

*silnik bezszczotkowy prądu stałego z magnesami trwałymi,  
drgania, siły magnetyczne, metoda elementów skończonych,  
warunki brzegowe, sposób zamocowanie*

Jerzy PODHAJECKI\*, Sławomir SZYMANIEC\*

## **WPLYW WARUNKÓW BRZEGOWYCH NA FORMĘ ODKSZTAŁCEŃ DRGAŃ WŁASNYCH I WYMUSZONYCH STOJANA SILNIKA BLDC – ANALIZA NUMERYCZNA**

Tematem artykułu jest przedstawienie wpływu zamocowania na formę odkształceń drgań własnych i wymuszonych w silniku bezszczotkowym z magnesami trwałymi. Przedstawiono stan zagadnienia oraz badania numeryczne drgań dla różnych warunków brzegowych.

### **1. WPROWADZENIE**

W wielu zastosowaniach przemysłowych drgania i hałas w maszynach elektrycznych zależą nie tylko od konstrukcji geometrycznej oraz własności materiałowych poszczególnych części tj. stojana i wirnika, ale również od sposobu zamocowania silnika [1–6]. Przedmiotem badań w pracach [1, 2] był wpływ warunków zamocowania na drgania własne stojana silnika indukcyjnego, który okazał się istotny, m.in. zwiększyła się liczba częstotliwości własnych [1], uległ zmianie rząd odkształcenia [2]. W pracy [3] określono wpływ rodzaju zamocowania na wartość drgań własnych i poziom emitowanego hałasu w silniku indukcyjnym zasilanym z falownika PWM. Zamocowanie spowodowało zwiększenie drgań własnych, wprowadzając jednocześnie nowe drgania własne. Wyniki przedstawione w pracy [4] wskazują, że amplituda drgań wynikająca ze zjawiska rezonansu zależy w dużym stopniu od rodzaju kontaktu pomiędzy łapami silnika, a fundamentem do którego przymocowana jest maszyna. Zbadano drgania własne dla dwóch przypadków kontaktu. Pierwszy określony został jako pełny, drugi jako minimalny. Kontakt pełny powoduje zwiększenie drgań własnych w porównaniu do kontaktu określanego jako minimalny. Przedmiotem badań

---

\* Instytut Układów Elektromechanicznych i Elektroniki Przemysłowej, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Opolska, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole.

pomiarowych i numerycznych przeprowadzonych w pracach [5] był wpływ rodzaju zamocowania na wartości i postaci odkształceń drgań własnych stojana w silniku reluktancyjnym. W pierwszym przypadku silnik został zawieszony na sprężynach, w drugim – przymocowany do fundamentu, w trzecim zastosowano zamocowanie do czoła silnika. Rezultaty badań pokazują, że wpływ musi zostać wzięty pod uwagę w obliczeniach drgań własnych i rozpatrywaniu sposobów ograniczenia drgań i hałasu w praktyce przemysłowej.

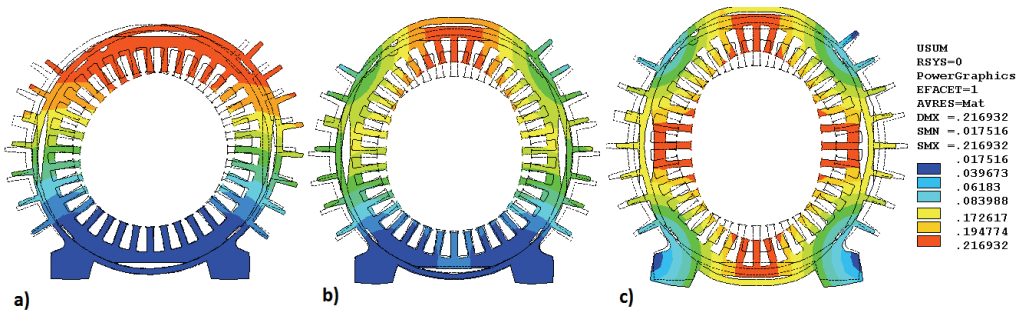
## 2. BADANIA NUMERYCZNE

W metodzie elementów skończonych drgania swobodne są opisywane przez następujące równanie [7, 9]:

$$\{[K] - \omega^2[M]\} \{u\} = \{0\} \quad (1)$$

gdzie:  $[K]$  i  $[M]$  to odpowiednio macierze sztywności i mas. Rozwiązania:  $f_i = \omega_i / 2\pi$  [Hz] i  $\{u\}$  [m] to odpowiednio częstotliwości drgań własnych i uogólniony wektor postaci drgań. Obliczenia wykonano za pomocą programu Ansys.

