

Marcin Skóra, Czesław T. Kowalski
Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

ANALIZA WPŁYWU WYBRANYCH USZKODZEŃ STEROWNIKA SILNIKA PM BLDC NA WIDMA PRĄDÓW FAZOWYCH

INFLUENCE OF SELECTED FAULTS IN PM BLDC MOTOR DRIVER ON THE PHASE CURRENTS SPECTRUM

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizę wpływu wybranych uszkodzeń sterownika silnika PM BLDC. Przeprowadzono analizę porównawczą wpływu uszkodzeń tranzystorów i czujników położenia wirnika na widma prądów fazowych. Przedstawiono symptomy uszkodzeń specyficznych dla napędu PM BLDC przy wykorzystaniu widma FFT prądu stojana. Zaprezentowano wyniki wybranych badań eksperymentalnych oraz zbiorcze zestawienie zawartości charakterystycznej częstotliwości w widmie prądów fazowych. Omówiono analityczne podstawy tej analizy. Zebrane informacje (symptomy i ich ograniczenia stosowania) mogą zostać wykorzystane w systemach diagnostyki napędów.

Abstract: In this work an influence of selected faults in PM BLDC motor driver has been presented. An influence of rotor position sensor and transistors faults on the phase currents spectrum has been analyzed. Specific symptoms of the faults in PM BLDC drive has been presented, using the FFT spectrum of the stator current. The results of experimental studies have been summarized in the list of the contents of the characteristic frequencies in the phase currents spectrum. Analytical basis of this analysis has also been discussed. The collected information (symptoms and the limitations of use) could be used in motor drive diagnostic systems.

Słowa kluczowe: silnik PM BLDC, transformata Fouriera, analiza prądów fazowych, uszkodzenia
Keywords: PM BLDC motor, Fourier transform, phase currents analysis, faults

1. Wstęp

Rosnące wymagania co do sprawności silników elektrycznych powodują wzrost zainteresowania silnikami z magnesami trwałymi tzw. bezszczotkowymi prądu stałego (PM BLDC). Układy napędowe z tego typu silnikami znajdują coraz szersze zastosowanie w pojazdach elektrycznych, wózkach inwalidzkich, rowerkach elektrycznych, osprzęcie komputerowym. Integralną częścią takiego napędu jest dodatkowy układ energoelektroniczny pełniący funkcję komutatora elektronicznego oraz układ pomiaru położenia wirnika. Jednakże mimo zastosowania nowocześniejszych silników elektrycznych, lista potencjalnych problemów eksploatacyjnych nie ulega skróceniu, a wręcz się wydłuża, właśnie z powodu wzrostu skomplikowania budowy układu napędowego. Specyfika zastosowań napędów z silnikami BLDC wymaga, aby układy te były w dużym stopniu odporne na uszkodzenia. Stąd wynikają aktualne trendy badawcze związane z poszukiwaniami metod szybkiego wykrywania i kompensowania uszkodzeń występujących w tych napędach [1], [2], [3]. Uszkodzenia związane ze stojaniem (zwarcia zwojowe, uszkodzenia izolacji) oraz mechaniczne związane z łożyskami,

nieosiowością i ekscentrycznością, mające taki sam charakter jak w silnikach indukcyjnych, są dobrze rozpoznane i opisane [4]. W napędach z silnikami BLDC mogą wystąpić dodatkowo uszkodzenia związane z komutatorem energoelektronicznym (zwarcie lub brak przewodzenia tranzystorów) [5] oraz czujników położenia wirnika [6], [7]. Istnieje również ryzyko odklejenia się magnesów od wirnika oraz ich odmagnesowania [8] w wyniku zbyt wysokiej temperatury lub przekroczonego natężenia prądu pracy [2].

Wykrywanie i kompensowanie uszkodzeń specyficznych dla napędów z silnikami BLDC wiąże się z poszukiwaniami metod diagnostycznych dostarczających wiarygodnych symptomów uszkodzeń, umożliwiających szybką identyfikację i lokalizację uszkodzenia oraz podjęcia działań kompensujących typu: rekonfiguracja sprzętowa lub programowa, przejście do pracy bezczujnikowej lub bezpieczne zatrzymanie napędu.

