

Jerzy Podhajecki, Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

WYZNACZANIE DRGAŃ WŁASNYCH WIRNIKA W BEZSZCZOTKOWYM SILNIKU PRĄDU STAŁEGO Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

ROTOR NATURAL FREQUENCY DETERMINATION OF THE BRUSHLESS DIRECT CURRENT MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

Abstract: The Brushless Direct Current Motors with Permanent Magnets are become more and more popular in many uses because of high efficiency, the high ratio between electromagnetic torque to mass of the magnetic circuit and higher reliability. Their uses in high speed applications often for which the particularly important determination of natural frequencies of rotor due to possibility of damage machine.

The problem of determination of natural frequencies in article is presented for rotor for BLDC machine. Finite Element Program ANSYS was used to calculate natural frequencies of BLDC machine. In aim of qualification of influence selected parts of rotor (magnets, bearings, end shields) on natural frequencies of rotor numerical calculations were done for different models. Numerical results was compared with experimental results from Hammer test with good agreement.

1. Wstęp

Maszyny bezszczotkowe z magnesami trwałymi stają się coraz bardziej popularne w wielu zastosowaniach ze względu na wysoką sprawność, duży stosunek momentu elektromagnetycznego do masy obwodu magnetycznego oraz niezawodność. Często ich zastosowania obejmują również pracę przy bardzo wysokich prędkościach obrotowych dla których szczególnie ważne jest wyznaczenie drgań własnych wirnika z powodu możliwości uszkodzenia maszyny [1]. W artykule poruszono problem wyznaczenia drgań własnych wirnika w silniku bezszczotkowym prądu stałego z magnesami trwałymi. Wraz z rozwojem możliwości obliczeniowych komputerów metody numeryczne stały się ważnym sposobem do wyznaczenia drgań własnych układu. W artykule przedstawiono obliczone wartości częstotliwości drgań własnych wirnika dla przykładowego silnika za pomocą programu ANSYS wykorzystując Metodę Elementów Skończonych (MES). Porównano również wyniki obliczeń z wynikami pomiarów.

W celu określenia wpływu poszczególnych części maszyny (uzwojenia, tarcze łożyskowe, łożyska, magnesy) na częstotliwości drgań własnych przeprowadzono obliczenia numeryczne dla różnych stopni uszczegółowienia modelu.

2. Sposoby wyznaczania drgań własnych

Jednym z niekorzystnych zjawisk występujących podczas pracy maszyn elektrycznych są drgania i wynikająca z nich emisja hałasu. Siły magnetyczne działające na stojan i wirnik maszyny powodują drgania szczególnie wtedy, gdy częstotliwości sił magnetycznych są równe lub bliskie częstotliwości drgań własnych maszyny.

W celu wyznaczenia na etapie projektowania maszyny częstotliwości własnych maszyny stosuje się metody analityczne, numeryczne (Metoda Elementów Skończonych). Do weryfikacji obliczeń numerycznych stojana i wirnika stosuje się zwykle badania eksperymentalne już po zbudowaniu prototypu maszyny, wyznaczając drgania własne za pomocą testu uderzeniowego, lub metodą wzbudzenia elektromagnetycznego impulsem prądu. Drgania własne zależą od własności materiałowych i parametrów konstrukcyjnych stojana i wirnika [2].

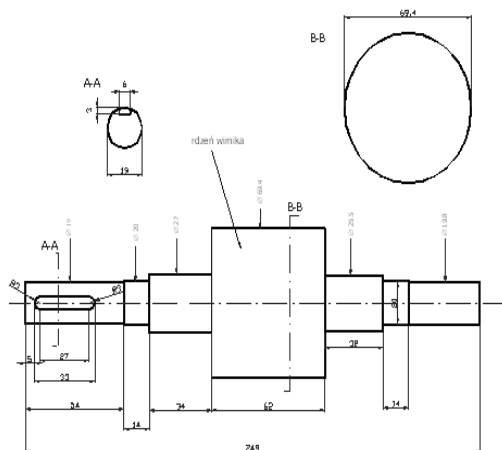
3. Bezsztotkowy silnik prądu stałego z magnesami trwałymi

Przedstawiony silnik został wykonany na bazie konstrukcji silnika asynchronicznego typu Sh-80A firmy Besel w Brzegu. Wirnik o średnicy $D_w = 69$ mm został wykonany z litego materiału ferromagnetycznego. Na powierzchni zostały naklejone magnesy trwałe neodymowe w kształcie wycinków wydrążonego walca. Tarcze łożyskowe zbudowane są z aluminium [3].

