

*silnik bezszczotkowy prądu stałego z magnesami trwałymi,
drżania, metoda elementów skończonych,
ekscentryczność wirnika, niejednakowy poziom namagnesowania*

Jerzy PODHAJECKI*
Sławomir SZYMANIEC*

WPLYW EKSCENTRYCZNOŚCI STATYCZNEJ WIRNIKA I NIEJEDNAKOWEGO NAMAGNESOWANIA MAGNESÓW NA POSTAĆ DEFORMACJI STOJANA W SILNIKU BLDC

W pracy badano wpływ niejednakowego namagnesowania magnesów i ekscentryczności statycznej wirnika na wielkość i postać deformacji stojana silnika bezszczotkowego z magnesami trwałymi poddanego działaniu sił magnetycznych. Przeprowadzono obliczenia numeryczne dla wybranych przypadków ekscentryczności statycznej wirnika i niejednakowego namagnesowania magnesów.

1. WPROWADZENIE

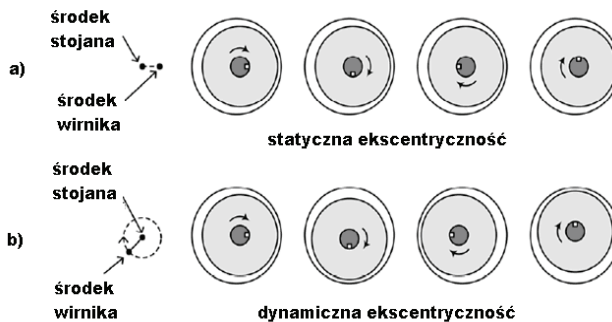
Rozkład pola magnetycznego w silnikach BLDC nie zależy jedynie od magnesów i prądu zasilającego, a wpływ może mieć również ekscentryczny ruch wirnika [1]. Ekscentryczność wirnika powoduje zaburzenie symetrii pola magnetycznego, co w konsekwencji prowadzi do powstania dodatkowej siły naciągu magnetycznego. Niejednakowa magnetyzacja magnesów trwałych występuje w przypadku, gdy jeden lub więcej z nich jest namagnesowany w odmienny sposób niż pozostałe. Dotyczyć to może zarówno amplitudy jak i kierunku. Wada ta może powstać na etapie produkcji lub w czasie pracy silnika, co prowadzi do niesymetryczności rozkładu pola magnetycznego i powstania dodatkowych sił magnetycznych. Przedmiotem rozważań w artykule [2] było wykorzystanie metod analitycznych m.in. wpływu stopnia ekscentryczności wirnika oraz niejednakowego poziomu namagnesowania magnesów na amplitudę i spektrum sił magnetycznych. Obydwa te zjawiska powodują powstawanie dodatkowych harmonicznych o niższych częstotliwościach.

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

W pracy [3] wykorzystując metody analityczne badano wpływ konstrukcji silnika (liczba żłobków stojana i biegunów magnetycznych wirnika) na amplitudę i spektrum sił magnetycznych dla różnych rodzajów ekscentryczności wirnika. W literaturze [4] dokonano porównania zmian sił naciągu magnetycznego dla dwóch rodzajów magnetyzacji (radialnej i Hallbach) w konstrukcji silnika bezżłobkowego BLDC dla kilku poziomów ekscentryczności wirnika. Konstrukcja o magnetyzacji typu Hallbach okazała się pod tym względem mniej korzystna. W pracy [5] w wyniku przeprowadzonych badań analitycznych, numerycznych i pomiarowych okazało się, że ekscentryczność wirnika i niejednakowy poziom namagnesowania ma istotny wpływ na wzrost drgań i hałasu m.in. prowadzić mogą do pobudzenia drgań własnych stojana.

2. ANALIZA NUMERYCZNA

Ekscentryczność wirnika to jeden z istotnych czynników, które wpływają na odpowiedź wibracyjną maszyny elektrycznej wirującej [1]. Może występować ekscentryczność statyczna, dynamiczna i mieszana – statyczno-dynamiczna. Statyczna może mieć źródło w wadliwym montażu części maszyny w wyniku niedokładności procesu produkcji wirnika. W tym przypadku odległość między najbliższymi punktami stojana i wirnika pozostaje niezmienna niezależnie od kolejnych obrotów wirnika (rys. 1a). Natomiast dynamiczna wynikać może również ze zjawisk dynamicznych tj. pobudzenia wału do drgań własnych i wówczas najbliższa odległość między wirnikiem a stojanem zmienia się (rys. 1b).



