

Piotr Bogusz

Mariusz Korkosz

Jan Prokop

POLITECHNIKA RZESZOWSKA

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

BADANIE DRGAŃ WŁASNYCH NAPĘDU ROBOTA KUCHENNEGO Z SILNIKIEM SRM

FREE VIBRATION INVESTIGATION OF SRM FOOD PROCESSOR DRIVE

Abstract: The paper presents free vibration analysis of switched reluctance motor (SRM) electric drive. The 6/4 SRM motor of the food processor drive is presented. In the article 3D models of each element construction of projected SRM drive as well as the 3D assemblage model are presented. Modal analysis description and finite element method (FEM) model of SRM projected drive are presented. Free vibration calculations results for the frequency examples are described. Experimental test results for the proposed prototype SRM motor and conclusions are included.

1. Wstęp

Napędy elektryczne z silnikiem SRM zapewniają szeroki zakres regulacji prędkości, dużą wartość momentu rozruchowego, dużą niezawodność oraz zadowalającą sprawność, ale ich ogólną wadą są pulsacje momentu elektromagnetycznego będące między innymi źródłem drgań silnika. W trakcie projektowania silnika można prowadzić badania symulacyjne, nie tylko dotyczące, np. obliczeń elektromagnetycznych bezpośrednio związanych z parametrami eksploatacyjnymi napędu, ale również równolegle prowadzić obliczenia związane, np. z wibroakustyką projektowanego napędu. Takie podejście jest oczywiście dużo bardziej złożone i czasochłonne, wymaga zastosowania nowoczesnych narzędzi wspomagających proces projektowania, ale daje wymierne korzyści praktyczne.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wyników badań drgań własnych zaprojektowanego przez autorów układu napędowego z silnikiem reluktancyjnym przełączalnym (SRM)¹. Obiektem analizy jest silnik SRM o konstrukcji 6/4 przeznaczony do napędu robota kuchennego, którego projekt w zakresie obliczeń elektromagnetycznych przedstawiono w [1]. W niniejszej pracy zamieszczono wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych oraz podano wnioski

wskazujące na konieczność prowadzenia obliczeń drgań własnych w procesie projektowania nowoczesnych zintegrowanych napędów elektrycznych.

2. Podstawy analizy modalnej

Analiza modalna jest techniką badania właściwości dynamiki obiektów mechanicznych za pomocą drgań własnych (tzw. modów). W wyniku tej analizy otrzymuje się, tzw. model modalny w postaci zbioru charakterystycznych częstotliwości drgań własnych oraz kształtu postaci tych drgań. Znajomość tych parametrów pozwala na przewidywanie zachowania się obiektu na skutek dowolnych zaburzeń równowagi. Analiza częstotliwości drgań własnych umożliwia uniknięcie już na etapie projektowania niebezpiecznych wartości drgań projektowanego obiektu. Analiza modalna jest stosowana dla celów modyfikacji konstrukcji obiektu, a także do diagnostyki stanu konstrukcji badanego obiektu.

Postać macierzową równań różniczkowych dynamiki dla danego obiektu, w metodzie elementów skończonych (FEM), można zapisać w formie [5]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

gdzie \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} są odpowiednio macierzami mas, tłumienia i sztywności układu, $\mathbf{x}(t)$ jest wektorem przemieszczeń węzłów poszczególnych elementów w funkcji czasu t ,

¹ Obliczenia wykonano w oparciu o grant MNiSW/SGI3700/PRzesz./023/2009.

$\ddot{\mathbf{x}}(t)$ wektorem przyspieszeń, $\dot{\mathbf{x}}(t)$ wektorem prędkości oraz $\mathbf{F}(t)$ wektorem sił. W przypadku analizy drgań własnych, gdy nie uwzględnia się tłumienia w konstrukcji i nie poddaje się jej wymuszeniom zewnętrznym, macierz $\mathbf{C}=\mathbf{0}$ i wektor $\mathbf{F}(t)=\mathbf{0}$, wówczas równanie (1) upraszcza się do postaci:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = \mathbf{0} \quad (2)$$