W artykule przedstawiono analizę wykrywania symptomów uszkodzeń specyficznych dla napędu BLDC przy wykorzystaniu widma FFT prądu stojana. Omówiono analitycznie i eksperymentalnie wpływ wybranych uszkodzeń na

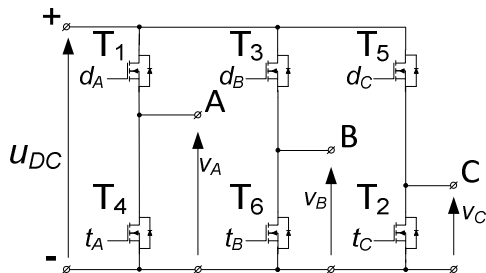
zawartość charakterystycznych częstotliwości w widmie prądów fazowych.

2. Układ sterowania silnikiem PM BLDC

Do wyznaczania pozycji wirnika, na potrzeby procesu komutacji, w silnikach PM BLDC wystarczy zgrubna informacja, tj. w którym sektorze znajduje się wirnik. Do tego zadania często używane są czujniki położenia wirnika (CPW), optyczne lub hallotronowe [9]. Badany trójfazowy silnik PM BLDC (typu Parvalux PBL86-118), wyposażony jest w trzy czujniki hallotronowe do wyznaczania pozycji wirnika. Komutator elektroniczny (rys. 1) sterowany był w sposób klasyczny – blokowy [10], [11], zgodnie z zależnościami (1), wszystkie tranzystory pełniły rolę komutacyjną, a dodatkowo tranzystory grupy górnej (T_1, T_3, T_5) – również regulacyjną.

$$\begin{aligned} d_A &= (H_A \cap \bar{H}_B) \cdot D & t_A &= \bar{H}_A \cap H_B \\ d_B &= (H_B \cap \bar{H}_C) \cdot D & t_B &= \bar{H}_B \cap H_C \\ d_C &= (H_C \cap \bar{H}_A) \cdot D & t_C &= \bar{H}_C \cap H_A \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: d_k – sygnały sterujące tranzystorami grupy górnej, t_k – sygnały sterujące tranzystorami grupy dolnej, H_k – logiczne sygnały z CPW, D – współczynnik wypełnienia impulsu, $k \in \{A, B, C\}$ – oznaczenie fazy, do której odnosi się sygnał.



Rys.

1. Komutator elektroniczny z sygnałami sterującymi

System sterujący, zrealizowany w procesorze sygnałowym DS1103, ma możliwość pracy w układzie otwartym (współczynnik D proporcjonalny do zadanej prędkości obrotowej) oraz w kaskadowym układzie regulacji (współczynnik D wypracowany przez regulator prądu). System sterujący dodatkowo wyposażono w możliwość symulowania stanów awaryjnych układu napędowego, polegających na braku przewodzenia wybranych tranzystorów (poprzez brak sterowania) oraz polegających na błędnym wskazywaniu pozycji przez wybrany CPW, niezależnie od rzeczywistego położenia

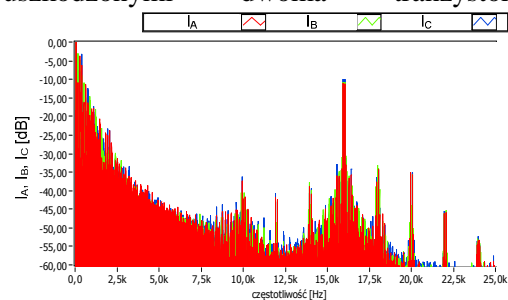
wirnika. Awaryje wielokrotne (wielu CPW), mieszane (jednocześnie tranzystorów i CPW), montaż CPW w nieprawidłowej kolejności nie będą rozpatrywane. W literaturze rozważano także przypadki nierównomiernego montażu CPW [12], [13] oraz przypadkowych zakłóceń ich pracy [14]. W celu rozróżniania rodzaju uszkodzeń wprowadzono zapis typu „ $H_A=1$ ”, który należy rozumieć, że czujnik fazy A zwraca stale wartość logiczną wysoką („1”) oraz „ $H_B=0$ ” – czujnik fazy B zwraca stale wartość logiczną niską („0”), itd.

3. Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne zrealizowano na stanowisku laboratoryjnym [11]. Do akwizycji danych i ich późniejszej analizy wykorzystano dodatkowy komputer z zainstalowanym oprogramowaniem LabView 2012 firmy National Instruments oraz czterokanałową kartą pomiarową NI USB-9162. W każdym przypadku do analizy rejestrowano przez 10 s przebiegi prądów fazowych w stanie ustalonym.

Opracowano wirtualny instrument do analizy czasowej i częstotliwościowej zebranych danych. Przykłady przebiegów prądowych i analizy hodografów wektora prądów fazowych przedstawiono we wcześniejszych pracach [7], [11], natomiast w tym artykule postanowiono skupić się na analizie widmowej prądów fazowych. Zarejestrowane przebiegi poddano transformacji Fouriera. Częstotliwość fali nośnej (kluczowania) modulatora PWM została zadana w procesorze sygnałowym jako $f_k=16$ kHz, natomiast częstotliwość próbkowania przez kartę pomiarową na 50 kHz, co pozwoliło obserwować częstotliwości do 25 kHz, zgodnie z twierdzeniem Kotielnikowa-Shannona, jak na przykładowym rysunku 2.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe przebiegi zarejestrowane w różnych przypadkach pracy napędu: gdy układ był sprawny, z uszkodzonym jednym tranzystorem, z uszkodzonym czujnikiem położenia wirnika oraz z uszkodzonymi dwoma tranzystorami

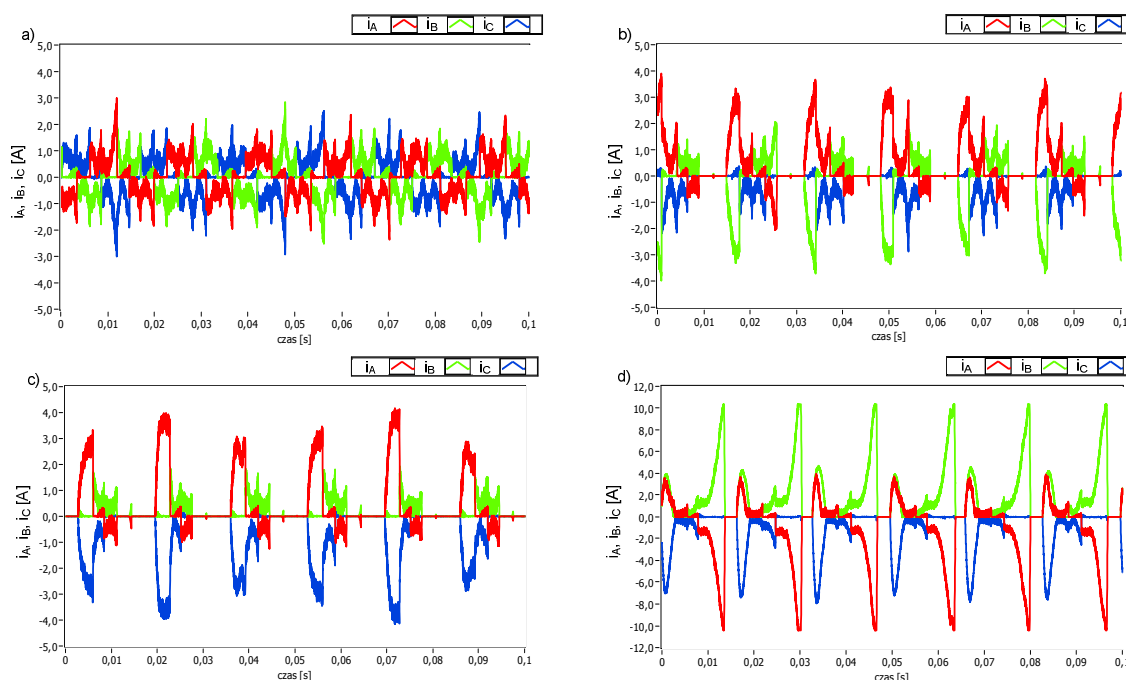


Rys.2. Widmo amplitudowe prądów fazowych (cały zakres)

(z różnych faz, jeden z grupy dolnej, jeden z grupy górnej; w tych samych fazach, którymi steruje czujnik poddawany symulowanemu awariom). Układ napędowy pracował w kaskadowej strukturze regulacji, z zadaną prędkością równą 30% prędkości znamionowej, przy obniżonym napięciu zasilania, obciążony oporami wbudowanej przekładni mechanicznej. Warto zauważyć, że przedstawione poniżej spostrzeżenia zaobserwowano również przy pracy pod obciążeniem oraz w układzie otwartym.

W idealnym przypadku, gdyby prądy fazowe przy zasilaniu blokowym miały kształt prostokątny, to ich widmo zawierałoby tylko nieparzyste wielokrotności (oprócz trzeciej i jej wielokrotności [15]) podstawowej harmonicznej f_1 , związanej z częstotliwością zasilania i określonej wg (3).

$$f_1 [\text{Hz}] = p \frac{n_m [\text{obr} / \text{min}]}{60} \quad (3)$$

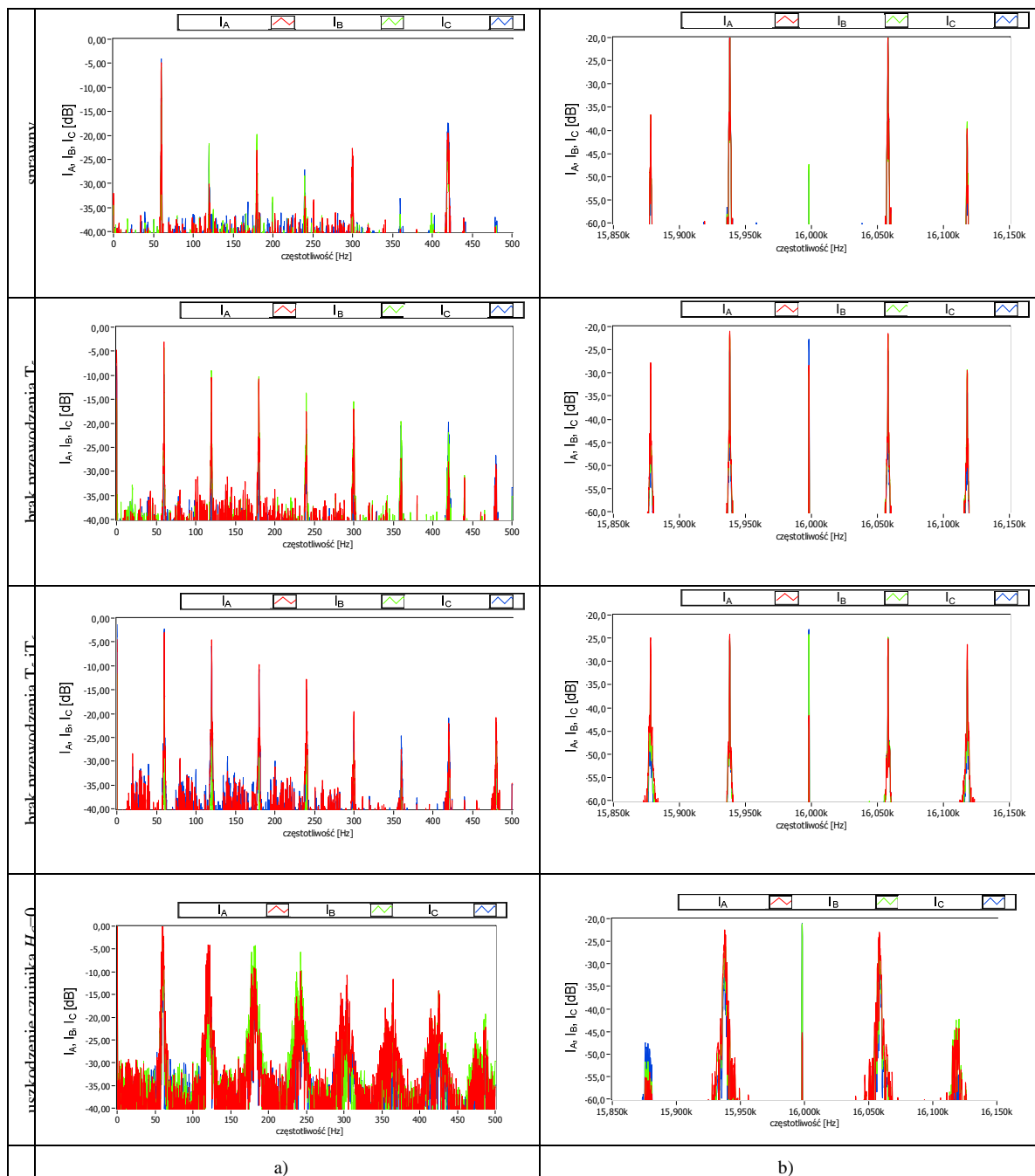


Rys.3. Przebiegi prądów fazowych w różnych stanach pracy napędu: a) sprawny układ, b) brak przewodzenia tranzystora T_5 , c) brak przewodzenia tranzystorów T_5 i T_6 , d) uszkodzenie czujnika $H_c=0$

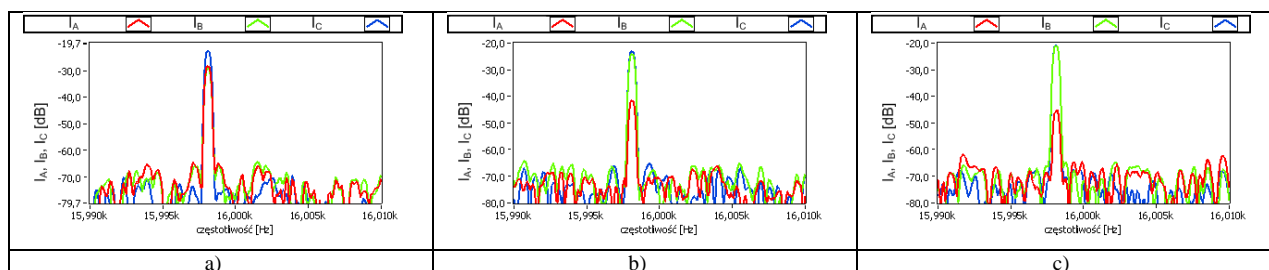
gdzie: n_m – prędkość obrotowa wirnika, p – liczba par biegunów.

Zaburzenie prądów fazowych, zwłaszcza przez awarie układu zasilania (tranzystorów) oraz czujników położenia wirnika, powoduje, że w widmach amplitudowych prądów fazowych pojawia się składowa stała, a parzyste wielokrotności podstawowej harmonicznej również pojawiają się lub zwiększają znacząco swoją amplitudę. Zostało to pokazane na rysunku 4a, zawierającym początkowe zakresy widm przykładowych przebiegów z rysunku 3. W przypadku pracy z uszkodzonym czujnikiem występuje trudność w utrzymaniu zadanej prędkości obrotowej, co skutkuje rozszerzeniem prążków w widmie prądów fazowych, które ponadto osiągają chwilowo znaczące amplitudy.

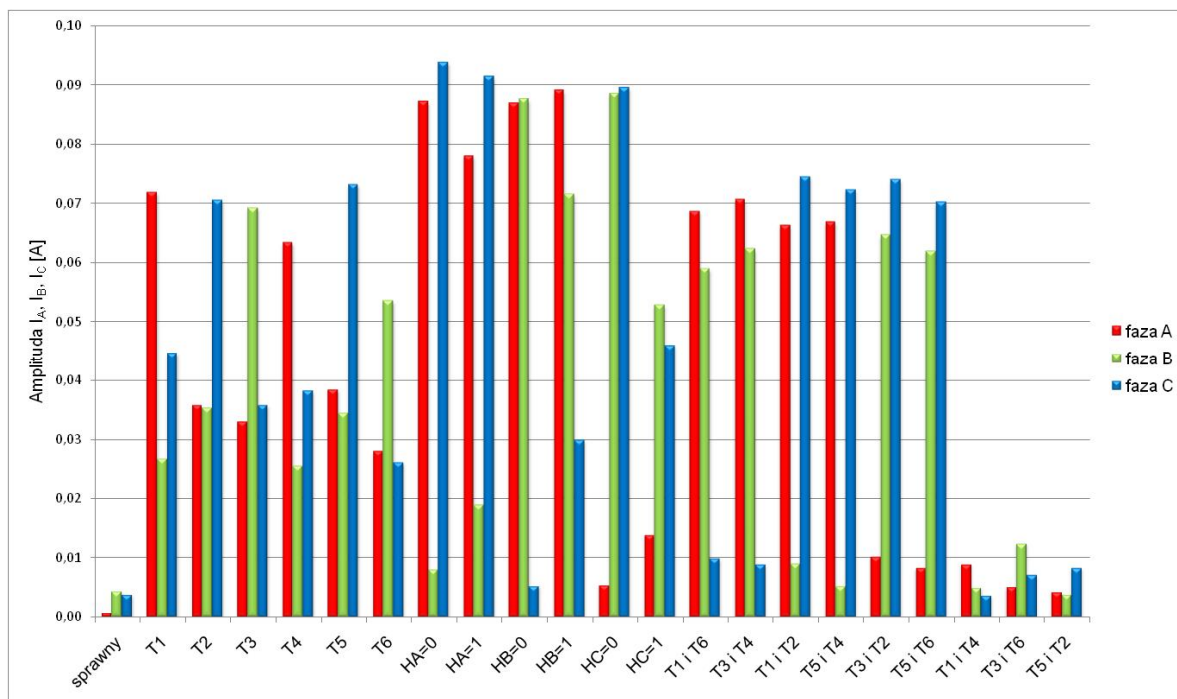
Stany awaryjne powstałe w trakcie ustalonej pracy napędu wpływają również na wartość średnią przebiegów prądowych, gdyż zaburzają w znaczący sposób symetrię układu zasilającego. Ma to swoje odzwierciedlenie także w widmie (rys. 4a).



Rys.4. Widma amplitudowe prądów fazowych w różnych stanach pracy napędu, a) obszar niskich częstotliwości, b) obszar wokół częstotliwości kluczowania $f_k = 16$ kHz



Rys.5. Zbliżenie na obszar wokół częstotliwości kluczowania $f_k = 16$ kHz w przypadku a) braku przewodzenia tranzystora T_5 , b) braku przewodzenia tranzystorów T_5 i T_6 , c) uszkodzenia czujnika $H_C=0$



Rys.6. Porównanie amplitud prądu częstotliwości $f_k = 16$ kHz dla różnych przypadków pracy (w podpisie podano oznaczenie uszkodzonego tranzystora bądź czujnika położenia wirnika)

Analizując cały dostępny zakres widma (np. rys. 2), można również zauważyć wyraźny wzrost modułu widma prądów fazowych przy częstotliwości kluczowania (16 kHz). Obszar ten, dla poszczególnych przypadków, pokazano dokładniej na rysunku 4b.

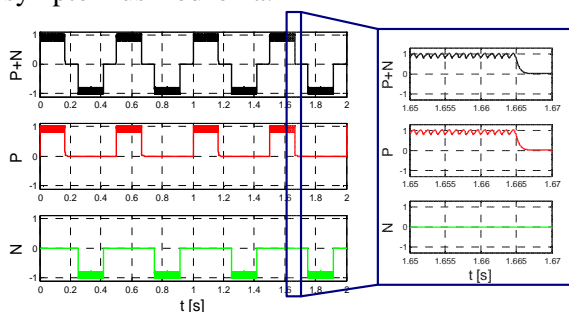
Szczegółowa analiza pozwala zauważyć, że w przypadku sprawnego układu zasilania, w żadnej z faz prawie nie występuje składowa o częstotliwości kluczowania f_k , wyraźne są za to prąki boczne o częstotliwościach $f_k \pm n \cdot f_i$, gdzie $n \in \{1, 2, 3, \dots\}$, zwłaszcza dla $n=1$. Odmienna sytuacja ma miejsce w widmie zarejestrowanym podczas pracy uszkodzonego układu. Na podstawie przykładów (rys. 5) można zauważyć pojawienie się (wyraźny wzrost) prąka o częstotliwości f_k , w jednej bądź kilku fazach. W dalszym ciągu obecne są prąki boczne $f_k \pm n \cdot f_i$.

Aby odnaleźć ewentualną prawidłowość opisującą pojawianie się prąka o częstotliwości f_k , zbadano szerokie spectrum przypadków pracy napędu: z uszkodzonym pojedynczym tranzystorem, z uszkodzoną parą tranzystorów, z uszkodzonym pojedynczym czujnikiem położenia wirnika, wskazującym ciągle logiczne zero lub logiczną jedynkę. Amplitudy prąka o częstotliwości f_k dla tych przypadków porów-

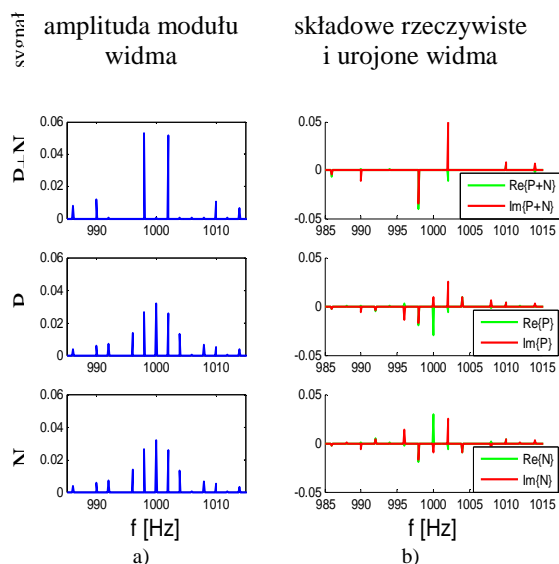
nano na rysunku 6. Na tej podstawie sformułowano hipotezę, iż pojawia się on i uzyskuje największą amplitudę podczas pracy uszkodzonego napędu, w tych fazach, w których bezpośrednio nastąpiło uszkodzenie. Możliwy jest wzrost jego amplitudy także w pozostałych fazach, lecz największy w uszkodzonej (jak np. na rys. 5 w przypadku braku sterowania tranzystora T_5).

Zjawisko to wynika ze sposobu sterowania i można spróbować je wytłumaczyć w następujący sposób. Prąd fazowy, przy klasycznym sterowaniu (blokowym) i wykorzystaniu metody PWM do regulacji średniego napięcia zasilania, zwłaszcza przy niskiej indukcyjności uzwojeń można opisać w przybliżony sposób jako iloczyn dwóch sygnałów – sygnału prostokątnego o częstotliwości podstawowej harmonicznej f_i wynikającego ze sterowania blokowego i sygnału prostokątnego o częstotliwości nośnej f_k wynikającego z metody PWM (rys. 7, dla lepszego zobrazowania przyjęto $f_i = 2$ Hz i $f_k = 1$ kHz). Widmo tego sygnału w dziedzinie częstotliwości będzie splotem widm sygnałów składowych. Z drugiej strony, sygnał ten można uznać jako sumę dwóch sygnałów (dodatniego P i ujemnego N, na rys. 7), prostokątnych, o amplitudach przeciwnych znaków, każdy wymnożony przez sygnał modulujący.

Moduły widm co prawda będą takie same dla części P i N, lecz różnice widoczne są podczas analizy składowych rzeczywistej i urojonej widm – są one przeciwnych znaków przy częstotliwości nośnej f_k (rys. 8). Po dodaniu do siebie składowych widm sygnałów P i N, wynikowe widmo nie zawiera już prążka o częstotliwości f_k . Jednakże, w niesprawnym układzie, wskutek np. nieprzewodzenia prądu przez tranzystor mocy, symetria zasilania zostaje zachwiana. Zmienia się udział części P i N w trakcie okresu pracy, stąd poszczególne składowe nie mogą się zbilansować. W widmach prądów fazowych pojawia się składowa o częstotliwości kluczkowania f_k , którą można traktować jako symptom uszkodzenia.



Rys. 7. Uproszczony przebieg prądowy i jego składowe



Rys. 8. Moduły widm uproszczonych przebiegów prądowych (a) oraz ich składowe rzeczywiste (Re) i urojone (Im) (b)

Metoda detekcji wybranych uszkodzeń na podstawie analizy amplitud prążka o częstotliwości f_k we wszystkich fazach, oprócz potencjalnego

zastosowania ma również ograniczenia. Pierwszym z nich jest konieczność próbkowania ze stosunkowo dużą częstotliwością, by uchwycić falę nośną, z reguły o częstotliwości z przedziału 10÷20 kHz. Obserwacja widma prądów fazowych w pobliżu częstotliwości kluczkowania nie sprawdzi się przy pełnym wysterowaniu kluczy komutatora.

Ponadto na jakość otrzymanych wyników ma wpływ utrzymanie stałej prędkości obrotowej i momentu oporowego przez okres badania. Może to być wadą, jednakże istnieją układy napędowe (jak np. napędy wentylatorów czy pomp), które pracują przy stałym obciążeniu, przez długie okresy ze stałą prędkością i zwłoka czasowa rzędu nawet 10s może wydawać się dopuszczalna. Dodatkowym atutem jest fakt, iż ważne systemy napędowe z reguły objęte są monitoringiem, by w porę zauważyć np. uszkodzenia łożysk, więc analizę kolejnej częstotliwości można by wykonać bez sporych dodatkowych nakładów finansowo-obliczeniowych.

Postawiona wcześniej hipoteza badawcza nie będzie zbyt przydatna w diagnostyce napędów o regulowanej (dynamicznie zmiennej) prędkości obrotowej, gdzie wymagany jest szybszy czas reakcji i większa niezawodność pracy napędu – jak np. w zastosowaniach trakcyjnych, w których silniki PM BLDC również sobie dobrze radzą. Pewnych trudności może dostarczać również fakt, iż jakościowe objawy niektórych awarii (brak przewodzenia dwóch tranzystorów, spowodowany ich awariami lub niewłaściwym sygnałem z czujnika, który odpowiada za ich sterowanie) są do siebie zbliżone, lecz tu do właściwej identyfikacji należałoby np. użyć dodatkowej informacji.

4. Podsumowanie

Specyfika zastosowań napędów z silnikami BLDC, a w szczególności zastosowania w pojazdach mobilnych, wymaga aby układy te były w dużym stopniu odporne na uszkodzenia. Szczególnie dotyczy to uszkodzeń związanych z komutatorem elektronicznym oraz czujnikami położenia wirnika. Szybkie wykrywanie, lokalizowanie i kompensowanie tych uszkodzeń umożliwiłoby bezpieczne przejście do innego trybu pracy lub spokojnego zatrzymania pojazdu. W artykule przedstawiono możliwość wykrywania symptomów interesujących uszkodzeń na podstawie charakterystycznych częstotliwości pojawiających się w widmie

prądu stojana. Przedstawione rozważania ogólne oraz wyniki badań eksperymentalnych wykazały, że ocena ilościowa tych symptomów może być podstawą metody diagnostycznej przydatnej do skutecznego wykrywania i oceny stanu technicznego komutatora elektronicznego oraz czujników położenia wirnika.

5. Literatura

- [1]. A. Tashakori, M. Ektesabi "Fault Diagnosis of In-wheel BLDC Motor Drive for Electric Vehicle Application", *IV Intelligent Vehicles Symposium*, str. 925-930, 2013.
- [2]. Yao Da, Xiaodong Shi, M. Krishnamurthy "Health monitoring, fault diagnosis and failure prognosis techniques for Brushless Permanent Magnet Machines", *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, str. 1-7, 2011.
- [3]. F. Meingue "Fault-tolerant permanent-magnet synchronous machine drives. Fault detection and isolation, control reconfiguration and design considerations", rozprawa doktorska, Bruksela 2012.
- [4]. Cz.T. Kowalski "Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji", Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2013.
- [5]. M.A. Awadallah, M.M. Morcos "Automatic Diagnosis and Location of Open-Switch Fault in Brushless DC Motor Drives Using Wavelets and Neuro-Fuzzy Systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. 1, str. 104-111, 2006.
- [6]. A. Tashakori, M. Ektesabi "A Simple Fault Tolerant Control System for Hall, Effect Sensors Failure of BLDC Motor", *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, str. 1011-1016, 2013.
- [7]. M. Skóra, Cz.T. Kowalski "Wpływ uszkodzeń czujników położenia wirnika na pracę napędu z silnikiem PM BLDC", *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*, nr 33, str. 357-366, 2013.
- [8]. S. Rajagopalan, W. Roux, T.G. Habetler, R.G. Harley "Dynamic Eccentricity and Demagnetized Rotor Magnet Detection in Trapezoidal Flux (Brushless DC) Motors Operating Under Different

Load Conditions", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, str. 2061-2069, 2007.

- [9]. K. Krykowski "Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym. Analiza, właściwości, modelowanie", Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [10]. A. Domoracki, K. Krykowski "Silniki BLDC – klasyczne metody sterowania", *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 72, str. 155-159, 2005.
- [11]. M. Skóra, Cz.T. Kowalski "Analiza wpływu uszkodzeń czujników na pracę napędu z silnikiem PM BLDC", *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, nr 104, str. 37-42, 2014.
- [12]. M. Gougani, M. Chapariha, J. Jatskevich, A. Davoudi "Hall sensor-based Locking Electric Differential System for BLDC motor driven electric vehicles", *IEEE International Electric Vehicle Conference*, str. 1-7, 2012.
- [13]. J. Hetmańczyk, A. Domoracki, K. Krykowski "3,6 kW DC brushless motor control system – the influence of position sensors fault on motion properties", *International Conference on Electrical Drives and Power Electronics EDPE 2003*, str. 534-538, 2003.
- [14]. E. Król, M. Maciążek "Wpływ algorytmu sterowania przekształtnika na właściwości napędu z silnikiem bezszczotkowym", *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, nr 1, str. 211-215, 2012.
- [15]. Ke Song, Weiguo Liu, Guangzhao Luo, Xiwei Zhou "Analysis of Current Waves and Faults Recognition in Rare Earth Permanent Magnet Brushless DC Motor", *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, str. 3481-3485, 2007.

Autorzy

mgr inż. Marcin Skóra,
e-mail: marcin.skora@pwr.edu.pl

dr hab. inż. Czesław T. Kowalski, prof. PWr.
e-mail: czeslaw.t.kowalski@pwr.edu.pl

Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych,
ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław