

*silnik bezszczotkowy prądu stałego o magnesach trwałych (PM BLDC),  
uszkodzenia tranzystorów i czujników położenia,  
regulator napięcia, analiza FFT prądów fazowych*

Marcin SKÓRA\*

## **ANALIZA WPLYWU WYBRANYCH USZKODZEŃ NA PRACĘ NAPĘDU Z SILNIKIEM PM BLDC W UKŁADZIE ZASILANIA Z ZEWNĘTRZNYM REGULATOREM NAPIĘCIA. BADANIA SYMULACYJNE**

W pracy przedstawiono badania symulacyjne kaskadowego układu regulacji prędkości silnika PM BLDC z podporządkowaną pętlą regulacji prądu. Badania wykonane w programie Matlab/Simulink dotyczą przypadku, gdy zewnętrzny regulator napięcia jest źródłem napięcia dla komutatora elektronicznego, który w tym przypadku zgodnie z nazwą spełnia jedynie rolę komutacyjną. W pracy pokazano wpływ wybranych uszkodzeń na przebiegi prądów fazowych silnika, prądu wejściowego przekształtnika oraz prędkości obrotowej silnika. Do oceny stanu zaproponowano również analizę hodografu wektora przestrzennego prądów stojana oraz analizę widm amplitudowych prądów. Wskazano na częstotliwości, których pojawienie się w widmie świadczy o uszkodzeniu. Zaprezentowano wybrane wyniki badań symulacyjnych.

### **1. WPROWADZENIE**

Możliwość regulacji prędkości obrotowej elementów wykonawczych jest niezbędna w większości procesów technologicznych. Obecnie najczęściej wykorzystuje się do tego celu silniki elektryczne wraz z odpowiednim układem sterowania i zasilania. W zależności od zastosowań (np. napęd pompy, dźwigu, pojazdu elektrycznego, ramienia robota), tj. w zależności od wymaganej dynamiki, mocy silnika, rodzaju źródła zasilania oraz innych specyficznych wymagań wybierany jest odpowiedni typ silnika – prądu stałego, indukcyjny klatkowy, synchroniczny z magnesami trwałymi, bezszczotkowy prądu stałego, krokowy. Oprócz doboru odpowiedniego silnika napędzającego należy również wybrać sterownik energoelektroniczny i zestaw czujników pomiarowych (prądu, prę-

---

\* Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław, e-mail: Marcin.Skora@pwr.edu.pl

kości, napięcia, inne) do pętli sprzężenia zwrotnego, by osiągnąć planowany efekt. Niestety, możliwość regulacji prędkości obrotowej i/lub momentu elektromagnetycznego może zostać ograniczona w przypadku wystąpienia awarii tranzystorów mocy bądź czujników potrzebnych do prawidłowej pracy sterownika energoelektronicznego. Zagadnienie wykrywania awarii, a następnie podejmowania odpowiednich działań naprawczych, bądź zapewniających doprowadzenie napędu do bezpiecznej pozycji, zgodnie z ideą układów odpornych (*Fault tolerant*), stanowi przedmiot badań naukowców z wielu ośrodków krajowych oraz zagranicznych [3].

Pierwszym działaniem w procesie identyfikacji uszkodzeń jest z reguły analiza symptomów towarzyszących danej awarii. Dlatego też celem niniejszego artykułu jest sprawdzenie, w jaki sposób wybrane uszkodzenia wpływają na przebiegi prądów fazowych oraz prądu wejściowego komutatora elektronicznego i prędkości obrotowej. Przedstawione badania symulacyjne dotyczą napędu z bezszczotkowym silnikiem prądu stałego z magnesami trwałymi. Uzyskane przebiegi zostaną porównane z wynikami uzyskanymi w badaniach na obiekcie rzeczywistym [13], [14].

## 2. OPIS UKŁADU ZASILAJĄCEGO I STERUJĄCEGO

Silniki bezszczotkowe prądu stałego o magnesach trwałych (PM BLDC) znalazły zastosowanie m.in. w pojazdach elektrycznych małej mocy takich jak rowery elektryczne, wózki inwalidzkie, małe samochody oraz jako silniki wysokoobrotowe w wielowirnikowych maszynach latających, w magazynach energii elektrycznej z wirującymi masami, sprężarkach. Wpływ na to miały ich zalety – bardzo dobre właściwości dynamiczne spowodowane małą bezwładnością wirnika, łatwość chłodzenia (ciepło wydzielane głównie w części nieruchomej silnika), korzystny stosunek rozwijanego momentu do wagi [7]. Ponadto silniki te należą do grupy maszyn o komutacji elektronicznej, zasilanych przez odpowiedni układ energoelektroniczny, stąd poza łożyskami brak elementów ulegających zużyciu podczas eksploatacji. Silniki te najczęściej występują w wykonaniu trójfazowym, ale spotykane są również konstrukcje o większej liczbie faz, do zastosowania w układach odpornych na uszkodzenia bądź wymagających mniejszych pulsacji momentu.

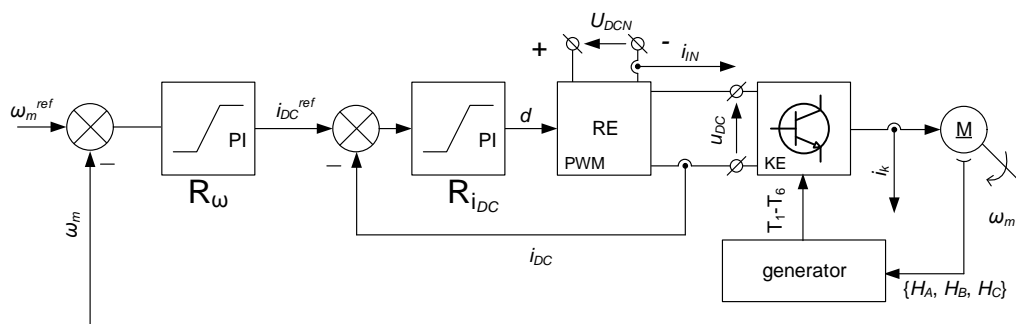
Silniki trójfazowe najczęściej posiadają uzwojenia połączone w gwiazdę, przy czym punkt gwiazdowy uzwojeń z reguły nie jest wyprowadzony na zewnątrz. Ponieważ sterownik (komutator elektroniczny) wymaga informacji o położeniu kątowym wirnika, to do jej wyznaczenia wykorzystywane są dyskretne czujniki położenia wirnika (hallotronowe lub optyczne), enkodery bądź rezolwery, bądź też wykorzystuje się metody bezczujnikowe.

Sam komutator elektroniczny najczęściej ma postać dwupoziomowego falownika napięciowego, przy czym źródłem zasilania jest bateria bądź też prostownik sieciowy z odpowiednim filtrem wyjściowym. W rozwiązaniu tym wszystkie tranzystory pełnią

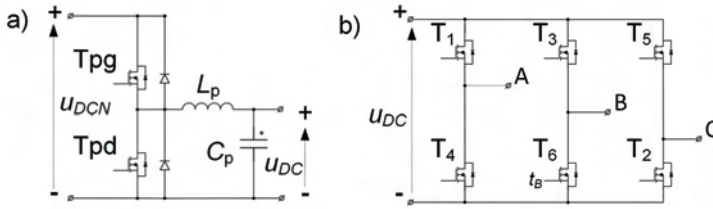
rolę komutacyjną (pozwalają przełączać uzwojenia silnika pomiędzy biegunami zasilania), a wszystkie lub część pełni także funkcję regulacyjną. Jest to możliwe dzięki wykorzystaniu jednej z technik modulacji PWM [7], [15] bądź regulatorów histerezo- wych, ślizgowych i ich mutacji. Możliwość regulacji prędkości obrotowej i/lub pobie- ranego prądu jest zapewniona poprzez zmianę wartości średniej napięcia zasilającego, zupełnie jak w pierwowzorze – szczotkowym silniku prądu stałego. Stąd też wynika kolejna możliwa struktura układu zasilania – z osobnym regulatorem napięcia (stero- waną przetwornicą DC/DC w oparciu o jedną ze znanych topologii) i układem mostka trójfazowego, którego rola ograniczona zostaje tylko do przełączania uzwojeń [2], [6], [7], [10]. W ten sposób można ograniczyć pulsacje prądu zasilającego silnik [9], czy też uniezależnić w pewnym stopniu charakterystyki napędu od stopnia rozładowania baterii zasilającej [10], [11]. Jeśli przetwornica będzie miała możliwość zwiększania napięcia, to można wykorzystać ją również do odzysku energii podczas hamowania pojazdu [4]. W przypadku silników wysokoobrotowych, gdzie częstotliwość sygnału PWM jest porównywalna z częstotliwością przełączania uzwojeń, jest to jedyny sensowny układ regulacji prędkości obrotowej [6]. Wadą przedstawianego rozwiązania, oprócz wzrostu kosztów i nieznacznie stopnia skomplikowania całego układu, może być fakt, że prąd przepływa przez kolejny element indukcyjny, co może generować dodatkowe straty komutacyjne w silniku.

W literaturze spotykane są również inne, mniej popularne topologie układu zasilania silników PM BLDC, np. o topologii półmostka [8], topologii C-dump [5] i przekształtnika matrycowego [7] czy o topologii falownika o zredukowanym układzie połączeń [1], [12], gdzie jedna z faz dołączona jest do punktu środkowego zasilania.

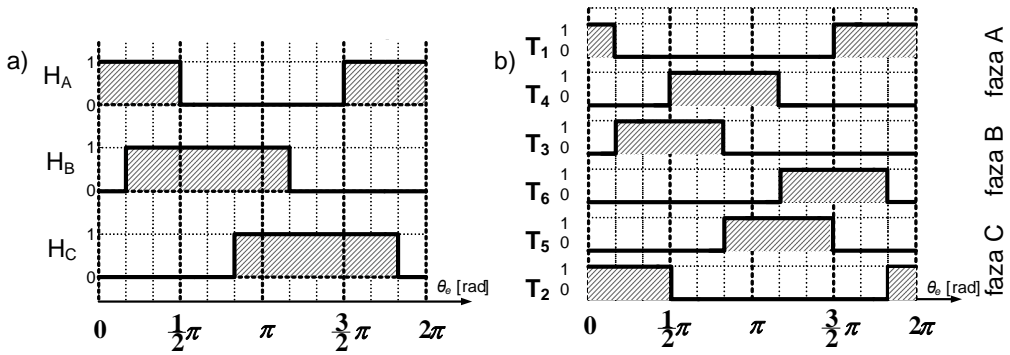
Badania w dalszej części artykułu będą dotyczyć struktury przedstawionej na rysunku 1, gdzie regulator napięcia wykonano w postaci przetwornicy obniżającej. Jej schemat oraz schemat komutatora elektronicznego pokazano na rysunku 2, natomiast na rysunku 3 sygnały kodujące położenie wirnika oraz sygnały sterujące tranzystorami komutatora.



Rys. 1. Struktura układu sterowania, wykorzystywana w badaniach symulacyjnych (*RE* – regulator napięcia, *KE* – komutator elektroniczny, *generator* – układ wyznaczania sygnałów sterujących tranzystorami *KE*, w zależności od położenia wirnika)



Rys. 2. Budowa wewnętrzna regulatora napięcia a) i komutatora elektronicznego b)



Rys. 3. Przebieg sygnałów kodujących położenie wirnika a) oraz sterujących tranzystorami b)

### 3. WYBRANE RODZAJE USZKODZEŃ

W artykule rozważane są następujące rodzaje uszkodzeń (w nawiasie podano opis typu uszkodzenia stosowany w dalszej części pracy w podpisach rysunków):

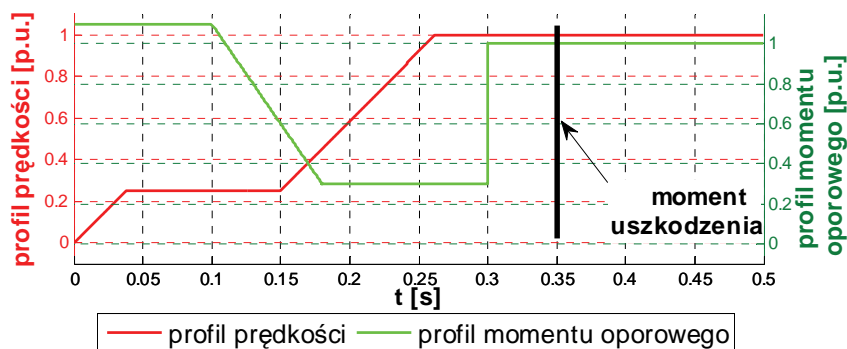
- brak przewodzenia pojedynczego tranzystora, na przykładzie tranzystora  $T_5$  (*oT5*),
- brak przewodzenia dwóch tranzystorów z grupy górnej, na przykładzie  $T_3$  i  $T_5$  (*oT35*),
- brak przewodzenia dwóch tranzystorów – z różnych faz, jeden z grupy górnej i jeden z dolnej, na przykładzie  $T_5$  i  $T_6$  (*oT56*),
- stała wartość wyjściowa sygnału czujnika położenia wirnika, równa wartości logicznej „0”, na przykładzie czujnika fazy C ( $H_C = 0$ ),
- brak przewodzenia tranzystora  $T_{pg}$  z przetwornicy DC/DC (*oTpg*),
- ciągłe przewodzenie tranzystora  $T_{pg}$  (*sTpg*).

Symulacja uszkodzeń tranzystorów polega na wymuszeniu odpowiednich sygnałów sterujących – logicznego „0” w przypadku braku sterowania i logicznej „1” w przypadku symulowania trwałego zwarcia. Zakłada się przy tym, że dioda zwrotna powiązana z tranzystorem jest sprawna. Symulacja uszkodzeń czujników położenia wirnika polega na zamianie sygnału oryginalnego sygnałem o stałej wartości logicznej („0” lub „1”,

w zależności od wybranego typu uszkodzenia). Uszkodzenia przemijające, chwilowe, innych typów lub innych elementów napędu (łożysk, kondensatora  $C_{DC}$ , magnesów na wirniku) nie były rozpatrywane.

#### 4. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Badania symulacyjne zostały przeprowadzone w pakiecie Matlab/Simulink, z wykorzystaniem przyborka (*toolboku*) *SimPowerSystems* zawierającego modele łączników tranzystorowych, silnika, itp. Jako metodę całkowania wybrano metodę *ode-1* z krokiem obliczeń  $5 \mu\text{s}$ . W symulacjach wykorzystano model biblioteczny silnika synchronicznego o magnesach trwałych, sparametryzowany do pracy w roli silnika PM BLDC, tj. z siłą elektromotoryczną o kształcie trapezowym. Przyjęto następujące parametry znamionowe trójfazowego silnika PBL86-118: napięcie  $U_{DCN} = 48 \text{ V}$ , prąd  $I_{DCN} = 11 \text{ A}$ , prędkość obrotowa (mechaniczna)  $\omega_m = 3000 \text{ obr/min}$ , rezystancja i indukcyjność na zaciskach (dwóch faz połączonych szeregowo), odpowiednio  $0,1 \Omega$  i  $107 \mu\text{H}$ , stała momentu  $k_t = 0,11 \text{ Nm/A}$ , liczba par biegunów  $p = 4$ . Założono, że moment bezwładności  $J$  maszyny stanowi dwukrotność momentu bezwładności  $J_s$  samego wirnika ( $J_s = 2,1 \times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ ). Ponadto arbitralnie przyjęto ograniczanie prądów zadanych do poziomu  $2,5 I_{DCN}$  oraz następujące elementy przetwornicy – dławik o indukcyjności  $L_{DC} = 600 \mu\text{H}$ , kondensator o pojemności  $C_{DC} = 94 \mu\text{H}$ , częstotliwość pracy  $f_{DC} = 15 \text{ kHz}$ .

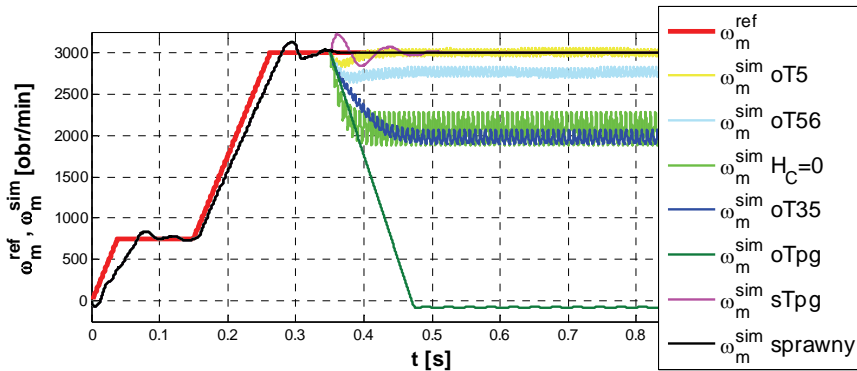


Rys. 4. Profile zadanej prędkości i momentu obciążenia (odniesione do wartości znamionowych)

Badania wpływu uszkodzeń wykonano dla przypadku kaskadowego układu regulacji prędkości, z nadrzędnym regulatorem prędkości obrotowej typu PI i podrzędnym regulatorem prądu  $i_{DC}$  typu PI (jak na rys. 1). Na rysunku 4 przedstawiono profil prędkości zadanej oraz momentu obciążenia, dla testowanej trajektorii. Wartości podane są w jednostkach względnych, wielkości fizyczne odniesione są do wartości znamiono-

wych silnika. Badane uszkodzenie uaktywniano w chwili  $t = 0,35$  s, gdy napęd pracował w stanie ustalonym z prędkością nominalną i znamionowym obciążeniem.

Rozważane uszkodzenia (poza  $oTpg$  i  $sTpg$ ) powodują, że cyklicznie występuje przerwa w zasilaniu uzwojeń stojana, przez co zmniejsza się średnia wartości napięcia stojana silnika. To z kolei bezpośrednio rzutuje na możliwe do uzyskania (utrzymania) wartości prędkości obrotowej. Okresowa przerwa w zasilaniu uzwojeń powoduje okresowy zanik prądu wejściowego silnika, generowanego momentu elektromagnetycznego i w konsekwencji pulsacje prędkości obrotowej. Trajektorie tej ostatniej, dla badanych przypadków, pokazano na rysunku 5. Wskazują one na możliwość dalszej pracy z zadaną prędkością w przypadku uszkodzenia pojedynczego elementu, a w pozostałych wariantach – po obniżeniu prędkości obrotowej napędu. W tabeli 1 pokazano powiększony obszar zmian prędkości obrotowej tuż po wystąpieniu badanych uszkodzeń.



Rys. 5. Porównanie prędkości obrotowych po wystąpieniu uszkodzeń różnych typów w chwili  $t = 0,35$  s

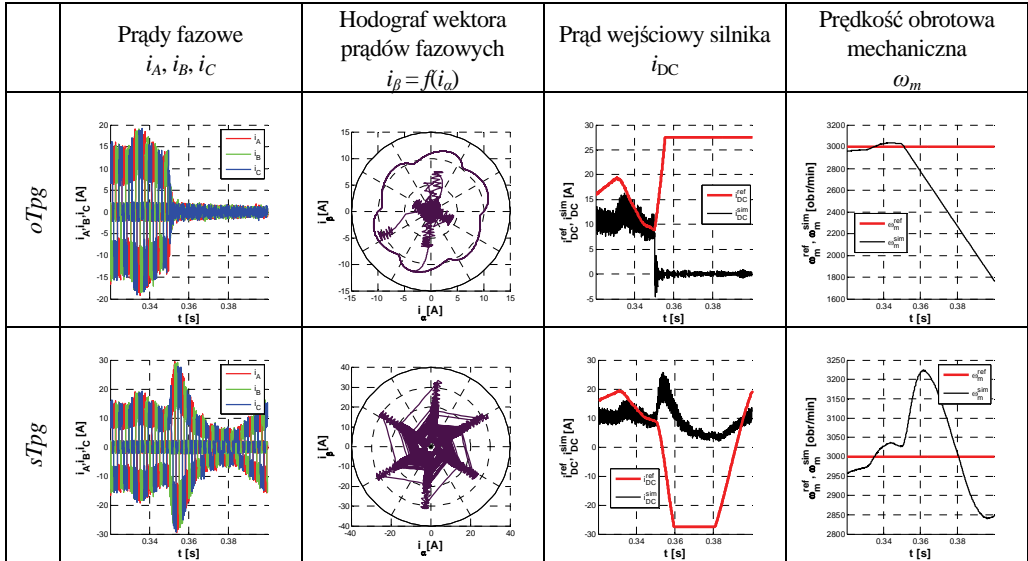
W tabeli 1 zestawiono wybrane sygnały dostępne w układzie sterowania, dla układu sprawnego oraz różnych uszkodzeń. Wystąpienie uszkodzenia powoduje znaczące zmiany w kształcie prądów fazowych, gdyż wskutek braku przewodzenia tranzystorów prąd przestaje płynąć. Najłatwiej można to zauważyć po zmianie kształtu hodografu wektora prądów fazowych, który przyjmuje charakterystyczną postać w zależności od typu uszkodzenia. Prezentowane tutaj wyniki są zgodne z kształtami hodografów zarejestrowanymi w rzeczywistym napędzie, przy sterowaniu z regulacją napięcia bezpośrednio w komutatorze elektronicznym [12], [14]. Jedyne prezentowany tu przypadek uszkodzenia  $oT35$  różni się nieco od spodziewanego, prawdopodobnie z uwagi na wysokie wartości prądów płynących przez diody zwrotne.

W badanej strukturze układu sterowania brak jest możliwości kontroli każdego prądu fazowego z osobna. Komutator elektroniczny załącza tranzystory wg ustalonego schematu. Stąd też wysokie wartości prądów fazowych, zwłaszcza po wystąpieniu uszkodzenia typu  $H_C = 0$ . W przypadku pomiaru prądów fazowych i ich regulacji bezpośrednio w strukturze komutatora elektronicznego (w klasycznym sposobie sterowania silnika

PM BLDC) istnieje możliwość ograniczania amplitud prądów fazowych do bezpiecznych wartości, szczególnie przy wykorzystaniu regulatorów histerezowych prądów.

Tabela 1. Wykresy ilustrujące zachowanie się napędu bezpośrednio po uaktywnieniu uszkodzenia

|              | Prądy fazowe<br>$i_A, i_B, i_C$ | Hodograf wektora prądów fazowych<br>$i_\beta = f(i_\alpha)$ | Prąd wejściowy silnika<br>$i_{DC}$ | Prędkość obrotowa mechaniczna<br>$\omega_m$ |
|--------------|---------------------------------|---|------------------------------------|---|
| Sprawy       |                                 |   |                                    |   |
| $\sigma t5$  |                                 |   |                                    |   |
| $\sigma t35$ |                                 |   |                                    |   |
| $\sigma t56$ |                                 |   |                                    |   |
| $H_C = 0$    |                                 |   |                                    |   |



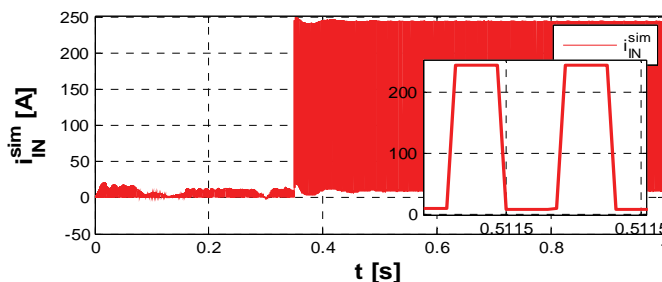
W przypadku uszkodzeń tranzystorów w przetwornicy DC/DC, brak przewodzenia tranzystora  $T_{pg}$  spowoduje rozładowanie kondensatora  $C_{DC}$  i w konsekwencji brak zasilania komutatora elektronicznego i niemożność utrzymania prędkości zadanej. Jeżeli silnik w dalszym ciągu obciążony będzie czynnym momentem oporowym, to pod jego wpływem zacznie się obracać w przeciwną stronę. Jeżeli tranzystory komutatora elektronicznego będą odpowiednio sterowane, to silnik będzie wytwarzał moment hamujący i prędkość napędu ustali się, jak na rysunku 5. W przeciwnym wypadku, przy braku lub nieodpowiednim sterowaniu tranzystorów, to silnik, napędzany momentem obciążenia, rozbiegnie się, co grozi jego fizycznym uszkodzeniem.

Może również dojść do trwałego uszkodzenia tranzystora  $T_{pg}$ , w ten sposób, że przewodzi ciągle prąd, niezależnie od sygnału sterującego. Jeśli drugi z tranzystorów przetwornicy będzie pracował normalnie, to cyklicznie będzie dochodziło do zwierania źródła zasilania, stąd prąd pobierany przez przetwornicę będzie osiągał olbrzymie amplitudy (rys. 6). Taki przebieg uzyskany w symulacjach w układzie rzeczywistym nie będzie realizowalny – próba zwarcia źródła energii powinna skutkować zadziałaniem zabezpieczeń (np. bezpieczników) i odłączeniem elektroniki od zasilania, po czym cały napęd zachowuje się w sposób opisany w poprzednim punkcie. Przy braku zabezpieczenia zwarcioowego pobór prądu (rys. 6) ze źródła energii, które nie jest do tego przystosowane, grozi jego zniszczeniem, a w niektórych przypadkach również pożarem.

W badaniach podjęto również próbę analizy widmowej prądów fazowych. W tym celu rejestrowano kolejne próbki przez czas 1 s od momentu wystąpienia uszkodzenia, a następnie wykonano transformatę FFT oraz obliczono moduł widma prądów fazo-



wych. Wyniki zebrano na rysunku 7. Na rysunku 7a pokazano szerszy zakres widma, natomiast w pozostałych przypadkach jedynie początkowy obszar, gdyż w tym zakresie występuje najwięcej zmian i są one najbardziej widoczne. Rysunki 7a, b dotyczą sprawnego układu. Gdyby przebieg prądu fazowego miał idealny kształt prostokątny, to jego widmo zawierałoby jedynie nieparzyste wielokrotności (oprócz wielokrotności trzecich) podstawowej harmonicznej o częstotliwości  $f_1$ , określonej na podstawie prędkości obrotowej wirnika wg zależności (1).



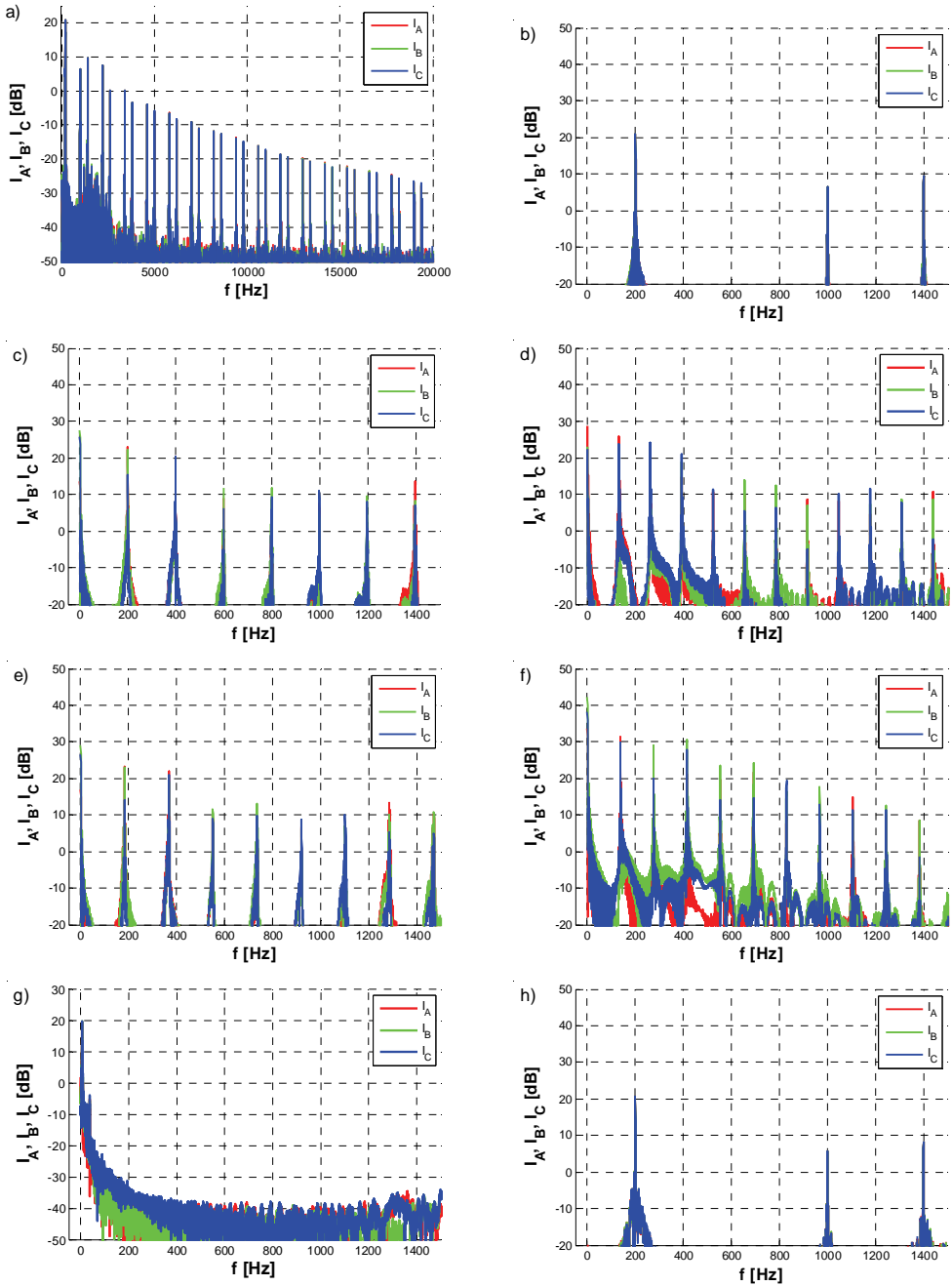
Rys. 6. Przebieg prądu wejściowego regulatora napięcia w przypadku uszkodzenia typu  $sTpg$

$$f_1 [\text{Hz}] = p \frac{\omega_m [\text{obr/min}]}{60} \quad (1)$$

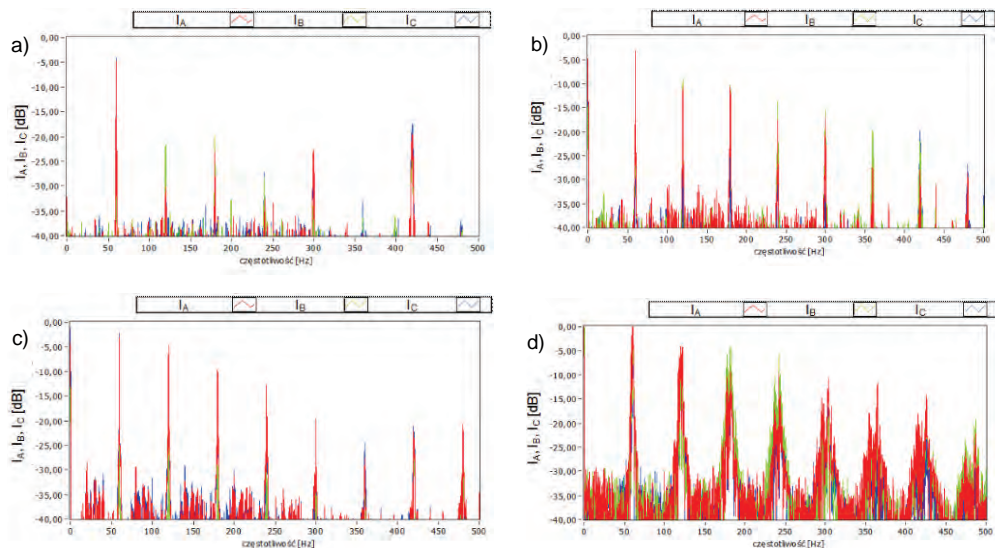
gdzie:  $\omega_m$  – prędkość obrotowa wirnika,  $p$  – liczba par biegunów.

W sprawnym (symetrycznym) układzie występują jedynie wielokrotności harmonicznej o częstotliwościach  $(6n \pm 1) \times f_1$ , dla  $n \in \{0, 1, 2, \dots\}$ . W przypadku wystąpienia uszkodzeń w strukturze komutatora elektronicznego ( tranzystorów  $T_1$ – $T_6$ , czujników  $H_A$ ,  $H_B$ ,  $H_C$ , zarówno pojedynczych, jak i wielokrotnych uszkodzeń), symetria zasilania zostaje zaburzona i w związku z tym pojawia się w sygnałach prądów fazowych składowa stała, a w widmie pojawiają się parzyste wielokrotności częstotliwości podstawowej (0, 2, 4, 6, ...) oraz brakujące nieparzyste wielokrotności (3, 9, ...). Wybrane przykłady zamieszczono na rysunkach 7c–f. W przypadkach, w których napęd nie jest w stanie utrzymać zadanej prędkości obrotowej, następuje zmiana położenia prążka o częstotliwości podstawowej. Warto zauważyć, że takie postacie widm uzyskano również w badaniach eksperymentalnych na rzeczywistym silniku, zasilanym z falownika pełniącego rolę komutacyjną i regulacyjną. Dla przykładu na rysunku 8 przedstawiono widma amplitudowe prądów fazowych uzyskane podczas pracy nieobciążonego silnika z prędkością 900 obr/min, zarejestrowane na stanowisku laboratoryjnym [13].

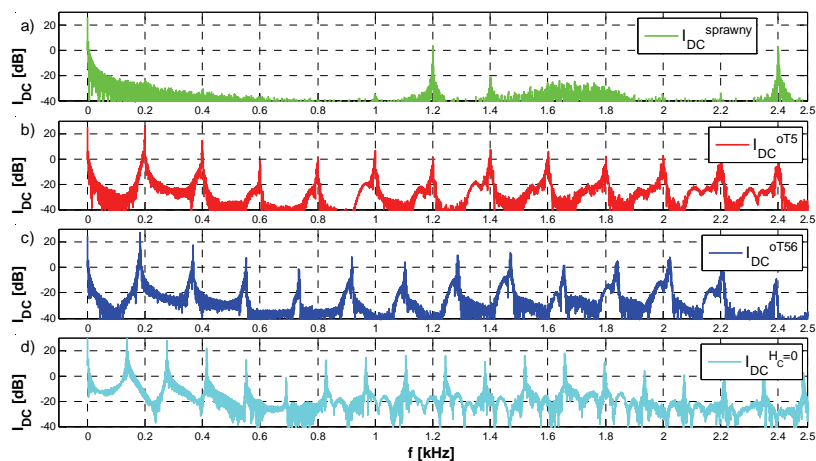
W przypadku braku przewodzenia tranzystora  $T_{pg}$  w przetwornicy następuje zatrzymanie napędu, stąd wynika przebieg z rysunku 7g. Z kolei ciągłe przewodzenie tranzystora  $T_{pg}$  nie wprowadzało w symulacji widocznych zmian, stąd widmo prądów w tym przypadku (rys. 7h) w zasadzie nie różni się od widma prądów sprawnego napędu.



Rys. 7. Widmo amplitudowe prądów fazowych dla różnych przypadków pracy napędu:  
 a), b) sprawny układ oraz dla uszkodzeń typu c) *oT5*, d) *oT35*, e) *oT56*, f)  $H_C = 0$ , g) *oTpg*, h) *sTpg*



Rys. 8. Widma amplitudowe prądów fazowych dla różnych przypadków pracy nieobciążonego napędu: a) sprawny układ oraz dla uszkodzeń typu b)  $oT5$ , c)  $oT56$ , d)  $H_C = 0$ , zarejestrowane na stanowisku laboratoryjnym



Rys. 9. Widmo amplitudowe prądu  $i_{DC}$  dla różnych przypadków pracy napędu

Dla tego samego przedziału czasowego przeanalizowano również postać widm amplitudowych prądu wejściowego przekształtnika (prądu  $i_{DC}$  na schemacie na rys. 1). Analiza taka jest korzystna, gdyż w rozważanym układzie sterowania nie ma potrzeby pomiaru prądów fazowych, a prąd wejściowy przekształtnika  $i_{DC}$  jest dostępny dla

układu regulacji i detekcji uszkodzeń. Wynik analizy dla wybranych typów uszkodzeń przedstawiono na rysunku 9.

Prąd  $i_{DC}$  charakteryzuje się dużą składową stałą w każdym przypadku, gdyż jest to prąd pobierany przez silnik. W sprawnym napędzie występują dodatkowo zmiany (chwilowy spadek) wartości prądu podczas przełączania faz, czyli 6 razy w ciągu okresu dla trójfazowego silnika. Stąd w sprawnym napędzie w widmie prądu  $i_{DC}$  mocno widoczne są częstotliwości  $6f_1 \times n$ . W przypadku wystąpienia uszkodzeń tranzystorów bądź czujnika położenia wirnika, następuje okresowy zanik tego prądu (por. tab. 1), co skutkuje pojawieniem się częstotliwości  $f_1$  i jej kolejnych wielokrotności w widmie amplitudowym prądu  $i_{DC}$ .

## 5. PODSUMOWANIE

W artykule poddano badaniom kaskadowy układ sterowania prędkości i prądu wejściowego dla silnika PM BLDC, z wykorzystaniem wejściowego regulatora napięcia (przetwornicy DC/DC). Użycie tego dodatkowego elementu może być w przypadkach niektórych napędów korzystne z uwagi np. na ograniczenie strat. Dlatego też konieczna jest analiza zachowania się napędu w przypadku wystąpienia uszkodzeń różnych typów. Badania symulacyjne wykazały podobieństwo wyników uzyskanych w prezentowanej strukturze układu sterowania z wynikami wcześniej uzyskanymi [13], [14]. Prezentowana topologia jednakże ma jedną istotną wadę – uszkodzenie tranzystora mocy w wejściowym regulatorze napięcia powoduje odcięcie napędu od źródła zasilania, co może być niedopuszczalne np. w pojazdach elektrycznych. Można temu zaradzić, rozbudowując strukturę układu zasilania, by po wykryciu uszkodzenia tego elementu przełączył się do trybu pracy z regulacją napięcia w komutatorze elektronicznym, który zostanie dołączony bezpośrednio do źródła zasilania, z pominięciem uszkodzonego regulatora.

## LITERATURA

- [1] BYOUNG-KUK L., TAE-HYUNG K., EHSANI M., *On the feasibility of four-switch three-phase BLDC motor drives for low cost commercial applications: topology and control*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 18, 164–172.
- [2] FANG J., LI W., LI H., XU X., *Online Inverter Fault Diagnosis of Buck-Converter BLDC Motor Combinations*, IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, Vol. 30, No. 5, 2674–2688.
- [3] ISERMANN R., *Fault-Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg 2006.
- [4] JAKUBIEC B., *Napęd pojazdu elektrycznego z wielofazowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi*, Przegląd Elektrotechniczny, 2015, nr 12, 125–128.
- [5] JIBIN ZOU, KAI LIU, JIANHUI HU, JUNLONG LI, *A Modified C-Dump Converter for BLDC Machine Used in a Flywheel Energy Storage System*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 47, No. 10, 4175–4178.

- [6] MAKIEŁA D., TOMASZCZYK T., *Bezczujnikowe sterowanie silnika wysokoobrotowego PM BLDC przy pomocy metody bazującej na napięciach międzyfazowych*, Przegląd Elektrotechniczny, 2014, nr 4, 92–96.
- [7] KRYKOWSKI K., *Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym. Analiza, właściwości, modelowanie*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [8] KRYKOWSKI K., BODORA A., *Properties of the Electronic Commutator Designed for Two Zone Operation of PM BLDC Motor Drive*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics „ISIE 2005”, 2005, 177–182.
- [9] KUMAR C.S., KUMAR N.S., RADHIKA P., *Torque ripple minimization in BLDC motor using DC-DC sepic converter*, Przegląd Elektrotechniczny, 2014, nr 9, 146–150.
- [10] SIKORA A., ZIELONKA A., *Układ zasilania silnika BLDC z uwzględnieniem, specyfiki napędu pojazdu drogowego*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2012, nr 96, 7–11.
- [11] SIKORA A., ZIELONKA A., *Ograniczenie strat mocy w silniku BLDC wynikających z pulsacji prądu zasilania*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, 2011, nr 90, 205–212.
- [12] SKÓRA M., *Praca napędu z silnikiem PM BLDC w warunkach awarii tranzystora komutatora elektronicznego*, XII Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym „SENE 2015”, 2015, 1–6.
- [13] SKÓRA M., KOWALSKI C.T., *Analiza wpływu wybranych uszkodzeń sterownika silnika PM BLDC na widma prądów fazowych*, Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe, 2015, nr 108, 7–13.
- [14] SKÓRA M., KOWALSKI C.T., *Analiza wpływu uszkodzeń czujników na pracę napędu z silnikiem PM BLDC*, Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe, 2014, nr 104, 37–42.
- [15] LAI Y.S., LIN Y.K., *Assessment of Pulse-Width Modulation Techniques for Brushless DC Motor Drives*, Conference Record of the 2006 Industry Applications Conference, 2006, Vol. 4, 1629–1636.

#### ANALYSIS OF INFLUENCE OF SELECTED FAULTS ON PM BLDC MOTOR DRIVE IN SUPPLY SYSTEM WITH EXTERNAL VOLTAGE REGULATOR. SIMULATION RESEARCH

The paper presents a simulation test cascade control system of PM BLDC motor speed with subordinated current control loop. Tests had been performed in Matlab/Simulink in the case when an external voltage regulator is a source for electronics commutator. In this case it has the only role of the commutation, according to the name. The work presents the influence of some faults on waveforms of the phase currents, supply motor current and motor speed. To assess the state also proposed hodograph's analysis of the spatial vector of stator currents and an analysis of spectra current amplitude. Selected results of simulation research have been presented.