Drgania swobodne w postaci harmoniczej można zdefiniować w formie:

$$\mathbf{x}(t) = \Phi_i \sin(\omega_i t) \quad (3)$$

gdzie Φ_i jest wektorem wartości własnych reprezentującym postać modalną i-tej częstotliwości własnej, ω_i jest i-tą własną pulsacją kątową. Po podstawieniu równania (3) do równania (2) otrzymuje się problem standardowych wartości własnych, który w ujęciu FEM przyjmuje postać:

$$(\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M}) \Phi_i = \mathbf{0} \quad (4)$$

Zagadnienie określania ω_i nazywa się wyznaczaniem wartości własnych i wiąże się z rozwiązaniem równania o postaci:

$$\det[\mathbf{K} - \omega_i^2 \mathbf{M}] = 0 \quad (5)$$

Każda wartość własna, związana z częstotliwością:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (6)$$

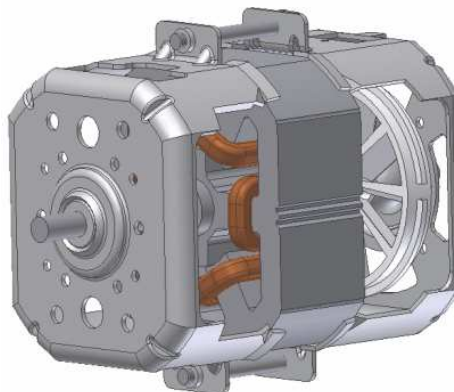
spełniająca równanie (5) określa, tzw. postać drgań układu.

3. Model 3D napędu z silnikiem SRM

Projekt pełnego modelu 3D napędu z silnikiem SRM, składającego się z poszczególnych komponentów takich, jak stojan z uzwojeniami, wirnik z wentylatorem, tarcze łożyskowe, opracowano w programach typu CAD, tj. w programach Autodesk Inventor oraz Pro/Engineer [2-3].

• Pełny model złożeniowy napędu SRM

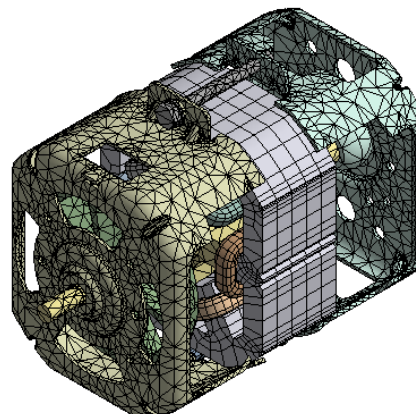
Pełny model złożeniowy napędu z silnikiem SRM przedstawiono na rysunku 1. Model ten wykonano w programie Autodesk Inventor [2].



Rys.1. Widok pełnego modelu złożeniowego projektowanego napędu z silnikiem SRM

• Model FEM 3D napędu SRM

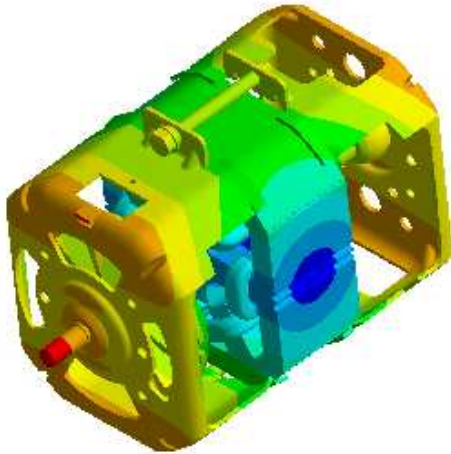
Do przeprowadzenia analizy modalnej dla modeli dyskretnych typu 3D autorzy zastosowali program ANSYS [4]. Analizę modalną przeprowadzono oddzielnie dla poszczególnych części składowych projektowanego modelu (stojan z uzwojeniami, wirnik z wentylatorem, tarcze łożyskowe) oraz dla kompletnego modelu złożeniowego całego układu napędowego (rys.1). W analizie zostały zastosowane trzy rodzaje materiałów: stal (tarcze łożyskowe, wałek, pierścienie zabezpieczające, śruby oraz pakiet blach stojana i wirnika), miedź (uzwojenia) oraz tworzywo sztuczne (wentylator). Cały model złożeniowy silnika zawierał około 65 tysięcy węzłów. Widok siatki elementów skończonych modelu złożeniowego 3D projektowanego napędu przedstawiono na rysunku 2.