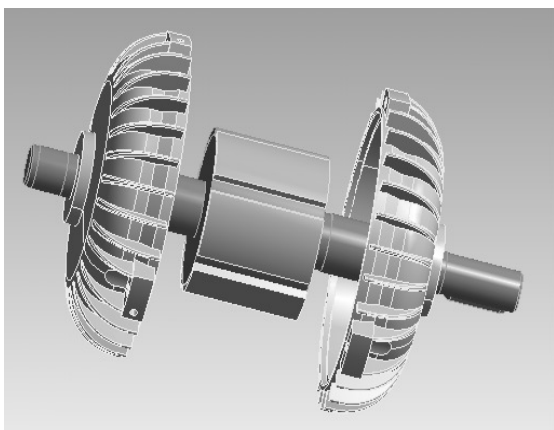
Z punktu widzenia drgań użycie silników z magnesami trwałymi przynosi nowe wyzwania z powodu występowania w nich pasożytniczego zjawiska, jakim jest moment zaczepowy. Szczególnie w przypadku użycia magnesów o wysokich energiach i przy pracy dla dużych prędkościach spektrum sił wymuszających magnetycznych może być duże i prawdopodobieństwo pobudzenia drgań własnych stojana i wirnika jest większe.

Na rys. 1-3 przedstawiono odpowiednio wymiary wału, model geometryczny i pełny model numeryczny wirnika badanego silnika.

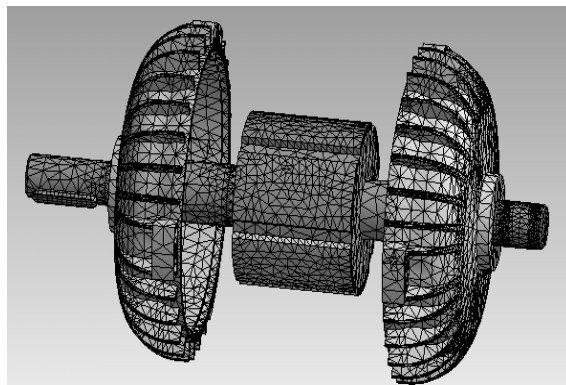
Na rys. 4 przedstawiono model numeryczny łożyska kulkowego. W rozważaniach przyjęto, że sztywność łożyska jest równa modułowi Younga stali konstrukcyjnej.



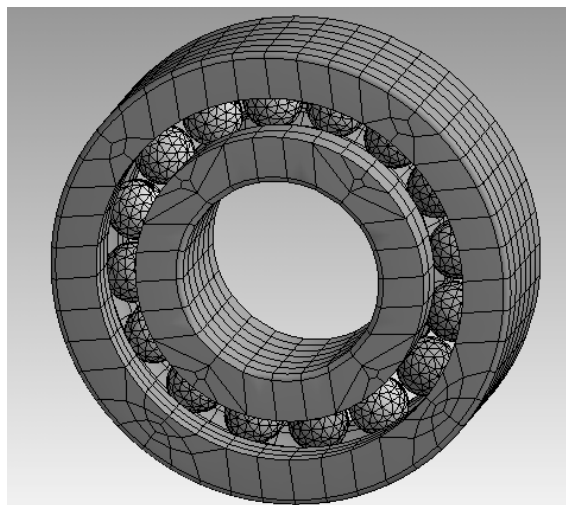
Rys. 1. Wymiary wału



Rys. 2. Model geometryczny wirnika



Rys. 3. Model numeryczny wirnik



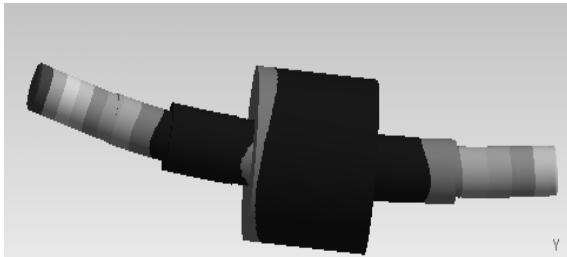
Rys. 4. Model numeryczny łożyska kulkowego

4. Rezultaty obliczeń drgań własnych wirnika

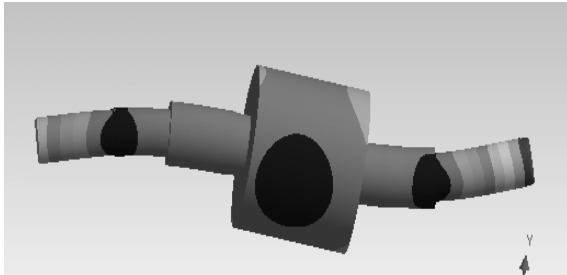
Dla maszyn elektrycznych szczególnie, gdy są projektowane do pracy przy dużych prędkościach obrotowych ważne jest wyznaczenie częstotliwości własnych wirnika. Niewłaściwe wyznaczenie częstotliwości własnych może prowadzić do dużego poziomu hałasu podczas pracy maszyny, szybszego zużycia łożysk, a nawet uszkodzenia maszyny. Jeżeli nawet wyznaczone częstotliwości własne wirnika leżą poniżej prędkości znamionowych maszyny, należy pamiętać, że użycie statycznych przebiegów częstotliwości do zasilania maszyny powoduje to, że spektrum sił magnetycznych jest duże, co może prowadzić do wzbudzenia częstotliwości własnych wirnika.

Ułożyskowany wirnik silnika maszyny elektrycznej wirującej jest układem sprężystym o nieskończenie wielu stopniach swobody. Wirnik może wykonywać drgania skrętne, wzdłużne i giętne (poprzeczne do osi wirnika). Z punktu widzenia praktycznego najważniej-

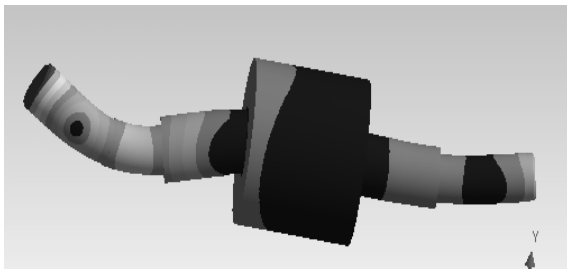
szymi są drgania giętne wirnika [4, 5]. Spośród częstotliwości drgań giętych duże znaczenie ma składowa podstawowa o częstotliwości drgań rzędu $r = 1$ (mod obrotowy). Drgania tego rzędu są często nazywane drganiami trzęsącymi. Prędkość obrotowa n_{obr} , z której wyliczona częstotliwość równa się częstotliwości drgań własnych rzędu $r = 1$ jest nazywana prędkością krytyczną pierwszego rodzaju – N_{kr} [4]. W celu określenia wpływu poszczególnych części wirnika przeprowadzono obliczenia dla różnych stopni uszczegółowienia modelu. Wyniki obliczeń częstotliwości drgań własnych wału wirnika przedstawiono w tabeli nr 1 i 2 oraz na rysunkach nr 5-8.



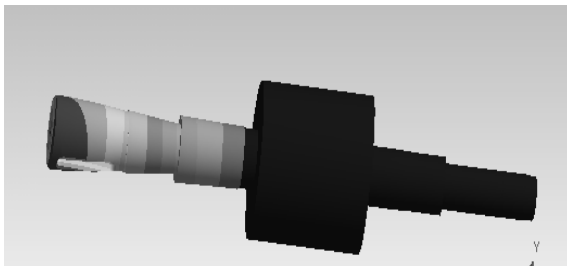
Rys. 5. Drgania giętne wału – mod nr 1



Rys. 6. Drgania giętne wału – mod nr 2



Rys. 7. Drgania giętne wału – mod nr 3



Rys. 8. Drgania własne wału – mod obrotowy

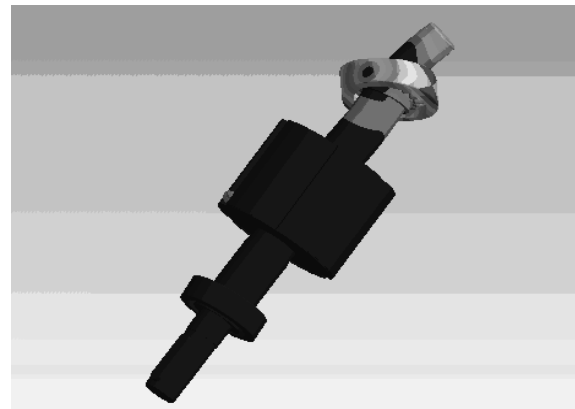
Wprowadzenie dodatkowych elementów wirnika spowodowało zmianę wartości częstotliwości własnych wału wirnika, ale również wprowadzenie nowych częstotliwości związanych z uwzględnieniem łożysk i tarcz łożyskowych. Nowe częstotliwości pojawiły się przy uwzględnieniu łożysk: 2085Hz, 6043Hz, 11085Hz, 13385Hz (rys. nr 9). Natomiast

Tabela 1. Częstotliwości drgań własnych giętych wału z uwzględnieniem magnesów

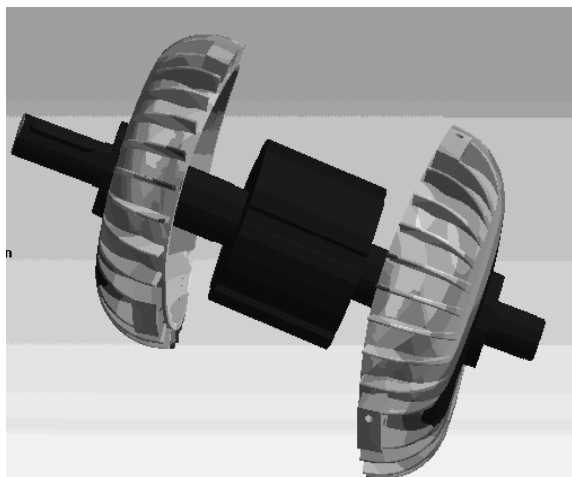
Lp.	Wał	Wał z magnesami
Mod nr 1	2113	2092
Mod nr 2	3626	3401
Mod nr 3	7487	7375
Mod rotacyjny	9747	9732
Mod nr 4	10258	10126
Mod nr 5	16067	15969

Tabela 2. Częstotliwości drgań własnych giętych wirnika uwzględnieniem łożysk i tarcz łożyskowych

Lp.	Wał z magnesami i łożyskami	Wał z magnesami, łożyskami i tarczami łożyskowymi
Mod nr 1	2085	2113
Mod nr 2	3546	3590
Mod nr 3	6574	6603
Mod rotacyjny	-	-
Mod nr 4	9450	9490
Mod nr 5	13724	13823



Rys. 9. Wybrana częstotliwość związana z uwzględnieniem łożysk $f=13385\text{Hz}$

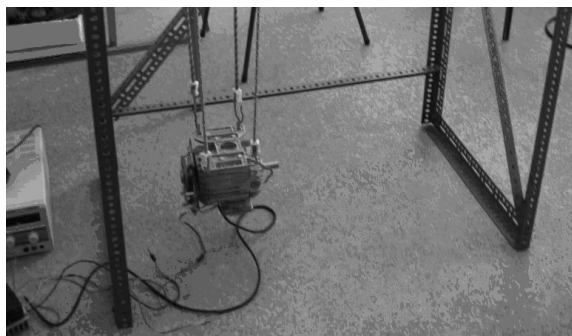


Rys. 10. Wybrana częstotliwość związana z uwzględnieniem tarcz łożyskowych $f=1477\text{Hz}$

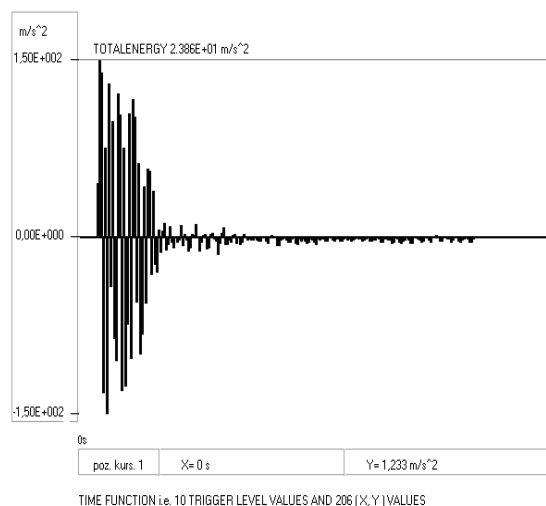
częstotliwości związane z uwzględnieniem tarcz łożyskowych to m.in.: 1158Hz, 1178Hz, 1321Hz, 1477Hz (rys. nr 10), 2200Hz, 2580Hz.

5. Pomiar drgań własnych wirnika

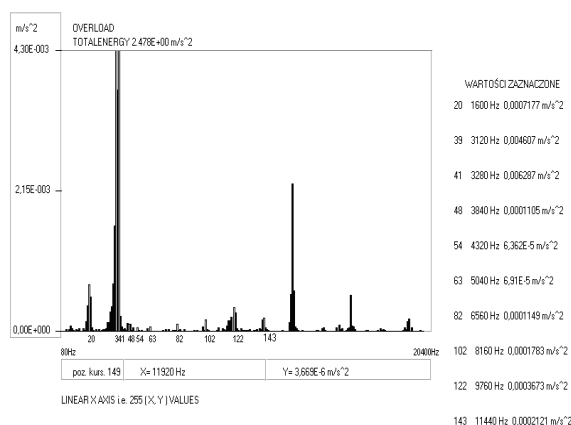
Do pomiarów drgań własnych silnika użyto testu uderzeniowego, który polega na pobudzeniu badanego układu do drgań w wyniku uderzenia specjalnym młotkiem. Widok kompletnego silnika na stanowisku pomiarowym przedstawia rys.11. Do rejestracji drgań wykorzystano akcelerometr i analizator drgań. Pozwoliło to zarejestrować i poddać analizie odpowiedź rozpatrywanego układu na pobudzenie do drgań przez uderzenie (rys. nr 12 i 13). W trakcie pomiaru uzyskano następujące częstotliwości drgań własnych w Hz: 1600 (2100), 3120 (3590), 6560 (6574), 9760 (9490), 13040 (13823). Wartości podane w nawiasach są to wartości uzyskane na podstawie obliczeń numerycznych [6]. Różnice w wynikach pomiarów i obliczeń mogą wynikać z wpływu stojana, który zmniejsza częstotliwości drgań własnych wirnika.



Rys. 11. Widok kompletnego silnika na stanowisku pomiarowym



Rys. 12. Zarejestrowane przyspieszenie na wymuszenie udarowe



Rys. 13. Zarejestrowane odpowiedź układu w dziedzinie częstotliwości na wymuszenie udarowe.

6. Wnioski

Użycie Metody Elementów Skończonych pozwala na wyznaczenie drgań własnych poszczególnych części maszyny. Możliwe jest łatwe określenie zmiany wpływu parametrów konstrukcyjnych (np. szerokości i długości wału) na wartości drgań własnych wirnika już na etapie projektowania maszyny. Wpływ łożysk oraz tarcz łożyskowych na drgania własne wirnika jest istotny, w celu dokładnego wyznaczenia drgań własnych konieczne jest zbudowanie pełnego trójwymiarowego modelu zawierającego stojan i wirnik maszyny.

7. Literatura

[1]. Jason D., Zhu Z.Q., Howe D.: *Rotor Resonances of High-Speed Permanent-Magnet Brushless Machines*. IEEE Transactions on Industry Applications Vol. 38, No.6, November/December 2002.

- [2]. Lecointe J.-P., Romary R., Brudny J.F., Czaplá T.: *Five methods of stator natural frequency determination: case of induction and switched reluctance machines*. Mechanical Systems and Signal Processing Vol.18 (2004) 1133-1159.
- [3]. Młot A., *Konstrukcyjne metody ograniczania pulsacji momentu elektromagnetycznego w bezszczotkowym silniku stałego z magnesami trwałymi*. Praca doktorska, Politechnika Opolska, 2007.
- [4]. Szymaniec S., *Badania wibroakustyczne silników indukcyjnych trójfazowych*. Praca doktorska, Politechnika Opolska, 1984.
- [5]. Kasperski M., *Drgania własne i wymuszone silnika reluktancyjnego przelączalnego*. Praca doktorska, Politechnika Łódzka, 1990.
- [6] Podhajecki J., Korkosz M., *Analiza drgań własnych stojana silnika BLDC*. Seminarium Maszyn Elektrycznych, Krasieczyn, 2009.

Autorzy

dr hab. inż. Sławomir Szymaniec, prof. P.O.
mgr inż. Jerzy Podhajecki
Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki
i Informatyki
Instytut Układów Elektromechanicznych
i Elektroniki Przemysłowej
ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole
e-mail: s.szymaniec@po.opole.pl