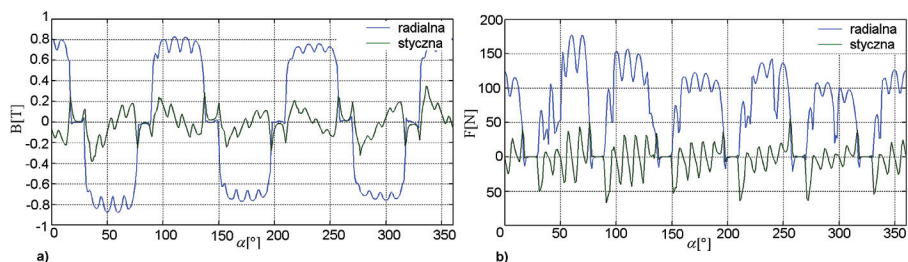
Rys. 1. Ekscentryczność wirnika: a) statyczna; b) dynamiczna
Fig. 1. Eccentricity of the rotor: a) static; b) dynamic

Poziom ekscentryczności można wyrazić w (%), w następujący sposób [6]:

$$e = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie: δ_1 – aktualna grubość minimalnej szczeliny powietrznej, δ_2 – aktualna grubość maksymalnej szczeliny powietrznej.

Obiektem badań był silnik bezszczotkowy prądu stałego z magnesami trwałymi szerzej opisany m.in. w pracy [7]. W obliczeniach przyjęto wartości: $\delta_1 = 0,12$ mm, $\delta_2 = 0,14$ mm, co odpowiada przyjęciu, że poziom ekscentryczności statycznej wynosi $e = 20\%$. Na rys. 2a przedstawiono rozkład indukcji magnetycznej w środku szczeliny powietrznej, a na rys. 2b rozkład sił magnetycznych działających na obwodzie wirnika. W wyniku ekscentryczności statycznej nastąpiło zaburzenie symetrii rozkładu sił magnetycznych i powstanie siły naciągu magnetycznego działającej na wirnik maszyny.

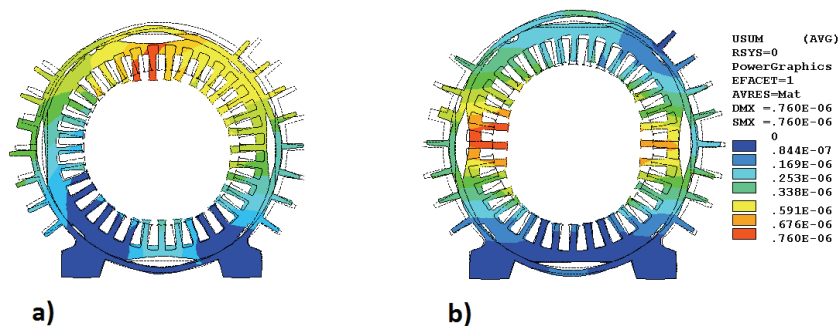


Rys. 2. Rozkład przestrzenny dla modelu z ekscentrycznością statyczną:

a) indukcji B [T] w środku szczeliny powietrznej; b) sił magnetycznych F [N] działających na wirnik

Fig. 2. Spatial distribution for model with static eccentricity:

a) induction B [T] in the middle of air-gap; b) magnetic forces F [N] acting on rotor



Rys. 3. Postać deformacji U [m] stojana dla silnika o idealnym centrycznym położeniu wirnika i symetrycznym poziomie namagnesowania magnesów dla wybranych położeń wirnika:

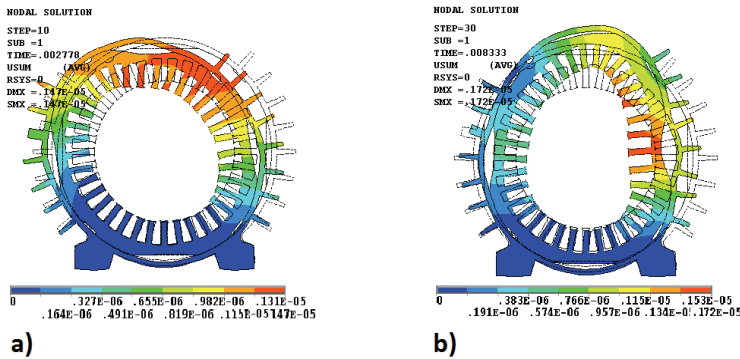
a) 10 stopni; b) 30 stopni.

