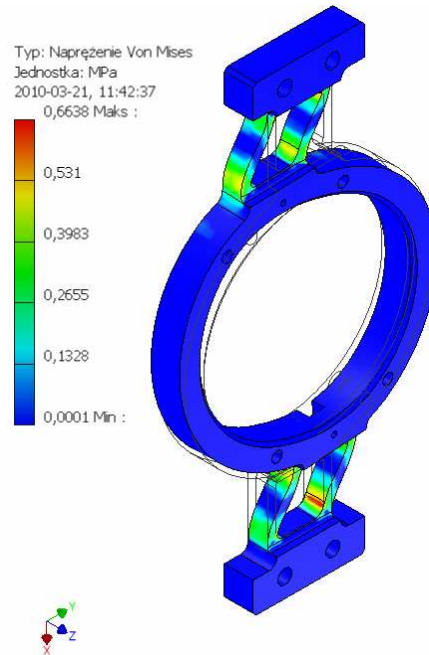
W dalszej kolejności przeprowadzono obliczenia mające na celu wykazanie stanu naprężeń jakie mogą zostać wywołane w znormalizowanej próbce do badań zmęczeniowych pod wpływem momentu wytwarzanego przez wzбудnik reluktancyjny (rys.12). Obliczenia przeprowadzono w środowisku Autodesk Inventor 2010. Wykonywanie tego typu badań stanowi jedno z zadań wzбудnika i odpowiada jego pracy w stanie zahamowanym przy zasilaniu wyłącznie modułu wibracyjnego [3].



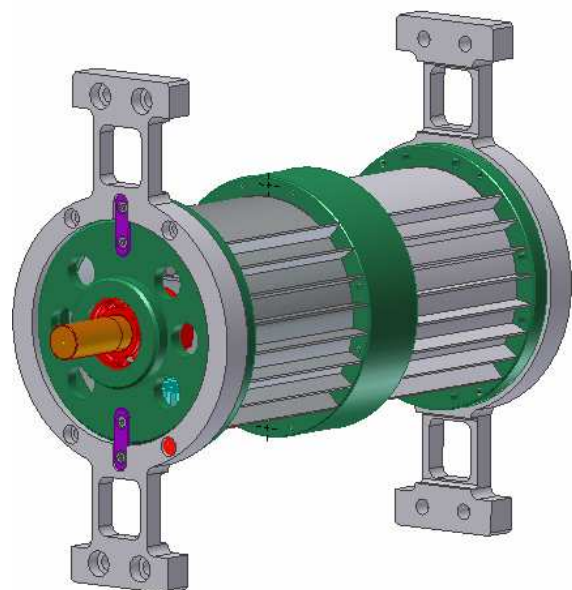
Rys. 12. Rozkład wartości naprężeń redukowanych w próbce do badań zmęczeniowych

Dodatkowo przeprowadzono jeszcze obliczenia dla proponowanego układu mocowania wzбудnika na stanowisku badawczym. Element ten ma stanowić jednocześnie układ pomiaru momentu wytwarzanego przez wzбудnik.

Na rysunku 13 przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych, jakie zostaną wytworzone w elemencie mocowania wzбудnika na stanowisku pomiarowym pod wpływem wytwarzanego momentu. Wartość momentu obciążenia przyjęto jako 1Nm.



Rys. 13. Rozkład wartości naprężeń zredukowanych w elemencie mocowania wzбудnika



Rys. 14. Wzбудnik drgań wraz z układem mocująco-pomiarowym

6. Wnioski

Otrzymane wyniki potwierdzają możliwość zbudowania modułowego wzbudnika drgań na bazie silnika reluktancyjnego. Zastosowanie segmentacji wirnika oraz uzwojenia o rozłożeniu sinusoidalnym pozwoliło na praktyczne wyeliminowaniu momentów wyższych rzędów związanych z harmonicznymi przepływu oraz reluktancji. Przyjęcie dodatkowego założenia pracy obu modułów w zakresie liniowej charakterystyki magnesowania powinno zapewnić minimalizację efektów związanych z nasyceniem obwodu magnetycznego oraz histerezą.

Dzięki wspomnianym zmianom konstrukcyjnym oba moduły wzbudnika odpowiadają w przybliżeniu modelowej maszynie reluktancyjnej z jedną harmoniczną reluktancji rzędu $p_1=2p_b$ [2,9]. Dla obu modułów możliwe będzie dzięki temu zastosowanie klasycznych algorytmów sterownia [2]. W celu uproszczenia ich implementacji zaproponowano pewną modyfikację klasycznej transformacji Parka, pozwalającą na wykorzystanie napięć międzyfazowych w transformacji do układu dwuosowego [5].

Porównanie otrzymanych wyników z rezultatami pomiarów zostanie przedstawione w trakcie konferencji.

Literatura

- [1] Bianchi N., Bolognani S., Bon D., Dai Pr'é 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 skretnymi do badania parametrów częstotliwościowych układów napędowych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 62, Seria: Studia i Materiały Nr 28, Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2008, str. 512–519.

[4] W.Burlikowski, *Dobór parametrów konstrukcyjnych modułu wibracyjnego reluktancyjnego wzbudnika drgań harmonicznymi skretnymi*; ZESZYTY PROBLEMOWE – MASZYNY ELEKTRYCZNE NR 84/2009; str. 151-156.

[5] Burlikowski W.: *Koncepcja uproszczonej transformacji dwuosowej dla prądowych i strumieniowych zmiennych stanu na przykładzie silnika reluktancyjnego z uzwojeniem połączonym w gwiazdę bez przewodu zerowego*, XIII Symposium Podstawowe Problemy Energoelektroniki, Elektromechaniki i Mechatroniki PPEEm'2009, Wisła, pp. 229-233.

[6] Dąbrowski, M.: *Projektowanie maszyn elektrycznych prądu przemiennego*. Warszawa, WNT, 1988.

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

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

[9] Sobczyk T.J.: *Metodyczne aspekty modelowania matematycznego maszyn indukcyjnych*. Warszawa, WNT, 2004.

[10] Trawiński T., Kielan P., Burlikowski W. *Koncepcja układu sterowania i zasilania reluktancyjnego generatora drgań skretnymi*. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 85 NR 12/2009, s.158-161.

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

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2011 jako projekt badawczy N N510 355337.

Autorzy

dr inż. Wojciech Burlikowski, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Mechatroniki, ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice, tel. (032) 237 26 77, email: wojciech.burlikowski@polsl.pl

dr inż. Zbigniew PILCH, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Mechatroniki, ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice, tel. (032) 237 26 77, email: zbigniew.pilch@polsl.pl

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk