

# Analiza drgań w napędzie z silnikiem PM BLDC wywołanych uszkodzeniami sterownika

**Streszczenie.** Zastosowanie silników PM BLDC w coraz liczniejszych aplikacjach powoduje, że problem diagnostyki eksploatacyjnej ich stanu zyskuje na znaczeniu. Dlatego też celem jest podjęcie badań, które pozwolą na powiększenie wiedzy na temat zachowania się tych napędów w różnych stanach pracy, zwłaszcza awaryjnych. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych drgań wywołanych uszkodzeniami tranzystorów w komutatorze elektronicznym i czujnika położenia wirnika, zamontowanego w silniku. Na podstawie analiz widmowych sygnału z trójosiowego akcelerometru wskazano najkorzystniejszy kierunek pomiaru drgań oraz wyznaczono częstotliwości charakterystyczne, najbardziej zmieniające się pod wpływem uszkodzeń.

**Abstract.** This paper deals with the analysis of experimental tests of the PM BLDC motor drive vibration caused by faults of the controller transistors or position sensor faults. Basing on the spectral analysis of signal taken from a triaxial accelerometer, the most favorable direction of the vibration measurement has been determined. Besides, the characteristic frequencies dependent on the fault type have been appointed. (Analysis of vibrations caused by controller fault in PM BLDC motor drive).

**Słowa kluczowe:** silnik PM BLDC, uszkodzenia, drgania, analiza widmowa.

**Keywords:** PM BLDC motor, faults, vibrations, spectral analysis.

## Wstęp

Rosnące wymagania stawiane napędom elektrycznym stosowanym w przemyśle powodują wypieranie klasycznych silników prądu stałego przez silniki bezszczotkowe z magnesami trwałymi, tzw. PM BLDC (ang. Permanent Magnet Brushless DC Motors).

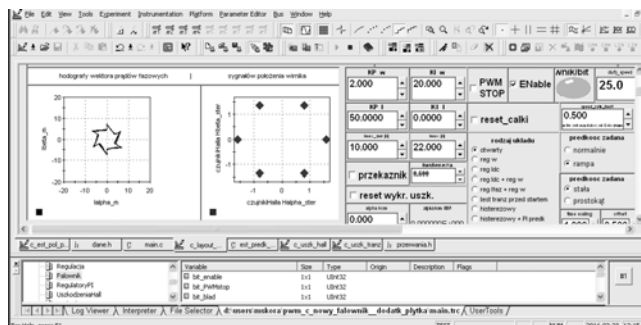
Wyeliminowanie mechanicznego komutatora i zwiększenie niezawodności pracy, wysoka sprawność oraz przystępne ceny sterowników energoelektrycznych powodują, że silniki PM BLDC są coraz częściej stosowane w różnorodnych nowoczesnych aplikacjach przemysłowych. Obecnie silniki te można spotkać w obrabiarkach numerycznych, robotach, sprężce komputerowym, w napędach pomp i wentylatorów. Coraz częściej używane są jako napędy pojazdów elektrycznych (rowerów, dronów, itp.). To szerokie zainteresowanie powoduje nacisk na producentów, aby projektowane silniki były zoptymalizowane pod względem ilości zużywanych materiałów, miały coraz mniejsze gabaryty, były ciche i odporne na drgania wywołane przez pole magnetyczne. Coraz ostrzejsze normy europejskie odnośnie hałasu i drgań powodują, że dąży się do ich minimalizacji poprzez odpowiednią konstrukcję. Ma to istotny wpływ na komfort użytkownika silnika.

W trakcie eksploatacji mogą pojawiać się uszkodzenia w układzie sterowania i w układach pomiarowych. Mają one istotny wpływ na pracę napędu. Ten wpływ objawia się również w postaci zwiększonego poziomu drgań mechanicznych. Aby możliwe było uodpornienie napędu na tego typu uszkodzenia, niezbędne jest szybkie ich zidentyfikowanie i zlokalizowanie, które umożliwi podjęcie działań kompensujących. Dlatego dokładne poznanie związków pojawiających się uszkodzeń z poziomem i kierunkiem pojawiających się drgań mechanicznych może być bardzo przydatne w monitorowaniu pracy napędu i działaniach diagnostycznych.

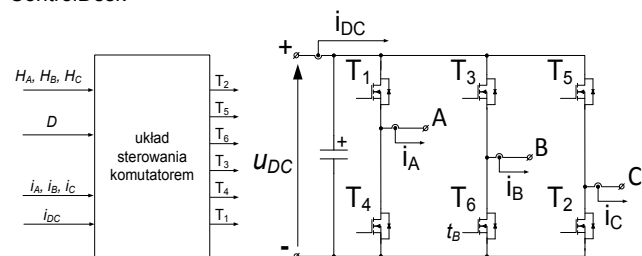
Dotychczasowa literatura dotycząca drgań w silnikach PM BLDC skupiała się na problemach konstrukcyjnych [1] oraz eksploatacyjnych, takich jak uszkodzenia łożysk, ekscentryczność wirnika, czy utrata właściwości magnesów trwałych [2][3]. Problematyka wpływu uszkodzeń sterownika na drgania mechaniczne silnika PM BLDC nie była poruszana. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych drgań wywołanych uszkodzeniami tranzystorów w komutatorze elektronicznym i czujnika położenia wirnika, zamontowanego w silniku.

## Opis stanowiska laboratoryjnego

Badanym obiektem jest trójfazowy silnik PM BLDC typu RTMct85-2,3 wykonany przez Instytut Elektrotechniki. W prezentowanych w artykule badaniach wykorzystano elementy opracowanego stanowiska laboratoryjnego [4], przeznaczanego do badań silników PM BLDC małej mocy: komutator elektroniczny z układem pomiarowym oraz program sterujący wykorzystujący procesor DSP typu DS1103 firmy dSpace GmbH. Oprogramowanie napisano w języku C, natomiast aplikację kontrolno-pomiarową utworzono w środowisku ControlDesk (rys. 1). Zasilanie badanego silnika pochodziło z zasilacza prądu stałego i wynosiło  $u_{DC} = 55$  V. Jest to wartość znacznie obniżona w stosunku do napięcia zasilającego w oryginalnym sterowniku, gdzie napięcie  $u_{DC}$  wynosiło ok. 220 V. Ograniczenie to wynika z budowy komutatora elektronicznego (topologia układu sterowania i komutatora na rysunku 2), który wykonano do zasilania silników niskonapięciowych.



Rys. 1. Główny ekran aplikacji kontrolnej utworzonej w programie ControlDesk



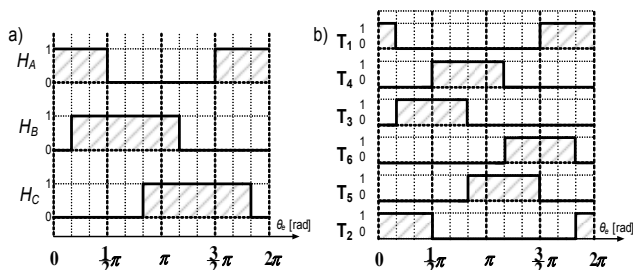
Rys. 2. Schemat komutatora elektronicznego i układu sterowania, z oznaczeniem tranzystorów i mierzonych sygnałów

Badany silnik wyposażony jest w zestaw trzech czujników hallotronowych, służących do wyznaczania pozycji wirnika (sektora, w którym znajduje się wirnik). Zestaw nie zawiera enkodera, stąd prędkość obrotowa wirnika wyznaczana jest w sposób pośredni, tj. na podstawie średniego czasu pomiędzy zboczami sygnałów  $H_A, H_B, H_C$  z czujników położenia. Alternatywnie, podczas analizy, do określania prędkości obrotowej mechanicznej  $n$  wykorzystywana jest informacja o podstawowej częstotliwości prądu fazowego  $f_s$  i o liczbie par biegunów  $p_b$ , zgodnie z zależnością (1). Silnik posiada  $N_s=18$  biegunów stojana,  $N_r=6$  biegunów wirnika ( $p_b=3$ ) oraz łożyska typu 6002Z.

$$(1) \quad n = 60 \cdot f_s / p_b$$

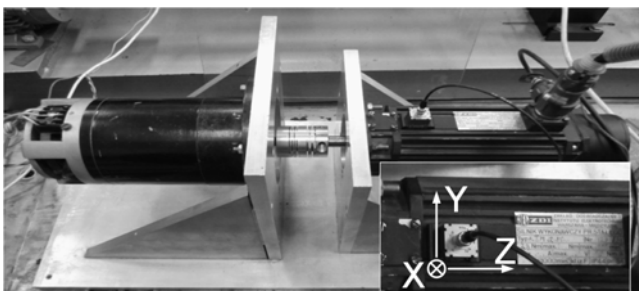
gdzie:  $n$  – prędkość obrotowa wirnika (mechaniczna) [obr/min],  $f_s$  – częstotliwość pierwszej harmonicznej prądów fazowych [Hz],  $p_b$  – liczba par biegunów.

W opracowanym sterowniku przyjęto blokowy sposób sterowania tranzystorami, w którym tranzystory załączane są zgodnie z położeniem wirnika kodowanym przez czujniki cyfrowe (rys. 3). Dodatkowo tranzystory grupy górnej (tj.  $T_1, T_3, T_5$ ) pełnią rolę regulacyjną i mogą być sterowane sygnałem PWM o wypełnieniu  $D$ . Badania przeprowadzono w otwartej pętli regulacji, aby wyeliminować potencjalny jej wpływ na otrzymane przebiegi i charakterystyki. Najważniejsza część programu (odczyt stanów czujników, pomiary prądów fazowych, wyznaczanie prędkości obrotowej i sterowanie tranzystorami) wykonywana jest z częstotliwością modulacji PWM. Stany awaryjne sterownika, będące przedmiotem badań, powstają na drodze programowej, bez fizycznego niszczenia elementów, poprzez brak sterowania tranzystorów i poprzez przyjęcie stałej wartości logicznej zamiast wartości zwracanej przez dany czujnik położenia wirnika.



Rys. 3. Przebieg sygnałów kodujących położenie wirnika a) oraz momentów załączania tranzystorów b) w funkcji położenia (elektrycznego) wirnika

Obciążeniem badanego silnika jest obcowzbudna maszyna prądu stałego, z regulowanym rezystorem mocy włączonym w obwód twornika. Całość połączona jest sprzęgłem mieszkowym. Wygląd zestawu laboratoryjnego przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wygląd badanego zestawu maszynowego z zaznaczeniem kierunku pomiarów czujnika drgań

Celem badań jest analiza drgań rejestrowanych na obudowie silnika PM BLDC, dla różnych stanów jego pracy, w szczególności dla stanów awaryjnych. W tym celu na górnej części obudowy umieszczono trójosiowy piezoelektryczny akcelerometr DeltaTron typu 4506 firmy Brüel & Kjær. Aby lepiej zrozumieć przyczynę powstawania drgań, zarejestrowano również przebiegi czasowe prądów fazowych  $i_A, i_B, i_C$  (użyto przetworników LEM LAH25-NP) i prądu obwodu pośredniczącego  $i_{DC}$  (przetwornik LA 55-P/SP1, umiejscowienie wg rys. 2). Wykorzystano kartę pomiarową firmy National Instruments typu NI9215 (4 kanały 16-bitowe, o zakresie  $\pm 10V$ ) oraz NI9234 (4 kanały 24-bitowe, o zakresie  $\pm 5V$ , przeznaczone do obsługi akcelerometrów w standardzie IEPE). Akwizycję danych przeprowadzono w środowisku LabView, a analizę otrzymanych danych – w środowisku Matlab. Z uwagi na pasmo akcelerometru oraz specyfikę pomiarów przez obsługującą go kartę pomiarową, wybrano częstotliwość akwizycji sygnałów drgań i prądów jako  $f_r=10,24$  kHz. Długość pomiaru wynosiła 5s. Na tej podstawie określono częstotliwość modulacji PWM (i wykonywania głównej części programu) jako  $f_{PWM} = 4$  kHz  $< f_r/2$ . Dzięki temu, w widmie prądów będzie można obserwować także fragment wokół częstotliwości  $f_{PWM}$ , zgodnie z kryterium Shannona-Kotelnikowa. Sama analiza widmowa prądów była przedmiotem wcześniejszych prac symulacyjnych i eksperymentalnych [5][6].

#### Wybrane wyniki badań

Plan badań zakładał analizę przyspieszenia drgań dla różnych prędkości obrotowych (tj. współczynników wypełnienia sygnału PWM), różnych typów awarii oraz zróżnicowanego poziomu obciążenia. Dodatkowo zapisywane były przebiegi prądów fazowych i prądu wejściowego przekształtnika. Następnie zebrane dane zostały poddane analizie FFT, przy czym nie wykorzystywano dodatkowych okien (oprócz prostokątnego, co wynika z akwizycji próbek). Na podstawie widma prądów fazowych określono częstotliwość zasilania  $f_s$  i częstotliwość obrotową wirnika  $f_r$  zgodnie z (2).

$$(2) \quad f_r = f_s / p_b$$

gdzie:  $f_r$  – częstotliwość obrotowa wirnika.

W następnej kolejności opracowano program, który analizuje widmo przyspieszenia drgań pod kątem wystąpienia wybranych harmonicznych. Na podstawie zależności (3) podanych w [1] do porównania wybrano harmoniczne częstotliwości obrotowej o krotności 1, 2, 3 ( $= p_b$ ), 6 ( $= N_r = 2p_b$ ), 18 ( $= N_s$ ).

$$(3) \quad f_R = k N_s f_r, \quad f_S = k N_r f_r$$

gdzie:  $f_R, f_S$  – częstotliwości charakterystyczne,  $k$  – krotność harmonicznej ( $k \in \{1, 2, 3, \dots\}$ ).

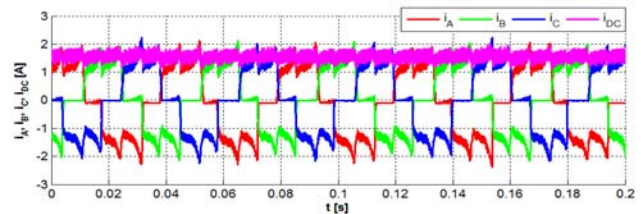
W pozycjach [7][8] wskazano, że widmo przyspieszenia drgań będzie zawierać składową  $f_r$ , związaną z częstotliwością obrotową wirnika, składowe  $k \cdot N_r \cdot f_r$  ( $= k \cdot 6f_r$ ) związane z występowaniem sił radialnych oraz składowe  $k \cdot 6p_b \cdot f_r$  ( $= k \cdot 18f_r$ ) związane z procesem komutacji.

Należy zauważyć, że dla omawianego silnika zachodzi  $N_s=6p_b$ , stąd dla tej harmonicznej drgania mogą powstawać skutek różnych zjawisk fizycznych. Ponadto wytypowane numery harmonicznych nie są jedynymi, dla których widmo zawiera znaczące składowe.

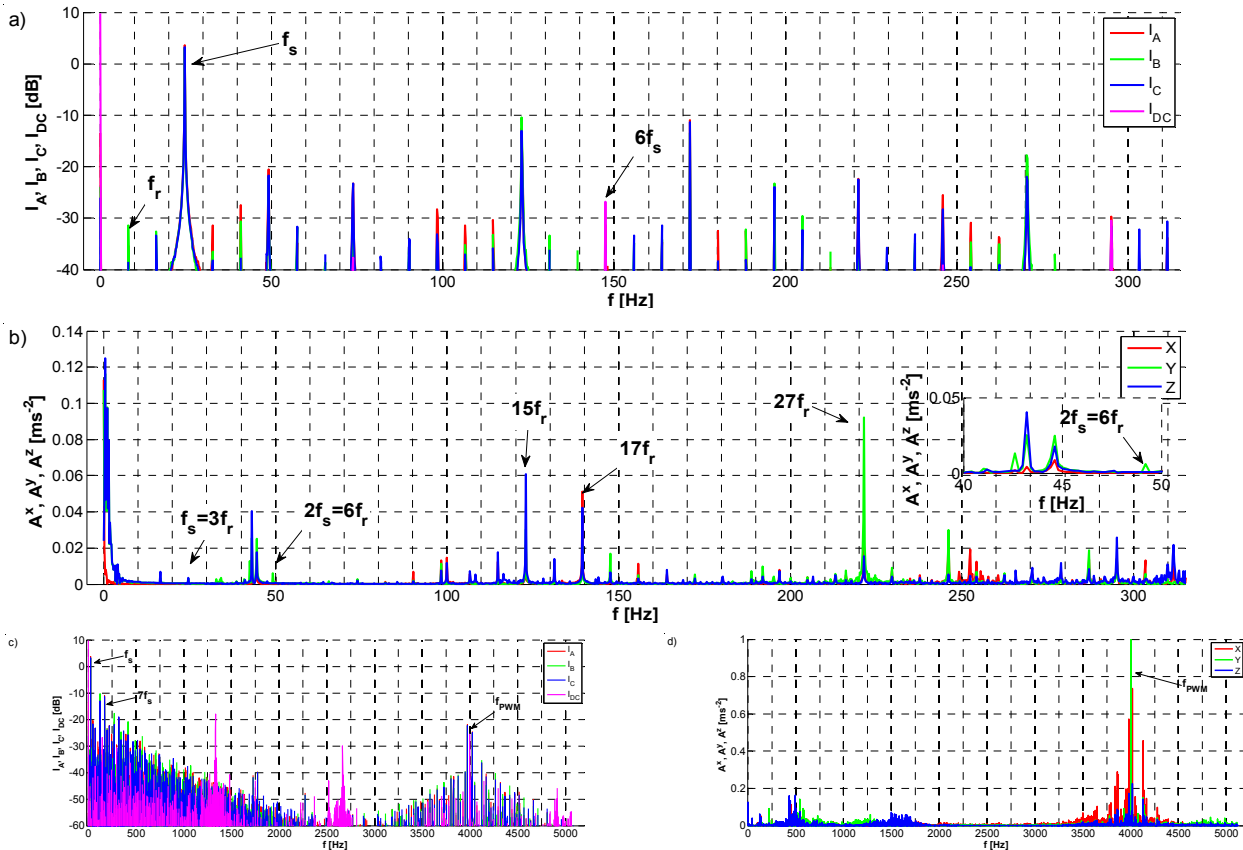
#### Analiza pracy sprawnego napędu

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przebiegi czasowe i widma amplitudowe zarejestrowane w sprawnym układzie, dla 50% wypełnienia sygnału PWM, przy średniej wartości

obciążenia możliwej do uzyskania na stanowisku. Ten punkt pracy leży poniżej wartości znamionowych silnika. W widmie przyspieszenia drgań widoczna jest częstotliwość zasilania  $f_s$  oraz kluczkowania  $f_{PWM}$  (rys. 6b,d). Wiele znaczących amplitud można powiązać z częstotliwością obrotową, jednakże w widmie występują także takie prążki, które nie zależą od niej. Dla badanych przypadków mają one częstotliwość ok. 43 Hz i 44 Hz (zbliżenie na rys. 6b).



Rys. 5. Przebieg prądów fazowych i prądu wejściowego przekształtnika dla sprawnego układu



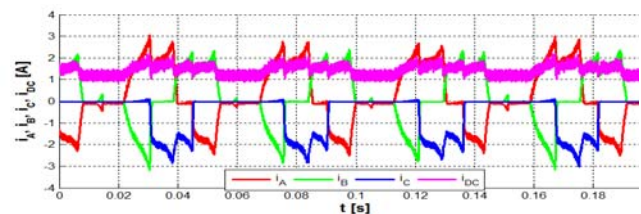
Rys. 6. Widmo amplitudowe prądów fazowych i prądu wejściowego przekształtnika (a, c) oraz przyspieszenia drgań (b, d): zbliżenie na początek zakresu (a, b) oraz cały zakres częstotliwości (c, d)

### Analiza pracy napędu po wystąpieniu uszkodzeń sterownika silnika PM BLDC

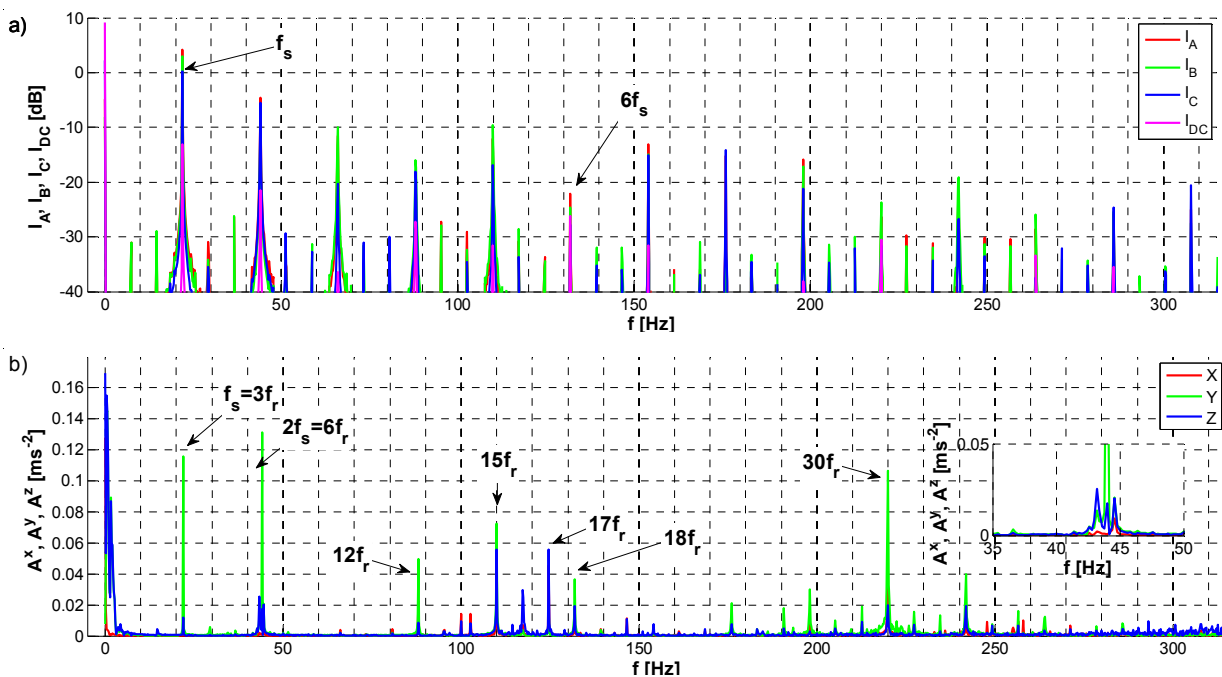
Analizowane uszkodzenia sterownika w znaczący sposób wpływają na postać prądów w silniku, a przez to na generowany moment elektromagnetyczny. Efekt braku przewodzenia tranzystorów widoczny jest w widmie prądów fazowych natychmiast, poprzez pojawienie się dodatkowych składowych. Celem badań przedstawianych w artykule jest odpowiedź na pytanie, czy podobne zmiany jakościowe i ilościowe będą również występowały w przypadku sygnału drganiowego. W tym celu wykonano szereg badań, z których wybrane przypadki zostaną przedstawione poniżej. Dla skrócenia opisu typów awarii wprowadzono zapisy oTx oraz analogicznie oTxy, oznaczające stany pracy, w których nie przewodzi tranzystor Tx oraz odpowiednio jednocześnie brak przewodzenia tranzystorów Tx oraz Ty. Oznaczenie typu  $H_z=0$  bądź  $H_z=1$  koduje informację o uszkodzeniu (hallotronowego) czujnika położenia wirnika w fazie z tego typu, iż wskazuje on stałą wartość 0 bądź 1, niezależnie od rzeczywistego położenia wirnika.

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono przebiegi i widma prądów fazowych przykładowego uszkodzenia typu oT5, przy współczynniku wypełnienia  $D=50\%$ . Dla czytelności przedstawiono jedynie początkowy zakres widma.

Ponieważ badania prowadzono w otwartej strukturze sterowania, to następuje spadek prędkości obrotowej po wystąpieniu uszkodzeń i przesunięcie częstotliwości badanych harmonicznych, co widać na zbiorczym zestawieniu (rys. 9). Analiza wszystkich przypadków pozwala na stwierdzenie, że dla danego typu uszkodzenia (np. brak przewodzenia jednego z tranzystorów) prędkość obrotowa przyjmuje zbliżone wartości a widmo przyspieszenia drgań – porównywalną postać, w szczególności jeśli chodzi o analizowane częstotliwości.



Rys. 7. Przebieg prądów fazowych i prądu wejściowego przekształtnika dla uszkodzenia typu oT5 (brak przewodzenia górnego tranzystora fazy C)

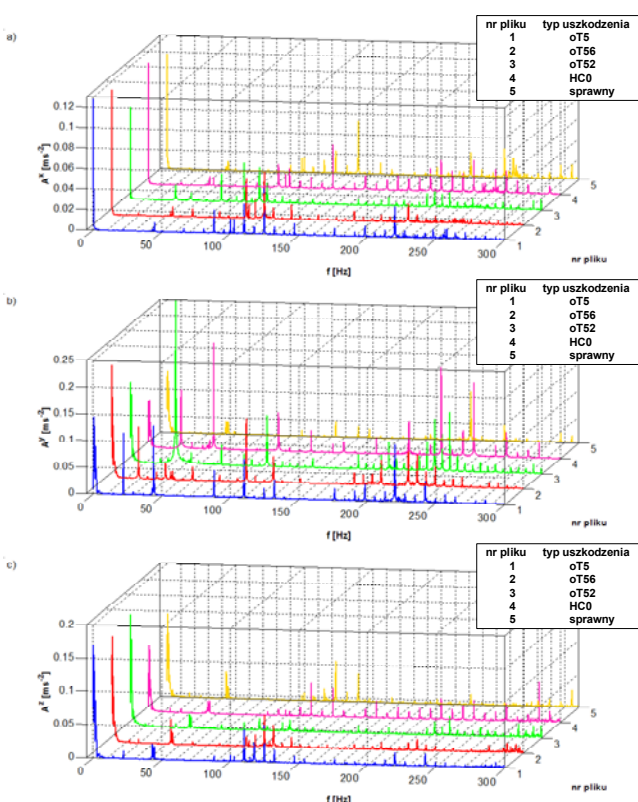


Rys. 8. Porównanie amplitud wybranych krotności częstotliwości obrotowej dla analizowanych przypadków: a) widmo amplitudowe prądów fazowych i prądu wejściowego przekształtnika, b) widmo amplitudowe przyspieszenia drgań, dla uszkodzenia typu oT5

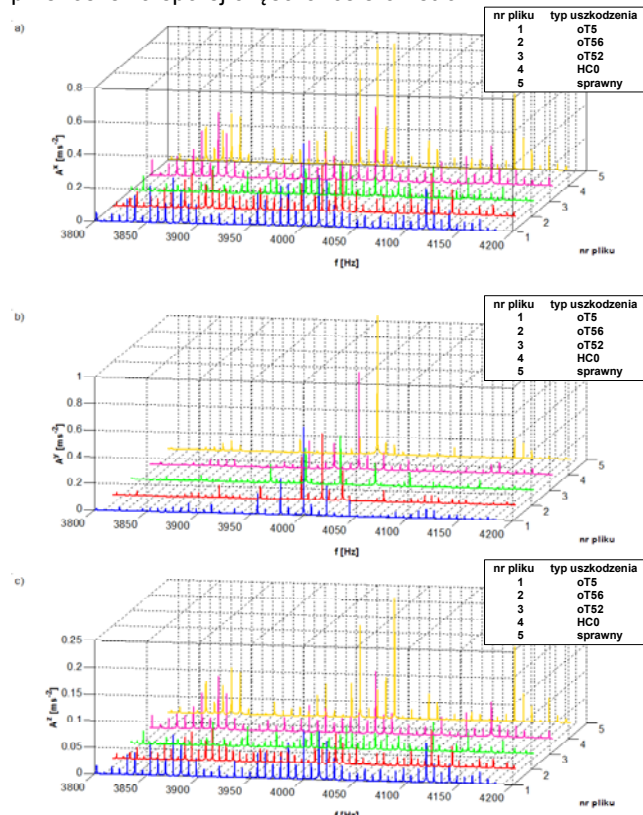
Na rysunku 9 w celach porównawczych przedstawiono początkowy zakres widm przyspieszeni drgań, dla kilku reprezentatywnych przypadków. Natomiast rysunek 10 pozwala na porównanie widm w otoczeniu częstotliwości kluczowania.

W sprawnym układzie wyraźnie widoczna jest częstotliwość modulacyjna  $f_{PWM}$ , a wykonana analiza zawartości widma wykazała, że charakter zmian dla

częstotliwości  $f_{PWM} \pm 3f_r$  i  $f_{PWM} \pm 6f_r$  w osi stycznej (Y) jest taki sam, jak dla  $3f_r$  i  $6f_r$  opisanych w poprzednim punkcie. Nie jest to jednak najlepszy wskaźnik, który można wykorzystać w detektorze uszkodzeń, gdyż w pracujących układach częstotliwość modulacji PWM w sterownikach silników PM BLDC wynosi często kilkanaście kiloherców. Obserwacja drgań w tym zakresie będzie z reguły poza pasmem przenoszenia sporej części akcelerometrów.



Rys. 9. Porównanie widm przyspieszenia drgań w poszczególnych osiach, w początkowym zakresie widma, dla osi radialnej X (a), stycznej Y (b) i wzdłużnej Z (c)



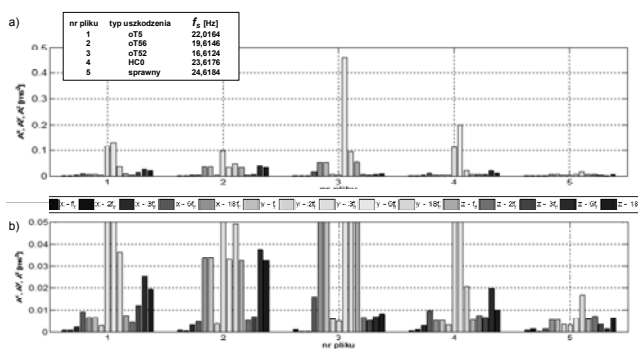
Rys. 10. Porównanie widm przyspieszenia drgań w poszczególnych osiach, w otoczeniu częstotliwości kluczowania  $f_{PWM}$ , dla osi radialnej X (a), stycznej Y (b) i wzdłużnej Z (c)

Na podstawie zbiorczych wyników stwierdzono, iż pojawienie się uszkodzeń sterownika skutkuje odkształceniem prądów, wskutek czego zmienia się moment elektromagnetyczny silnika. Brak przewodzenia tranzystorów przez sporą część okresu prądu powoduje asymetrię w układzie zasilania. Zgodnie z [9], asymetria zasilania objawia się wzrostem harmonicznym o częstotliwościach  $k \cdot 2f_s$  w widmie przyspieszenia drgań. Dla badanego silnika będą to częstotliwości  $k \cdot 2 \cdot 3f_r = k \cdot 6f_r$ . We wszystkich badanych przypadkach wystąpił znaczący wzrost amplitudy przyspieszenia drgań o tej częstotliwości w osi stycznej (oś Y) po wystąpieniu uszkodzenia czujników położenia wirnika lub uszkodzenia tranzystora bądź tranzystorów, w stosunku do amplitudy zarejestrowanej w napędzie bez uszkodzeń. Zasada ta zdaje się obowiązywać niezależnie od stopnia obciążenia napędu oraz prędkości obrotowej. W pozostałych osiach pomiarowych akcelerometru zmiany nie są aż tak bardzo widoczne, co potwierdza spostrzeżenia opisane w [9].

Drugą analizowaną częstotliwością jest harmoniczna podstawowej częstotliwości zasilania  $3f_r = f_s$ . W porównaniu do sprawnego układu, po wystąpieniu uszkodzeń sterownika w wielu przypadkach następuje wyraźny wzrost amplitudy tej składowej. Przy czym nie ma ogólnej reguły, który prążek jest wyższy (czy dla  $6f_r$ , czy dla  $3f_r$ ). Wyjątkowym przypadkiem jest uszkodzenie tego typu, że nie pracują dwa tranzystory w jednej fazie (przypadek porównywalny z brakiem zasilania w jednej fazie, bądź jej odłączeniem), wtedy dla częstotliwości  $f_s = 3f_r$  brak jest zmian, natomiast dla  $2f_s = 6f_r$  występuje wyraźny wzrost amplitudy, co jest skutkiem wystąpienia asymetrii zasilania.

Dużą zmiennością charakteryzują się również zmiany amplitudy dla częstotliwości  $18f_r$ . Niekorzystnym jest fakt, iż kierunek tych zmian (spadek, wzrost) jest zależny od warunków pracy układu napędowego (prędkość, stopień obciążenia), więc nie można informacji tej wykorzystać do diagnostyki.

Na rysunku 11 przedstawiono zbiorcze porównanie amplitud dla wytypowanych harmonicznym. Ponadto w każdym przypadku podano częstotliwość zasilania  $f_s$ .



Rys. 11. Porównanie amplitud wybranych krotności częstotliwości obrotowej dla analizowanych przypadków a) oraz zbliżenie b)

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań wpływu uszkodzeń w układach sterowania i pomiaru położenia wirnika na poziom drgań w napędzie z silnikiem PM BLDC. Podczas analizy pominięto wyznaczanie częstotliwości własnych, rezonansowych oraz analizę

częstotliwości charakterystycznych dla ekscentryczności i uszkodzeń łożysk.

Na podstawie przeprowadzonych badań wybranych typów uszkodzeń w układach sterowania, wprowadzających asymetrię zasilania, najkorzystniej jest analizować drgania w osi stycznej do obudowy (oś Y). Porównano widma drgań oraz amplitudy wybranych częstotliwości charakterystycznych w zakresie niskich częstotliwości oraz w otoczeniu częstotliwości kluczkowania.

W dostępnej literaturze stosunkowo mało jest analiz drgań zarejestrowanych w napędzie z silnikiem PM BLDC, w szczególności w obecności występowania stanów awaryjnych. Należy spodziewać się, że zmiana algorytmu sterowania (np. praca w układzie falownika o zredukowanej topologii, praca w układzie bezczujnikowym z przyspieszeniem komutacji) może przynieść zmiany postaci widma przyspieszenia drgań, co wydaje się ciekawym kierunkiem dalszych badań.

**Autorzy:** mgr inż. Marcin Skóra, prof. dr hab. inż. Czesław T. Kowalski, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: [marcin.skora; czeslaw.t.kowalski]@pwr.edu.pl.

### LITERATURA

- [1] Podhajecki J., Młot A., Korkosz M., Analiza drgań stojana silnika BLDC pochodzenia magnetycznego, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, 84 (2009), 191-196
- [2] Yao Da, Xiaodong Shi, Krishnamurthy M., Health monitoring, fault diagnosis and failure prognosis techniques for Brushless Permanent Magnet Machines, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, (2011), 1-7
- [3] Rajagopalan S., Roux W., Habetler T.G., Harley R.G., Dynamic Eccentricity and Demagnetized Rotor Magnet Detection in Trapezoidal Flux (Brushless DC) Motors Operating Under Different Load Conditions, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22 (2007), n. 5, 2061-2069
- [4] Skóra M., Stanowisko do badania układów napędowych z silnikiem PM BLDC, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*, 70 (2014), 183-192
- [5] Skóra M., Kowalski C.T., Analiza wpływu wybranych uszkodzeń sterownika silnika PM BLDC na widma prądów fazowych, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, 108 (2015), 7-13
- [6] Skóra M., Analiza wpływu wybranych uszkodzeń na pracę napędu z silnikiem PM BLDC w układzie zasilania z zewnętrznym regulatorem napięcia. Badania symulacyjne, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*, 71 (2015), 127-139
- [7] Ming Y., Shen J.-X., Research on conducted EMI and vibration characteristics of PM BLDC motors with different stator structures, *International Conference on Electrical Machines and Systems*, (2011), 1-6
- [8] Leong J.H., Zhu Z.Q., Acoustic Noise and Vibration of Direct-Torque-Controlled Permanent Magnet Brushless DC Drives, *6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives*, (2012), 1-6
- [9] Kowalski C.T., Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji., *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, (2013), Wrocław