Fig. 3. Shape of deformation of stator U [m] for model without eccentricity

and with symmetric magnetization for selected positions of rotor: a) 10 degree; b) 30 degree

Przeprowadzono obliczenia drgań wynikłych z działania sił magnetycznych. W porównaniu do modelu wyjściowego (rys. 3) o idealnie centrycznym położeniu wirnika dla modelu z wprowadzoną ekscentrycznością stwierdzono zwiększenie deformacji

(rys. 4). Postać drgań miała rząd zbliżony do pierwszego rzędu (rys. 4a), a dla wybranych położen wirnika do drugiego (rys. 4b).

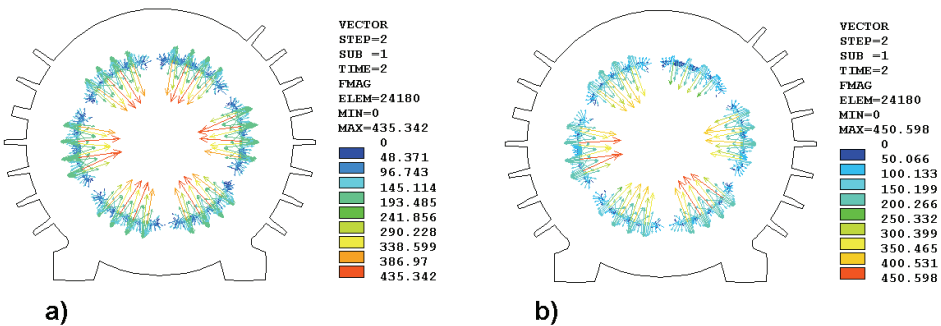


Rys. 4. Postać deformacji U[m] stojana dla silnika z ekscentrycznością statyczną dla wybranych położen wirnika: a) 10 stopni; b) 30 stopni

Fig. 4. Shape of deformation of stator U[m] for model with static eccentricity for selected positions of rotor: a) 10 degree; b) 30 degree.

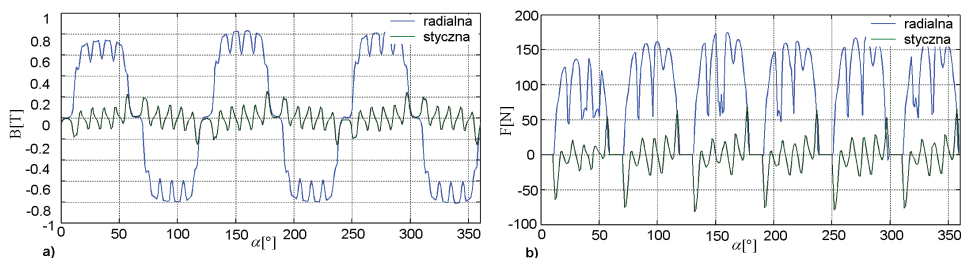
Badania wpływu niejednakowego namagnesowania prowadzono dla dwóch modeli:
 A: jeden z magnesów miał 90% wartości koercji pozostałych.

B: jeden z magnesów miał 90%, a naprzeciwległy – 110% wartości koercji. Na rys. 6 przedstawiono rozkład składowej indukcji magnetycznej w środku szczeliny powietrznej i sił magnetycznych działających na wirnik dla modelu A. Dla pierwszego modelu stwierdzono zwiększenie deformacji – rys. 7. Postać drgań miała rząd zbliżony do pierwszego – rys. 7a, a dla wybranych położen wirnika do drugiego – rys. 7b. Znacznie większe wartości deformacji zaobserwowano dla modelu B – rys. 8.

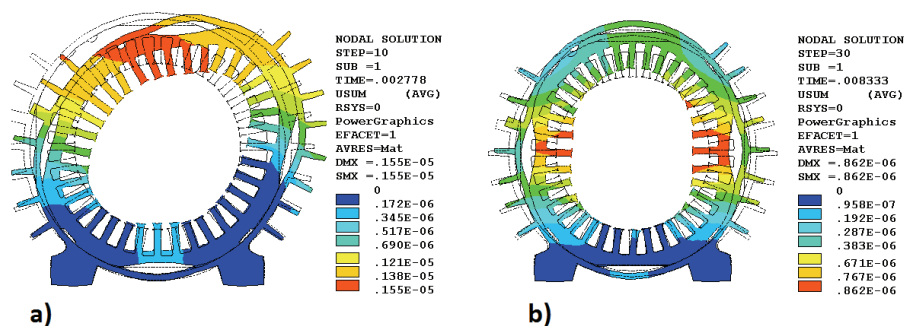


Rys. 5. Rozkład sił magnetycznych F[N] dla wybranego położenia wirnika dla modelu: a) o jednakowym poziomie namagnesowania; b) dla modelu A

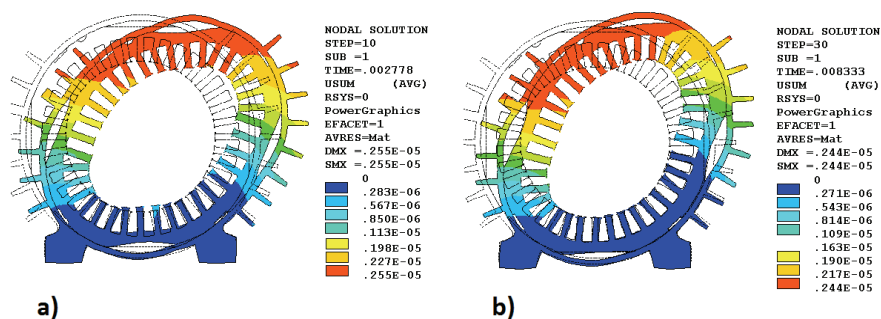
Fig. 6. Spatial distribution of magnetic forces F[N] for model with: a) equal magnetization; b) uneven magnetization for model A



Rys. 6. Rozkład przestrzenny dla modelu A: a) indukcji B [T] w środku szczeliny powietrznej;
 b) sił magnetycznych F [N] działających na wirnik
 Fig.6. Spatial distribution for model A: a) induction B [T] in the middle of air-gap;
 b) magnetic forces F [N] acting on rotor



Rys. 7. Postać deformacji U [m] stojana dla modelu A dla wybranych położeń wirnika:
 a) o 10 stopień; b) 30 stopni
 Fig. 7. Shape of deformation of stator U [m] for model A for selected positions of rotor:
 a) 10 degree; b) 30 degree



Rys. 8. Postać deformacji U [m] stojana dla modelu B dla wybranych położeń wirnika:
 a) 10 stopni; b) 30 stopni
 Fig. 8. Shape of deformation of stator structure U [m] for model B for selected positions of rotor:
 a) 10 degree; b) 30 degree

3. WNIOSKI

Na podstawie badań numerycznych można przyjąć hipotezę, że ekscentryczność statyczna wirnika i nierównomierne namagnesowanie magnesów mają istotny wpływ na wielkość i postacie drgań stojana. W przyszłości badania numeryczne rozszerzone zostaną na analizy pomiarowe.

LITERATURA

- [1] JANG G.H., CHANG J.H., *Numerical analysis of the electromechanically coupled magnetic field in brushless DC motors*, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2001, 226–230, 1223–1225.
- [2] RAHMAN B.S., LIEU D.K., *The origin of permanent magnet induced vibration in Electric Machines*, Journal of Vibration and Acoustic, October 1991, Vol. 113.
- [3] KIM U., LIEU D.K., *Effects of magnetically induced vibration force in Brushless Permanent-Magnet motors*, IEEE Transactions on Magnetics, June 2006, Vol. 41, No. 6.
- [4] JANG S.-M., CHO H.-W., CHO S.-K., *Analysis of unbalance force for high-speed slotless permanent magnet machine with Halbach Array*, IEEE Transactions on Magnetics, September 2003, Vol. 39, No. 5.
- [5] REZIG A., MEKIDECHE R., DJERDIR A., *Impact of eccentricity and demagnetization faults on magnetic noise generation in Brushless Permanent Magnet DC Motors*, Journal of Electrical & Technology, 2011, Vol. 6, No. 3, 356–363.
- [6] EWERT P., ZAWILAK T., *Zastosowanie modelu polowo-obwodowego do monitorowania ekscentryczności silników indukcyjnych*, Zeszyty Problemowe, Maszyny Elektryczne, Nr 87/2010.
- [7] PODHAJECKI J., MŁOT A., KORKOSZ M., *Analiza drgań stojana silnika BLDC pochodzenia magnetycznego*, Zeszyty Problemowe, Maszyn Elektrycznych, 84/2009, 191–196, Komel.

INFLUENCE STATIC ECCENTRICITY AND UNEVEN MAGNETIZATION ON FORM OF DEFORMATION STATOR IN BLDC MOTOR

This article presents influence static eccentricity and uneven magnetization of the rotor on value and form of the stator deformation of Brushless Direct Current Motor (BLDC) with permanent magnets due to magnetic forces. Numerical calculations were performed for selected causes of static eccentricity and uneven magnetization of the magnets.