Sposób zamocowania jaki jest często stosowany w badaniach laboratoryjnych to zawieszenie maszyny elektrycznej na sprężynach co zapewnia izolację badanego układu od podłoża. W analizie numerycznej odpowiada to brakowi warunków brzegowych. Przeprowadzenie pomiarów w warunkach zamocowania łap silnika do fundamentu odpowiada wymuszeniu zerowej wartości przemieszczenia w łapach. Określono drgania własne dla obydwu przypadków.



Rys. 1. Postacie drgań własnych stojana: a) dla warunków brzegowych;  $f = 727,5$  Hz,  $r = 1$ ; b) dla warunków brzegowych;  $f = 1726$  Hz,  $r = 2$ ; c) przy braku wprowadzonych warunków brzegowych;  $f = 1546$  Hz,  $r = 2$

Fig. 1. Shape of deformation for natural frequencies of stator: a) with boundary conditions;  $f = 727.5$  Hz,  $r = 1$ ; b) with boundary conditions;  $f = 1726$  Hz,  $r = 2$ ; c) without boundary conditions;  $f = 1546$  Hz,  $r = 2$

Tabela 1. Wartości wybranych częstotliwości drgań własnych stojana dla różnych warunków brzegowych [Hz]

Table 1. Values of selected natural frequencies of stator for different boundary conditions [Hz]

Rząd drgań	Badania numeryczne*	Badania numeryczne**
$r = 1$	727,5	–
$r = 2$	1726	1546

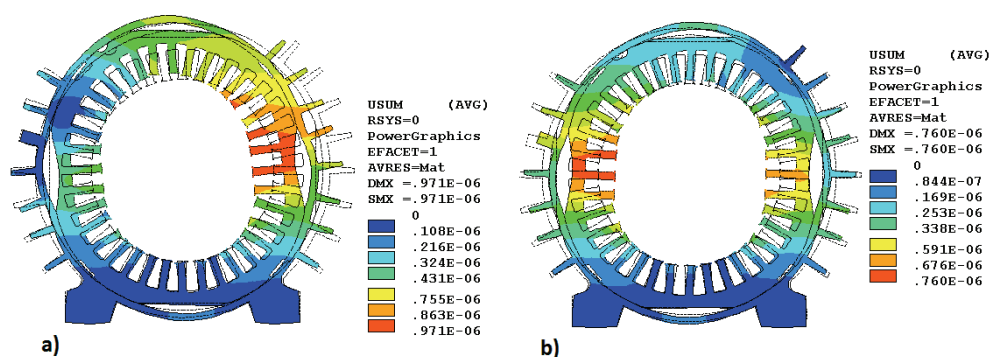
\* – warunki brzegowe na łapach silnika; \*\* – brak warunków brzegowych.

Okazało się, że wpływ warunków brzegowych jest istotny i dotyczy zarówno częstotliwości, jak i postaci odkształceń stojana (rys. 1). Można stwierdzić, że wprowadzenie warunków brzegowych w łapach silnika powoduje istotną zmianę wartości i kształtu deformacji (rys. 1b i rys. 1c) oraz powstanie nowych częstotliwości własnych związanych bezpośrednio ze sposobem zamocowania (rys. 1a).

Kolejnym etapem badań było wyznaczenie drgań stojana pod wpływem sił magnetycznych zmieniających się w czasie dla różnych warunków brzegowych. Drgania opisywane są następującym równaniem [8, 9]:

$$[M][\ddot{u}] + [C][\dot{u}] + [K][u] = f \quad (2)$$

gdzie:  $[u]$  – wektor przemieszczenia,  $[\dot{u}]$  – wektor prędkości,  $[\ddot{u}]$  – wektor przyspieszenia,  $[M]$  – macierz mas,  $[C]$  – macierz tłumienia,  $[K]$  – macierz sztywności,  $f$  – wektor sił magnetycznych. Siły magnetyczne wyznaczone dla różnych położeń wirnika wcześniejszych obliczeń magnetycznych są wymuszeniem dla analizy mechanicznej. Obliczenia drgań wykonano dla prędkości wirnika  $n = 600$  obr/min dla wartości prądu zasilającego  $I = 0.6$  A (bieg jałowy). Obiekt badań – silnik bezszczotkowy z magnesami trwałymi opisany został we wcześniejszych pracach [7–9].

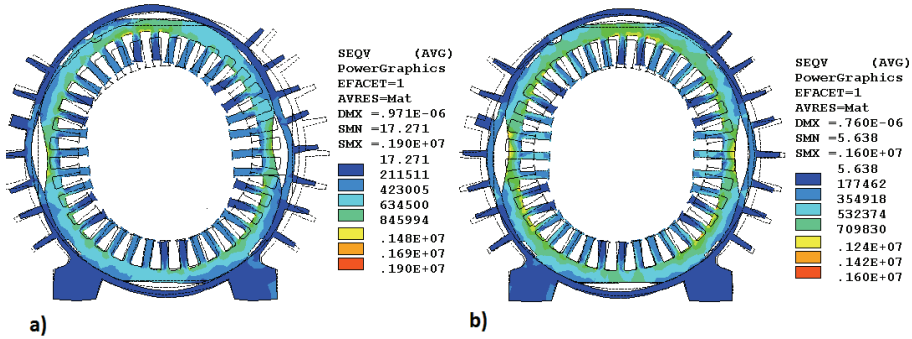


Rys. 2. Deformacja stojana  $U$  [m] dla wybranych położeń wirnika: a) 20 stopni; b) 30 stopni

Fig. 2. Shape of deformation of stator structure  $U$  [m] for selected positions of rotor:

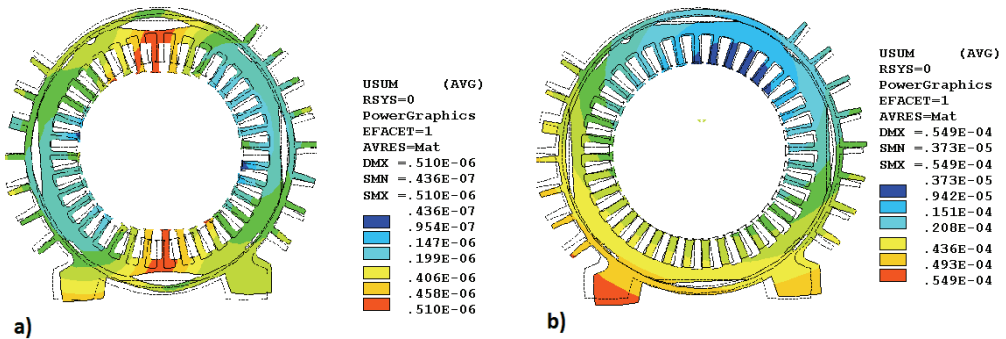
a) 20 degree; b) 30 degree

Do graficznego przedstawienia otrzymanych postaci odkształceń stojana w wybranych chwilach czasowych użyto współczynnika wzmocnienia skali deformacji, który wynosił:  $k = 10000$ . W pierwszym przypadku, gdy warunki brzegowe zostały określone na łapach stojana, postać drgań stojana była w czasie kolejnych chwil czasowych najbardziej zbliżona do rzędu pierwszego odkształceń (rys. 2a i 3a), a dla wybranych do drugiego rzędu (rys. 2b i 3b). Możliwa jest więc zmiana numeru rzędu odkształcenia podczas pracy.

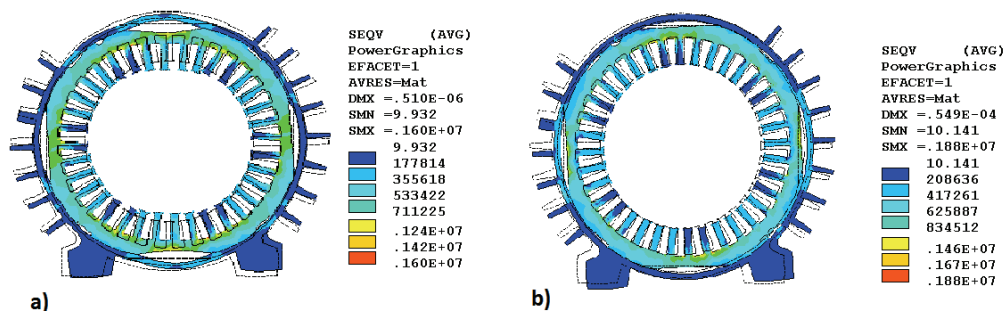


Rys. 3. Rozkład naprężeń Hubera–Misesa  $\sigma_{red}$  [Pa] dla wybranych położen wirnika:  
 a) 20 stopni; b) 30 stopni  
 Fig. 3. Distribution of Huber–Mises  $\sigma_{red}$  [Pa] stress for selected positions of rotor:  
 a) 20 degree; b) 30 degree

W drugim przypadku, przy braku wprowadzonych warunków brzegowych na łapach silnika postać deformacji była złożeniem ruchu sztywnego stojana oraz drugiego rzędu drgań. Porównanie natomiast rozkładu naprężeń wskazuje, że zamocowanie nie zmieniło istotnie wartości naprężeń mechanicznych w stojanie (rys. 3 i rys. 5).



Rys. 4. Deformacja stojana  $U$  [m] dla wybranych położen wirnika: a) 1 stopień; b) 30 stopni  
 Fig. 4. Shape of deformation of stator structure  $U$  [m] for selected positions of rotor:  
 a) 1 degree; b) 30 degree



Rys. 5. Rozkład naprężeń Hubera–Misesa  $\sigma_{red}$  [Pa] dla wybranych położen wirnika:

a) 1 stopień; b) 30 stopni

Rys. 5. Distribution of Huber–Mises  $\sigma_{red}$  [Pa] stress for selected positions of rotor:

a) 1 degree; b) 30 degree

### 3. WNIOSKI

Z przedstawionych rezultatów wynika, że rodzaj warunków brzegowych wpływa w istotny sposób na wartości drgań własnych oraz kształt odkształcenia dla drgań własnych i wymuszonych. Praca stanowi pierwszy etap badań wpływu rodzaju zamocowania na drgania. W przyszłości analizy numeryczne rozszerzone zostaną o pomiary oraz na badania możliwości zmniejszenia drgań poprzez modyfikację sposobu zamocowania.

### LITERATURA

- [1] KNOPIK T., KIMMIRCH R., BINDER A., *Prediction of the noise power level of squirrel cage induction machines in different operation points taking into account mechanical boundary conditions for modal analysis*, Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011 14-th European Conference on, Aug. 30 2011–Sept. 1 2011.
- [2] LECOINTE J., ROMARY R., BRUDNY J., *A contribution to determine natural frequencies of Electrical Machine. Influence of stator foot fixation*, Recent Developments of Electrical Drivers, Wiak S., Dems M., Komezka K. (pod red.), ICEM'04, Springer, 2006.
- [3] ZHU Z.Q., XU L., HOWE D., *Influence of mounting and coupling on natural frequencies and acoustic noise radiated by a PWM controller induction machine*, Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives, Conference Publication, No. 468, IEEE, 1999.
- [4] KREITZER S., OBERMAYER J., MISTRY R., *The effect of structural and localized resonances on induction motor performance*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, No. 5, September/October 2008.
- [5] TANG Z., PILLAY P., *Analysis of mounting effects on Vibrations of Switched Reluctance Motors*, Electric Machines and Drives Conference, 2003, IEMDC'03, IEEE International, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, No. 5, September/October 2008.

- [6] FINLEY W., HODOWANIEC M., *Sleeve versus Antifriction Bearings: Selection of the Optimal Bearings for Induction Machine*, 48th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference, 24–26 September, IEEE Industry Applications Society, 2001.
- [7] PODHAJECKI J., MŁOT A., KORKOSZ M., *Analiza drgań stojana silnika BLDC pochodzenia magnetycznego*, Zeszyty Problemowe Maszyn Elektrycznych, 84/2009, 202–206, Komel.
- [8] PODHAJECKI J., KORKOSZ M., *Analiza drgań własnych silnika BLDC*, Zeszyty Problemowe Maszyn Elektrycznych, 84/2009, 197–202, Komel.
- [9] PODHAJECKI J., *Drgania w bezszczotkowych silnikach z magnesami trwałymi – analiza i pomiary*, Rozprawa doktorska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Politechnika Opolska, 2012.

INFLUENCE OF BOUNDARY CONDITIONS ON SHAPE OF DEFORMATION  
OF FREE AND FORCED VIBRATIONS OF THE STATOR STRUCTURE  
OF BLDC MOTOR – NUMERICAL ANALYSIS

This article presents research on the influence of the mounting on shape of deformation for free and forced vibrations in Brushless Direct Current Motor (BLDC) with permanent magnets. The status of the problem and numerical study of calculations for free and forced vibrations for different boundary conditions are shown.