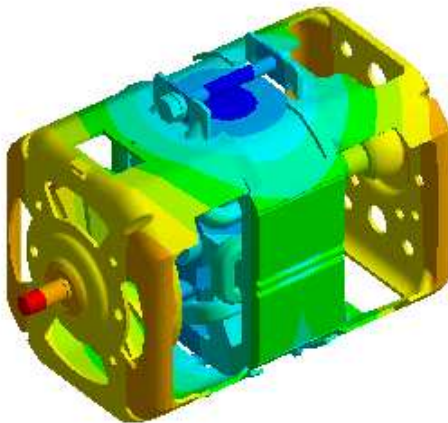
Rys.2. Siatka elementów skończonych modelu złożeniowego 3D napędu SRM

4. Wyniki obliczeń symulacyjnych

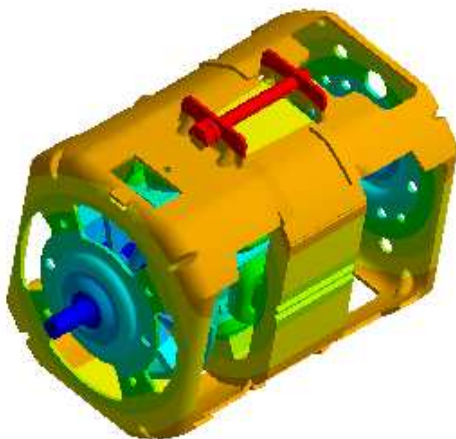
Na rysunkach 3 - 6 przedstawiono wyniki obliczeń drgań własnych modelu złożeniowego badanego napędu SRM dla czterech wybranych częstotliwości rezonansowych, mianowicie: $f=313$ Hz, $f=417$ Hz, $f=494$ Hz, $f=846$ Hz.



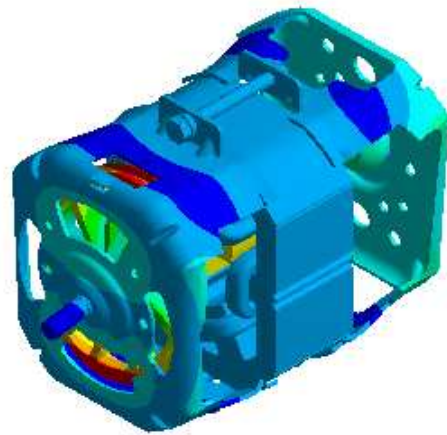
Rys.3. Postać drgań własnych napędu SRM o częstotliwości $f=313$ Hz



Rys.4. Postać drgań własnych napędu SRM o częstotliwości $f=417$ Hz



Rys.5. Postać drgań własnych napędu SRM o częstotliwości $f=494$ Hz



Rys.6. Postać drgań własnych napędu SRM o częstotliwości $f=846$ Hz

W tabeli 1 przedstawiono wyniki obliczeń pierwszych 10 częstotliwości drgań własnych modelu złożeniowego napędu SRM.

Tabela 1. Częstotliwości drgań własnych w Hz modelu złożeniowego napędu SRM z rysunku 1

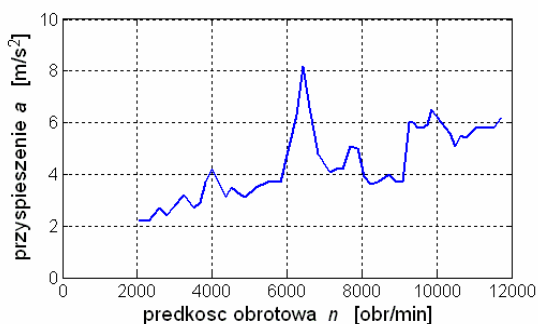
Nr	Hz
1	270
2	313
3	417
4	494
5	599
6	630
7	746
8	846
9	1000
10	1050

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych stwierdzono, że częstotliwości drgań własnych modelu złożeniowego i jego poszczególnych komponentów są różne. Trudno też jednoznacznie na podstawie analizy wybranych komponentów określić potencjalne częstotliwości całego modelu złożeniowego.

5. Wyniki badań laboratoryjnych

Objektem badań był opracowany przez autorów prototypowy silnik SRM do napędu robota kuchennego [1]. Dla różnych prędkości obrotowych z przedziału, od 2000 obr/min do 12000 obr/min, rejestrowano wartość skuteczną przyspieszenia a w jednym z punktów na powierzchni zewnętrznej stojana. Na rysunku 7

przedstawiono zależność wartości skutecznej przyspieszenia a w funkcji prędkości obrotowej n . Analizując zależność przyspieszenia w funkcji podstawowej częstotliwości przełączeń f_s można zauważyć, że uzyskane na podstawie analizy modalnej częstotliwości drgań własnych modelu złożeniowego i jego poszczególnych komponentów występują w badaniach laboratoryjnych.



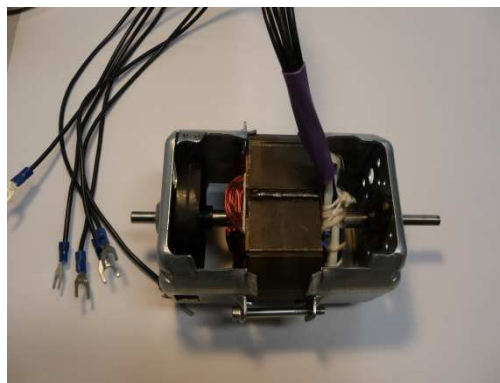
Rys.7. Zależność wartości skutecznej przyspieszenia w funkcji prędkości obrotowej

Pierwszy wyraźnie zauważalny rezonans układu napędowego występował przy prędkości $n=4000$ obr/min. Odpowiada to częstotliwości przełączeń stojana $f_s=267$ Hz. W modelu złożeniowym (Mz) częstotliwość rezonansowa wynosi 270 Hz (tabela 1). Największą wartość skuteczną przyspieszenia a zarejestrowano przy prędkości $n=6440$ obr/min, co odpowiada częstotliwości $f_s=429$ Hz. W modelu złożeniowym w tabeli 1 występuje częstotliwość drgań własnych o wartości $f=417$ Hz. W badanym przypadku w pobliżu tej prędkości obrotowej znacząco wzrastały drgania układu napędowego. Także znaczny wzrost wartości skutecznej przyspieszenia a zarejestrowano przy prędkości $n=9900$ obr/min. W modelu złożeniowym występuje częstotliwość rezonansowa $f=1000$ Hz. Jest ona związana z pierwszą częstotliwością rezonansową układu wirnika, która powoduje powstawanie drgań przy stosunkowo dużej prędkości obrotowej.

W warunkach laboratoryjnych w prototypowym silniku SRM wymieniono jedną z tarcz łożyskowych, na taką, która nie posiada wycięć (rys.8). Na rysunku 9 przedstawiono widok badanego silnika ze zmienioną tarczą łożyskową.



Rys.8. Widok dwóch wersji tarcz łożyskowych



Rys.9. Widok silnika ze zmienioną tarczą łożyskową

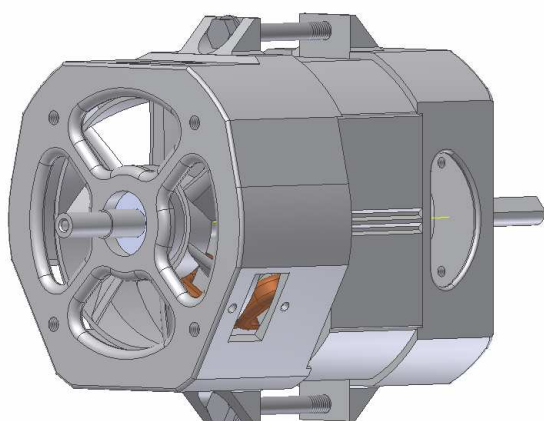
Wyniki pomiarów wartości skutecznej przyspieszenia w funkcji prędkości obrotowej dla silnika z wymienioną tarczą łożyskową zamieszczono na rysunku 10.



Rys.10. Zależność wartości skutecznej przyspieszenia w funkcji prędkości obrotowej dla silnika z wymienioną tarczą łożyskową

Po zamianie tarczy łożyskowej uzyskano zmniejszenie maksymalnej wartości skutecznej przyspieszenia z 8.2 m/s² (rys.7) do wartości 6.3 m/s² (rys.10). Dalsza redukcja wartości skutecznej przyspieszenia silnika, w którym zastosowano standardowe tarcze łożyskowe, nie była już możliwa. Prowadzone przez autorów kolejne prace konstrukcyjne mają na celu wyeliminowanie niepożądanych zjawisk

związanych z drganiami projektowanego układu napędowego robota z napędem SRM. Jednym z etapów tych prac jest wykonanie projektu całkowicie nowych tarcz łożyskowych dostosowanych do wykonanego obwodu magnetycznego stojana, wirnika oraz zastosowanego wentylatora. Nowe tarcze łożyskowe posiadają zmienione wymiary geometryczne, szczególnie zmniejszono długość tarczy od strony napędowej. Na rysunku 11 przedstawiono widok modelu złożeniowego silnika 3D z zaprojektowanymi nowymi tarczami łożyskowymi.



Rys.11. Widok modelu złożeniowego silnika z nowymi tarczami łożyskowymi

Wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych silnika SRM z nowymi tarczami łożyskowymi będą tematem dalszych publikacji autorów.

6. Wnioski

Wyznaczone częstotliwości drgań własnych uzyskane na podstawie badań symulacyjnych są zbliżone do tych uzyskanych na podstawie weryfikacji pomiarowej. Dobra zbieżność pomiędzy wynikami symulacji, a weryfikacją pomiarową pozwala wnioskować o konieczności stosowania tego typu obliczeń w procesie projektowania napędu. W analizowanym przypadku zastosowane oryginalne tarcze łożyskowe z produkowanego silnika komutatorowego okazały się

nieodpowiednie dla zaprojektowanego silnika SRM. Wymiana jednej z tarcz łożyskowych na tarczę bez wycięć pozwoliła ograniczyć wartość maksymalną przyspieszenia do poziomu 6.3 m/s^2 . Nie wyeliminowało to problemu małej sztywności zastosowanych tarcz. W chwili obecnej autorzy opracowali już konstrukcje nowych tarcz łożyskowych, których wymiary i kształt jest dostosowany do potrzeb projektowanego napędu z silnikiem SRM.

Literatura

- [1] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: Badania symulacyjne maszyny reluktancyjnej przełączalnej przeznaczonej do napędu robota kuchennego, *Maszyny elektryczne*, BOBRME, KOMEL, *Zeszyty problemowe* Nr 82/2009, str. 203-208.
- [2] Autodesk Inventor Professional Documentation, Autodesk, Inc.
- [3] Pro/Engineer Documentation, Parametric Technology Corporation.
- [4] Ansys Documentation, ANSYS, Inc.
- [5] Liu G.R. and Quek S.S., *The Finite Element Method: A practical course*, Butterworth Heinemann, 2003.
- [6] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: Analiza właściwości silnika reluktancyjnego przełączalnego z niesymetrycznym obwodem wirnika, *Maszyny elektryczne*, BOBRME, KOMEL, *Zeszyty problemowe* Nr 84/2009, str. 145-150.
- [7] Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: Wpływ danych nawojowych na właściwości eksploatacyjne silnika reluktancyjnego przełączalnego o budowie niesymetrycznej, *Maszyny elektryczne*, BOBRME, KOMEL, *Zeszyty problemowe* Nr 84/2009, str. 150-156.

Autorzy

dr inż. Piotr Bogusz, pbogu@prz.edu.pl
 dr inż. Mariusz Korkosz, mkosz@prz.edu.pl
 dr inż. Jan Prokop, jprokop@prz.edu.pl
 Politechnika Rzeszowska
 Wydział Elektrotechniki i Informatyki
 ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Krystyna Macek-Kamińska