

Zastosowanie sygnału napięciowego w detekcji uszkodzeń bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi

Streszczenie. W pracy zamieszczono wyniki analizy sygnału napięciowego wykorzystanego do wykrywania stanów pracy awaryjnej bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi. Dokonano analizy dwóch stanów awaryjnych tj. stanu częściowego zwarcia zwojowego oraz przerwy w jednej z faz silnika. Przeprowadzono analizę numeryczną oraz dokonano weryfikacji laboratoryjnej. Wykazano, że zastosowanie analizy sygnału napięciowego pozwala na wykrywanie wybranych stanów pracy awaryjnej bezszczotkowej maszyny z magnesami trwałymi.

Abstract. In the paper the results of the voltage signal analysis used to detect the fault states of a brushless permanent magnet motor are presented. An analysis of chosen fault states, i.e., partial short-circuit and open-circuit, was performed in one phase of the motor. Numerical analysis and laboratory verification was performed. Demonstrated that using voltage signal analysis allows to detect selected fault states of a brushless permanent magnet motor. (**Application of a voltage signal in fault detection of a brushless permanent motor**).

Słowa kluczowe: bezszczotkowy silnik z magnesami trwałymi, BLPMM, diagnostyka, stany awaryjne, sygnał napięciowy.

Keywords: brushless permanent magnet motor, BLPMM, diagnostics, failure states, voltage signal.

Wstęp

Bezczotkowe silniki z magnesami trwałymi (BLPMM) są bardzo atrakcyjne z uwagi na dużą sprawność przetwarzania energii. Jednak jak w innych silnikach elektrycznych mogą ulegać uszkodzeniu. Z uwagi na specyfikę tych silników wymagają one stosowania przekształtników. Dodatkowo wymagają one informacji o położeniu wirnika. To powoduje, że potencjalne uszkodzenia można podzielić na uszkodzenia wewnętrzne i zewnętrzne. Do uszkodzeń wewnętrznych zaliczamy uszkodzenia w samym silniku. Wszystkie pozostałe uszkodzenia można zaliczyć do uszkodzeń zewnętrznych.

Praca koncentruje się na analizie wybranych uszkodzeń wewnętrznych. typowymi uszkodzeniami wewnętrznymi są częściowe zwarcia zwojowe oraz przerwy w jednej z faz silnika [1-3]. Do analizy stanu częściowego zwarcia zwojowego są stosowane różne podejścia [4-9]. Metoda MCSA jest typową metodą stosowaną w silnikach indukcyjnych [10-12]. Jest to podejście prądowe. Alternatywnie stosuje się również podejście napięciowe w odniesieniu do przypadku kiedy dostępny jest punkt neutralny uzwojenia silnika [13,14]. Podejście napięciowe wykorzystujące punkt neutralny uzwojeń jest bardzo dobrym podejściem. Wymaga ono niestety dostępności punktu neutralnego uzwojenia. Dodatkowo jest ono ograniczone tylko do konfiguracji w gwiazdę. Nie ma ono zastosowania dla konfiguracji w trójkąt.

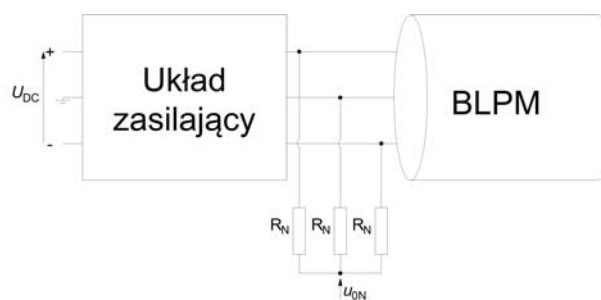
Zastosowanie analizy zaproponowanego sygnału napięciowego zdaniem autorów pozwala na wykrywanie stanów pracy awaryjnej silnika [15]. Metoda pozwala na wykrywanie częściowego zwarcia zwojowego czy też przerwy niezależnie od rodzaju konfiguracji uzwojenia.

W pracy porównano wyniki analizy harmonicznej sygnału napięciowego silnika przy połączeniu uzwojenia stojana w trójkąt z uwzględnieniem stanu obciążenia. Zostały zamieszczone wnioski dotyczące zaproponowanej metody detekcji uszkodzeń bezszczotkowego silnika z magnesami trwałymi.

Informacje techniczne dotyczące metody diagnostycznej

W bezczujnikowej detekcji położenia wirnika bardzo często wykorzystuje się potencjał neutralny napięcia indukowanego [16]. Sygnał napięciowy potencjału neutralnego można wykorzystać do wykrywania np. awaryjnych stanów pracy silnika BLPMM [17]. Na rysunku 1

pokazano schemat blokowy układu napędowego z zaznaczeniem miejsca detekcji sygnału diagnostycznego. Analizowana metoda jest niezależna od sposobu konfiguracji uzwojeń silnika. Jest to jej istotną zaletą.



Rys. 1. Schemat blokowy układu napędowego z zaznaczonym miejscem detekcji sygnału napięciowego



Rys. 2. Rzeczywisty model badanego silnika

Tabela 1. Wybrane parametry analizy silnika BLPMM

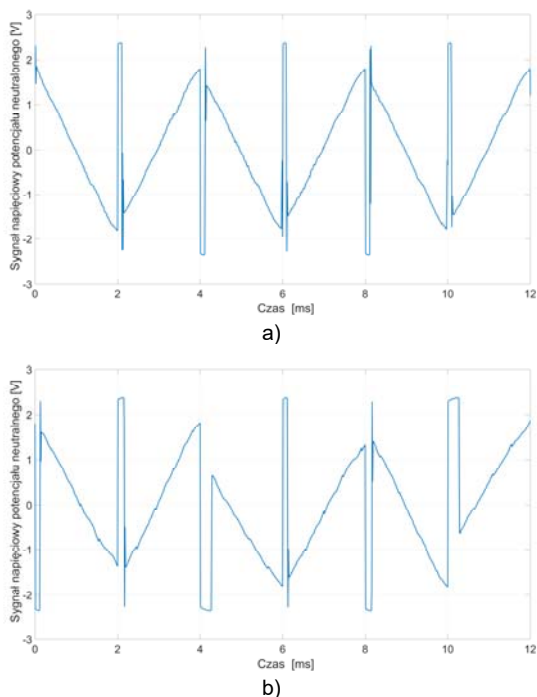
Parametr	Wartość	Jednostka
Liczba żłobków	24	-
Liczba biegunów	20	-
Moment znamionowy	4	N·m
Magnes	N48SH	-
Liczba zwojów na żłobek	30	-
Warstwa uzwojeń	Dwuwarstwowe	-
Poskok uzwojeń	1	-
Konfiguracja uzwojeń	Trójkąt	-
Liczba zwartych zwojów uzwojenia	25	%

Do testów zastosowano silnik BLPM. Na Fig.2 pokazano model fizyczny badanego silnika. Wybrane parametry silnika pokazano w Tabeli 1.

Sygnal diagnostyczny (Rys.1) jest niezależny od sposobu konfiguracji uzwojeń silnika. Jest to istotną zaletą analizowanej metody diagnostycznej. W przypadku symetrii od strony zasilania jak i samego silnika wartość skuteczna sygnału diagnostycznego u_N jest praktycznie równa zero. W sygnale diagnostycznym powinna pojawić się trzecia harmoniczna napięcia indukowanego oraz jej nieparzyste wielokrotności (3-cia, 9-ta, itd.). Podstawowa częstotliwość f_1 sygnału diagnostycznego jest uzależniona od liczby par biegunów p oraz prędkości obrotowej n :

$$(1) \quad f_1 = \frac{n \cdot p}{60}$$

Wartości amplitud harmonicznnych zależą od stanu obciążenia silnika. Jednak zmiana stanu obciążenia silnika nie wpływa na pojawienie się innych harmonicznnych czy też wzrost wartości skutecznej napięcia sygnału diagnostycznego. Pojawienie się jakiegokolwiek niesymetrii zmienia przebieg sygnału napięciowego. Na rysunku 3 pokazano sygnał napięciowy w stanie pracy symetrycznej oraz wybranego przypadku pracy niesymetrycznej.



Rys.3. Sygnal diagnostyczny w a) warunkach pracy symetrycznej, b) pracy niesymetrycznej

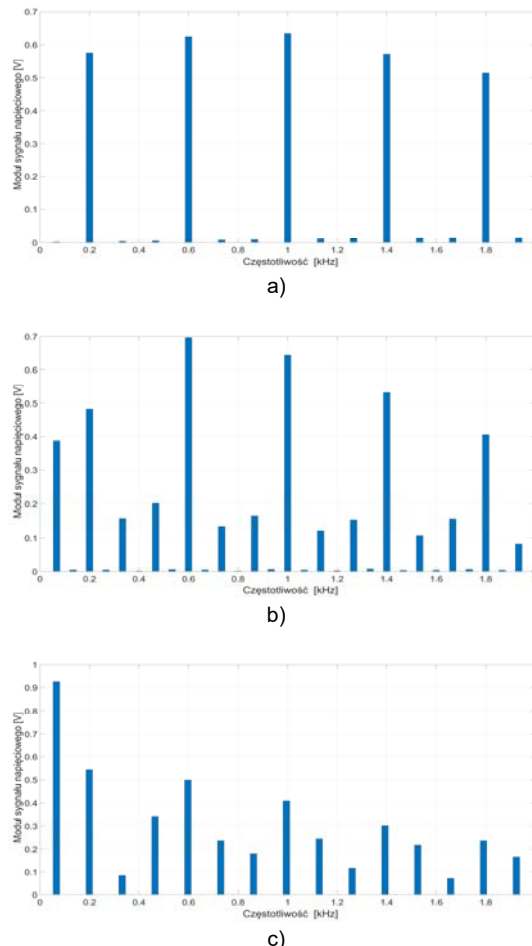
Obliczenia numeryczne

W środowisku programu Ansys Electronics został zbudowany model numeryczny pozwalający na realizację nietypowych warunków pracy silnika. Na bazie zbudowanego modelu połowo-obwodowego zostały przeprowadzone obliczenia numeryczne. Analizowano trzy przypadki:

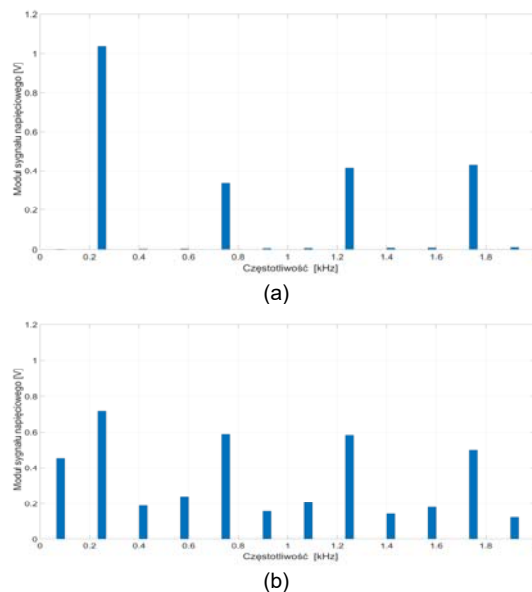
- symetria (sym),
- częściowo otwarty obwód (sc),
- otwarty obwód (oc).

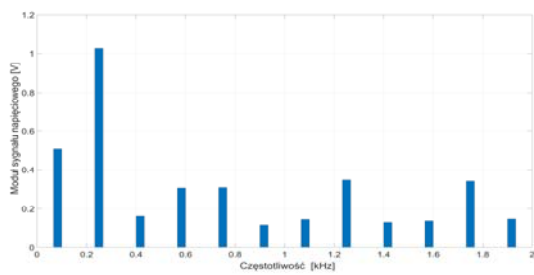
Dla w/w przypadków analizowano wpływ obciążenia pod kątem oceny proponowanej metody diagnostycznej. Dla stanu SC analizowano zwarcie 25% zwojów (30 z 120). Badania przeprowadzono przy obniżonej prędkości obrotowej z uwagi na weryfikację laboratoryjną stanu SC.

Rozkład harmonicznnych sygnału diagnostycznego u_{0N} dla wybranych punktów pracy (400 obr/min, 500 obr/min and 590 obr/min) pokazano na Rys.4-6. Analizowany zakres zmian prędkości obrotowej odzwierciedla charakterystykę naturalną badanego silnika BLPMM. Przy prędkości 590 obr/min silnik pracuje praktycznie na biegu jałowym. Pełne obciążenie występuje przy prędkości 400 obr/min w warunkach pełnej symetrii (sterowania i samego silnika).

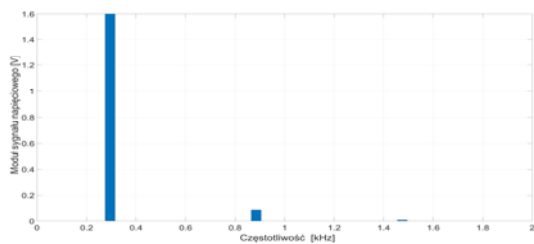


Rys.4. Analiza FFT sygnału u_{0N} dla 400 obr/min a) symetria, b) sc, c) oc

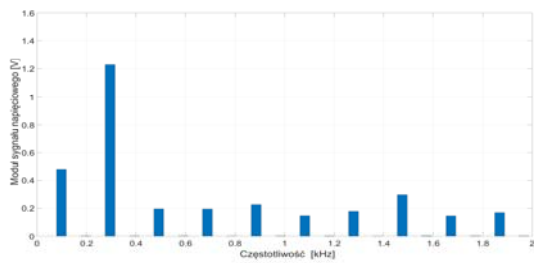




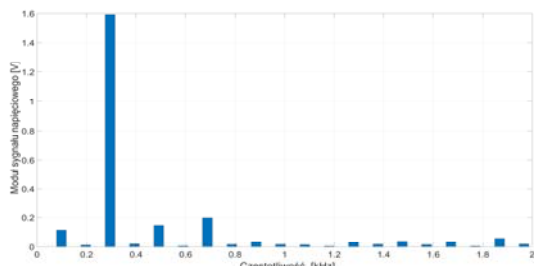
(c)

Rys.5. Analiza FFT sygnału u_{0N} dla 500 obr/min a) symetria, b) sc, c) oc

(a)



(b)



(c)

Fig.6. Analiza FFT sygnału u_{0N} dla 590 obr/min a) symetria, b) sc, c) oc

Analizując wyniki badań numerycznych można zauważyć, że zmiana obciążenia wpływa na zmianę rozkładu harmonicznego sygnału diagnostycznego. W odniesieniu do harmonicznego 3-ciej jej wartość ulega zmniejszeniu po wzroście obciążenia. Natomiast jej nieparzyste wielokrotności (9-ta, 15-sta itd.) ulegają zwiększeniu po wzroście obciążenia. Podobna tendencja jest również zauważalna dla stanów SC i OC w odniesieniu do harmonicznego 9-ta, 15-sta itd. Inaczej wygląda zmiana zawartości 1-szej harmonicznego stanu SC. Dla stanu SC harmoniczna diagnostyczna (f_1) praktycznie nie zależy od stanu obciążenia. Dla stanu SC oprócz harmonicznego 1-szej pojawiają się dodatkowo inne harmoniczne nieparzyste np. 5-ta, 7-ta itd. W przypadku tych harmonicznych nie można jednoznacznie wskazać wpływu obciążenia na zmianę ich amplitudy. W stanie OC występuje wyraźna tendencja uzależniająca 1-szą harmoniczną od obciążenia. Wzrost obciążenia powoduje wzrost 1-szej harmonicznego sygnału diagnostycznego. W odniesieniu do pozostałych harmonicznych nieparzystych np. 7-ma harmoniczna ulega

zmniejszeniu przy zmniejszaniu obciążenia. W odniesieniu do pozostałych harmonicznych nie można określić wpływu obciążenia na wartości amplitudy. Wartość pierwszej harmonicznego diagnostycznej stanu SC zależy od liczby zwartych zwojów. Wraz ze wzrostem liczby zwartych zwojów wzrasta wartość pierwszej harmonicznego. W odniesieniu do stanu OC (brak jednej fazy) należy zauważyć, że nie jest możliwe pełne obciążenie silnika. Konfiguracja uzwojenia w trójkąt pozwala obciążyć silnik do około 55% wartości momentu znamionowego. Wartość RMS sygnału diagnostycznego u_{0N} zamieszczono w Tabeli II.

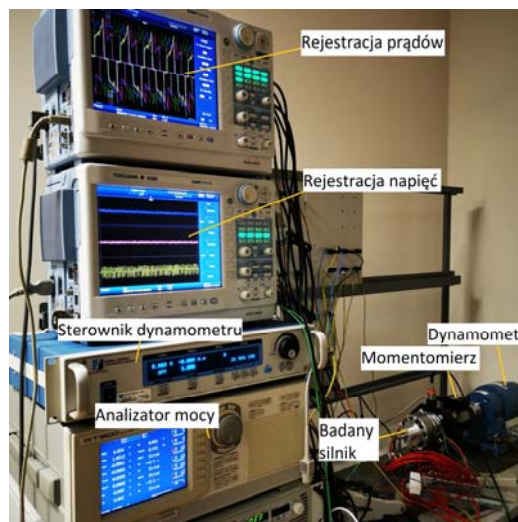
Tabela 2. Wartość skuteczna sygnału diagnostycznego u_{0N}

Prędkość [obr/min]	SYM [mV]	SC [mV]	OC [mV]
400	1073	1104	1207
450	1091	1134	1174
500	1135	1187	1161
550	1178	1198	1199
590	1234	1234	1239

Analizując zawartość Tabeli II można jednoznacznie stwierdzić, że wartość RMS sygnału u_{0N} nie pozwala jednoznacznie zidentyfikować żadnego z analizowanych stanów awaryjnych silnika BLPMM.

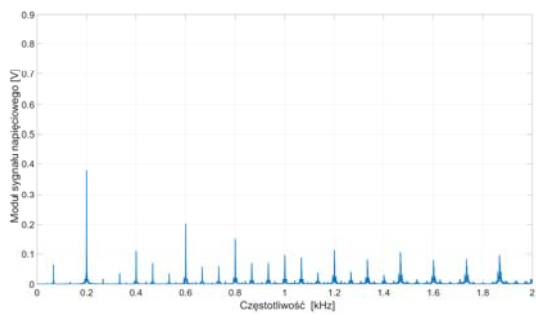
Testy laboratoryjne

W warunkach laboratoryjnych przeprowadzono weryfikację obliczeń numerycznych. Na Rys. 7 zaprezentowane jest stanowisko laboratoryjne do badań maszyny BLPMM. Pozwala ono na rejestrację przebiegów czasowych prądów i napięć badanego silnika dla analizowanych stanów pracy. Zastosowany dynamometr pozwala precyzyjnie ustawiać wymaganą wartość momentu obciążenia badanego silnika. W warunkach laboratoryjnych uzyskano zbliżone warunki pracy silnika jak w badaniach numerycznych (Rys.4-6).

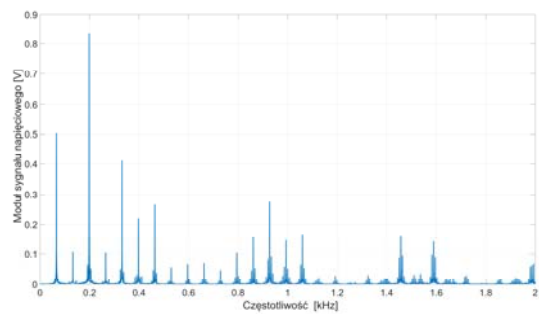


Rys. 7. Stanowisko laboratoryjne do testów maszyny BLPMM

Na Rys. 8-10 pokazano zawartość wyższych harmonicznych sygnału diagnostycznego. Na Rys. 9 pokazano wyniki badań uzyskane przy prędkości 500 obr/min. Odpowiada to pracy z 50% obciążeniem momentem znamionowym. Stan pracy z niewielkim obciążeniem pokazano na Rys.10.

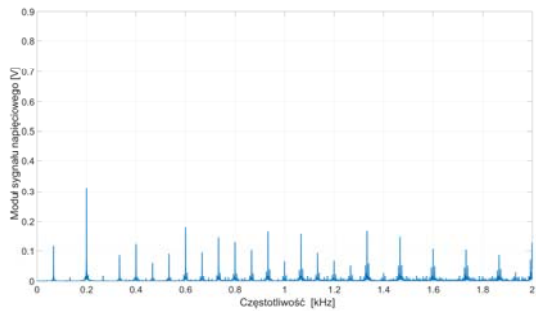


(a)

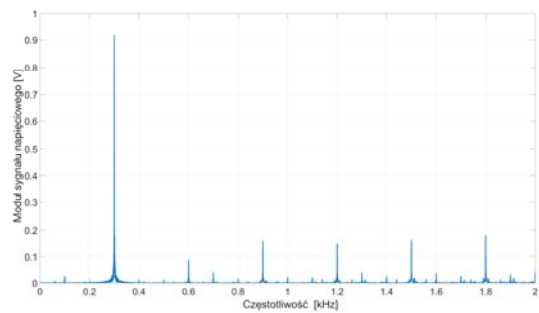


(c)

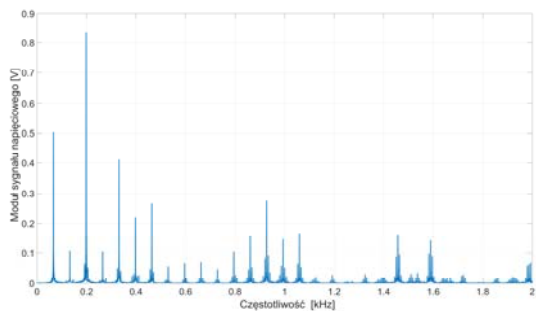
Rys. 9. Testy laboratoryjne – analiza FFT sygnału u_{0N} dla 500 obr/min a) symetria, b) sc, c) oc



(b)

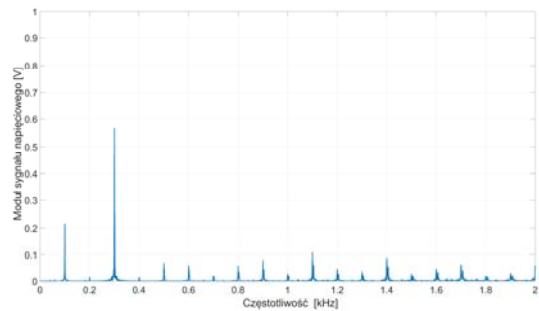


(a)

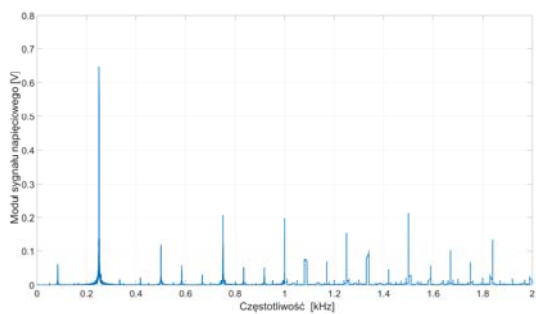


(c)

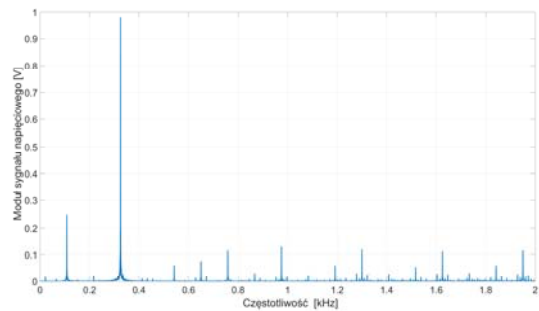
Fig. 8. Testy laboratoryjne – analiza FFT sygnału u_{0N} dla 400 obr/min a) symetria, b) sc, c) oc



(b)

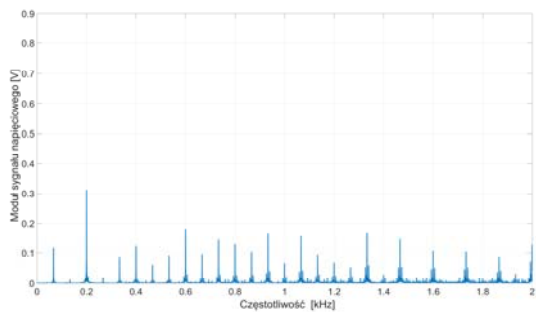


(a)



(c)

Rys.10. Testy laboratoryjne – analiza FFT sygnału u_{0N} dla 600 obr/min a) symetria, b) sc, c) oc



(b)

Wyniki badań laboratoryjnych potwierdzają skuteczność analizowanej metody diagnostycznej. Częstotliwość diagnostyczna f_1 występuje niezależnie od punktu pracy silnika. Jednocześnie widać, że w warunkach rzeczywistych pojawiają się pewne harmoniczne parzyste. Nie jest to błąd metody. Pojawienie się 1-szej harmonicznej warunkach symetrii sterowania wskazuje, że rzeczywisty model posiada pewną wewnętrzną asymetrię elektryczną i magnetyczną. Harmoniczne 6-ta, 12-ta i 18-ta są związane z istniejącą ekscentrycznością wirnika.

Podsumowanie

Zastosowanie napięciowego sygnału diagnostycznego pozwala z powodzeniem wykrywać typowe stany pracy awaryjnej takie jak częściowe zwarcia zwojowe czy też przerwy w maszynie. Zamieszczone wyniki dotyczą silnika z uzwojeniem połączonym w trójkąt. Oznacza to, że metodę diagnostyczną można zastosować do dowolnej konfiguracji uzwojeń silnika BLPM. Metoda wykrywa analizowane uszkodzenia niezależnie od wartości momentu obciążenia. Testy laboratoryjne wskazują, że napięciowy sygnał diagnostyczny można zastosować do wykrywania również innych uszkodzeń np. ekscentryczności wirnika. Będzie to tematem dalszych prac badawczych.

Finansowanie: Badania te są finansowane w części ze środków statutowych (UPB) Katedry Elektrodynamiki i Układów Elektrycznych Maszyn Politechniki Rzeszowskiej oraz w części przez Ministra Edukacji i Nauki RP w ramach „Regionalnej Inicjatywy Doskonałości”. ” program na lata 2019-2023. Numer projektu 027/RID/2018/19, przyznana kwota 11 999 900 zł.

Podziękowanie: Podziękowania dla mgr inż. Bartłomieja Pakli za konsultacje techniczne przy tej publikacji.

Artykuł jest publikacją pokonferencyjną z Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2022.

Autorzy: dr hab. inż. Mariusz Korkosz, prof. PRz, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Zakład Elektrodynamiki i Systemów Elektromaszynowych, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów, e-mail: mkosz@prz.edu.pl; mgr inż. Krystyna Krzywdzińska-Kornak, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Zakład Elektrodynamiki i Systemów Elektromaszynowych, ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów, e-mail: krzywdzinska@prz.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Wang X., Wang Z., Xu Z., Cheng M., Wang W., Hu Y., Comprehensive Diagnosis and Tolerance Strategies for Electrical Faults and Sensor Faults in Dual Three-Phase PMSM Drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34 (2019), no. 7, 6669–6684, DOI: 10.1109/TPEL.2018.2876400.
- [2] Kim T., Lee H., Kwak S., The Internal Fault Analysis of Brushless DC Motors Based on the Winding Function Theory, *IEEE Transactions on Magnetics*, 45 (2009), no. 5, 2090–2096, DOI: 10.1109/TMAG.2009.2013246.
- [3] Bouabid N., Moussa M.-A., Maouche Y., Khezzar A., The effect of closed loop control on diagnostic indices in different faults of squirrel cage induction motor, *Archives of Electrical Engineering*, 70 (2021) no. 4, 943–958, DOI: 10.24425/ae.2021.138271.
- [4] Wolkiewicz M., Tarchała G., Orłowska-Kowalska T., Kowalski C. T., Online Stator Interturn Short Circuits Monitoring in the DFOC Induction-Motor Drive, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63 (2016), no. 4, 2517–2528, DOI: 10.1109/TIE.2016.2520902.
- [5] Ebrahimi B. M., Faiz J., Feature Extraction for Short-Circuit Fault Detection in Permanent-Magnet Synchronous Motors Using Stator-Current Monitoring, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25 (2010), no. 10, 2673–2682, DOI: 10.1109/TPEL.2010.2050496.
- [6] Eftekhari M., Moallem M., Sadri S., Hsieh M., Online Detection of Induction Motor's Stator Winding Short-Circuit Faults, *IEEE Systems Journal*, 8 (2014), no. 4, 1272–1282, DOI: 10.1109/JSYST.2013.2288172.
- [7] Awadallah M. A., Morcos M. M., Diagnosis of stator short circuits in brushless DC motors by monitoring phase Voltages, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 20 (2005), no. 1, 246–247, DOI: 10.1109/TEC.2004.841524.
- [8] Hang J., Ding S., Zhang J., Cheng M., Chen W., Wang Q., Detection of Interturn Short-Circuit Fault for PMSM With Simple Fault Indicator, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31 (2016), no. 4, 1697–1699, DOI: 10.1109/TEC.2016.2583780.
- [9] Toumi D., Boucherit M., Tadjine M., Observer-based fault diagnosis and field oriented fault tolerant control of induction motor with stator inter-turn fault, *Archives of Electrical Engineering*, 61 (2012), no. 2 June, pp. 165–188, DOI: 10.2478/v10171-012-0015-1.
- [10] Bellini A., Yazidi A., Filippetti F., Rossi C., Capolino G., High Frequency Resolution Techniques for Rotor Fault Detection of Induction Machines, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55 (2008), no. 12, 4200–4209, DOI: 10.1109/TIE.2008.2007004.
- [11] Jung J. -H., Lee J. -J., Kwon B. -H., Online Diagnosis of Induction Motors Using MCSA, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53 (2006), no. 6, 1842–1852, DOI: 10.1109/TIE.2006.885131.
- [12] Garcia-Bracamonte J. E., Ramirez-Cortes J. M., de Jesus Rangel-Magdaleno J., Gomez-Gil P., Peregrina-Barreto H., Alarcon-Aquino V., An Approach on MCSA-Based Fault Detection Using Independent Component Analysis and Neural Networks, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68 (2019), no. 5, 1353–1361, DOI: 10.1109/TIM.2019.2900143.
- [13] Van der Geest M., Polinder H., Ferreira J. A., Veltman A., Wolmarans J. J., Tsiara N., Analysis and Neutral Voltage-Based Detection of Interturn Faults in High-Speed Permanent-Magnet Machines With Parallel Strands, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62 (2015) no. 6, 3862–3873, DOI: 10.1109/TIE.2015.2402641.
- [14] Yang S. -C., Online Stator Turn Fault Detection for Inverter-Fed Electric Machines Using Neutral Point Voltages Difference, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52 (2016), no. 5, 4039–4049, DOI: 10.1109/TIA.2016.2582821.
- [15] Korkosz M., Prokop J., Pakla B., Bogusz P., Frequency analysis in fault detection of dual-channel BLDC motors with combined star-delta winding, *IET Electric Power Applications*, 15 (2021), no. 7, 824–836, DOI: 10.1049/elp2.12056.
- [16] Iwaji Y., Takahata R., Suzuki T., Aoyagi S., Position Sensorless Control Method at Zero-Speed Region for Permanent Magnet Synchronous Motors Using the Neutral Point Voltage of Stator Windings, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52 (2016), no. 5, 4020–4028, DOI: 10.1109/TIA.2016.2582118.
- [17] Yang S., Chen G., Jian D., On-Line Stator Open-Phase Fault Detection and Tolerant Control for Permanent Magnet Machines Using the Neutral Point Voltage, *IEEE Access*, 5 (2017), 1073–1082, DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2651113.