

## Praca napędu z silnikiem PM BLDC w warunkach awarii tranzystora komutatora elektronicznego

**Streszczenie.** Celem niniejszej pracy jest przedstawienie pełnego procesu diagnostycznego sterownika silnika PM BLDC – od wykrycia uszkodzenia, jego identyfikacji i izolacji aż do działania napędu po dokonaniu kompensacji uszkodzenia. Wyniki zilustrowano przykładowymi przebiegami uzyskanymi podczas eksperymentu na stanowisku badawczym.

**Abstract.** The paper presents a complete diagnostic process of PM BLDC motor driver – from detection of the transistor fault, the fault identification, isolation and finally compensation of damage. The results are illustrated with examples of waveforms obtained during an experiment on laboratory stand. (PM BLDC motor drive under electronic commutator transistor faults conditions).

**Słowa kluczowe:** silnik bezszczotkowy, awarie tranzystorów, kompensacja uszkodzeń, falownik czterotranzystorowy.

**Keywords:** brushless motor, open switch fault, fault compensation, four switch inverter.

### Wstęp

Współczesne urządzenia stają się coraz bardziej skomplikowane ze względu na coraz większe wymagania jakościowe, eksploatacyjne i niezawodnościowe. Jedną z ich ważniejszych części składowych jest układ napędowy. Często wyposażony jest on w maszyny elektryczne, na które przepisy w ostatnich latach zwracają szczególną uwagę. Rosnące wymagania co do sprawności silników elektrycznych powodują wzrost popularności konstrukcji z magnesami trwałymi. W tej grupie można wyróżnić silniki z magnesami trwałymi: synchroniczne (PMSM) i bezszczotkowe prądu stałego (PM BLDC). Integralną częścią takiego napędu jest dodatkowy układ energoelektroniczny pełniący funkcję komutatora elektronicznego. 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.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie postępowania, jakie należy przeprowadzić, by przejść cały proces diagnostyczny od detekcji uszkodzenia tranzystora, jego identyfikacji, izolacji, aż do działania napędu po dokonaniu kompensacji uszkodzenia.

### Rodzaje uszkodzeń

Uszkodzenia w napędach z silnikami elektrycznymi mogą mieć różne przyczyny, a towarzyszyć im mogą skutki elektryczne, wibroakustyczne, magnetyczne i cieplne. Niezależnie od typu silnika, można wyróżnić kilka głównych miejsc powstawania uszkodzeń [1][2][3][4]:

- w stanie (np. uszkodzenia izolacji uzwojeń, zwarcia w uzwojeniach),
- w wirniku,
- w układzie mechanicznym (np. uszkodzenia łożyska, niewspółosiowe połączenie silnika z maszyną roboczą, ekscentryczność wirnika [3][5], uszkodzenie przekładni bądź sprzęgła itd.),
- w energoelektronicznym układzie przekształtnikowym (np. zwarcia lub brak przewodzenia tranzystorów, bądź uszkodzenia czujników).

W silnikach z magnesami trwałymi istnieje również ryzyko odklejenia się magnesów od wirnika oraz ich odmagnesowania [5] w wyniku zbyt wysokiej temperatury lub przekroczonego natężenia prądu pracy [3]. W zaawansowanych układach regulacji dodatkowe problemy mogą powodować czujniki niezbędne do działania algorytmów sterowania [4] (np. czujniki napięcia, prądu, prędkości obrotowej czy położenia wirnika [6][7][8][9]).

### Metody diagnostyki

Przedstawione powyżej grupy uszkodzeń można wykrywać na wiele sposobów [1][3]:

- za pomocą metod bazujących na modelach matematycznych (obwodowych, polowo-obwodowych, obserwatorów [10], filtru Kalmana, identyfikacji parametrów online [11]),
- za pomocą metod analizy sygnałów (analiza widmowa prądów, napięć, drgań, strumieni poosiowych, analizy wyższych rzędów – transformacja falkowa, bispectrum, analiza gęstości energii sygnału [2]),
- wykorzystując metody sztucznej inteligencji [1][12] (sieci neuronowe, układy neuronowo-rozmyte) do analizy danych uzyskanych z poprzednich metod.

W analizie uszkodzeń układów przekształtnikowych wykorzystuje się również hodografy wektorów prądów stojana lub strumienia [13] lub można wykorzystać wprost czasowe przebiegi prądowe [14], opracowując na ich podstawie symptomy uszkodzeń i przesłanki potrzebne do identyfikacji typu uszkodzenia.

Zadaniem wspomnianych metod diagnostycznych jest dostarczenie symptomów uszkodzeń, na podstawie których można wnioskować o rodzaju i miejscu uszkodzenia. Kolejnym etapem przetwarzania jest odpowiednia reakcja układu sterowania:

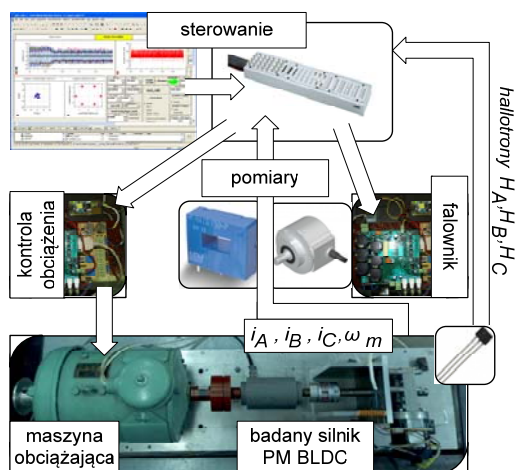
- dokonanie rekonfiguracji sprzętowej [4][15][16] lub programowej [10][17][18],
- przejście z pracy czujnikowej do bezczujnikowej,
- w skrajnych wypadkach niezwłoczne zatrzymanie napędu.

Można zauważyć, że do aplikacji o zwiększonym stopniu wiarygodności przewidziane są specjalne silniki wielofazowe [10][19], w których uszkodzenie w 1-2 fazach można w łatwy sposób skompensować poprzez zmianę w układzie sterowania, bez znaczącej utraty jakości pracy.

### Opis oraz charakterystyka techniczna stanowiska laboratoryjnego

W pracy przedstawiono badania laboratoryjne zrealizowane na stanowisku badawczym [20][21] (schemat na rysunku 1). Badany silnik PM BLDC typu PBL 86-118 (parametry w tabeli 1), wyposażony w przekładnię oraz enkoder inkrementalny, obciążony był maszyną prądu stałego skonfigurowaną do pracy w trybie regulacji momentu elektromagnetycznego. Układ sterowania zrealizowany został w procesorze sygnałowym DS1103 firmy dSpace GmbH. Oprogramowanie sterujące opracowano w języku C ze względu na wymaganą szybkość przetwarzania programu. Wykorzystano

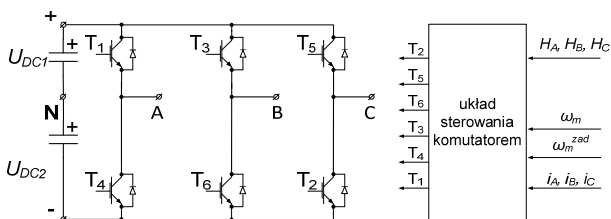
środowisko ControlDesk do kontroli napędu, wyboru trybu jego pracy i akwizycji danych. Silnik zasilany jest za pośrednictwem falownika napięciowego autorskiego rozwiązania (rys. 2), pełniącego rolę komutatora elektronicznego. Zasilanie silnika odbywa się w sposób klasyczny, blokowy, z regulacją napięcia metodą PWM przy wykorzystaniu górnych tranzystorów falownika [21][22]. Wybór przewodzących faz (kierunek przepływu prądu w danej fazie) określany jest dzięki sygnałom z hallotronowych czujników położenia wirnika zgodnie z (1). Do pomiaru prądów fazowych oraz napięć zasilających wykorzystano przetworniki firmy LEM, dzięki czemu uzyskano całkowitą izolację galwaniczną obwodu sterowania i obwodu mocy. Praca napędu w sytuacjach awaryjnych jest uzyskiwana bez fizycznego niszczenia elementu, na drodze programowej, poprzez brak sterowania tranzystorów.



Rys. 1. Schemat poglądowy stanowiska badawczego

Tabela 1. Parametry wykorzystanego silnika PM BLDC

parametr	wartość
typ	PBL 86-118
prędkość znamionowa silnika $\omega_{mN}$	3000 obr/min
znamionowy moment elektromagnetyczny $m_{eN}$	1,1 Nm
napięcie znamionowe $u_{DC,N}$	48 V
prąd znamionowy $i_{DC,N}$	11 A
liczba par biegunów $p_b$	4
przełożenie przekładni redukującej prędkość $i$	30:1



Rys. 2. Struktura typowego komutatora elektronicznego z układem sterowania

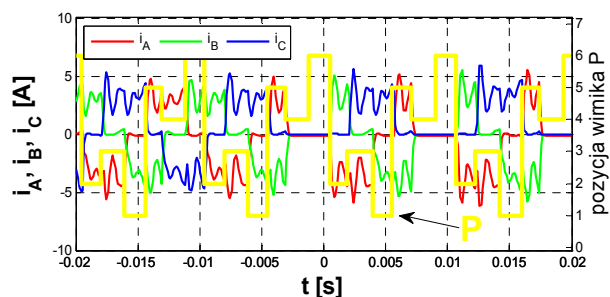
$$\begin{aligned}
 s_A &= (\bar{H}_B \cap H_A - H_B \cap \bar{H}_A) \cdot S(\omega_m^{zad}) \\
 s_B &= (\bar{H}_C \cap H_B - H_C \cap \bar{H}_B) \cdot S(\omega_m^{zad}) \\
 s_C &= (\bar{H}_A \cap H_C - H_A \cap \bar{H}_C) \cdot S(\omega_m^{zad})
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

gdzie  $s_k$  ( $k \in \{A, B, C\}$ ) określa kierunek przepływu (znak) prądu w fazie  $k$ ,  $H_k$  oznacza sygnał wyjściowy z czujnika położenia wirnika, traktowany jako wartość logiczna (0/1), a  $S(\omega_m^{zad}) \in \{-1, 1\}$  oznacza znak zadanej prędkości mechanicznej.

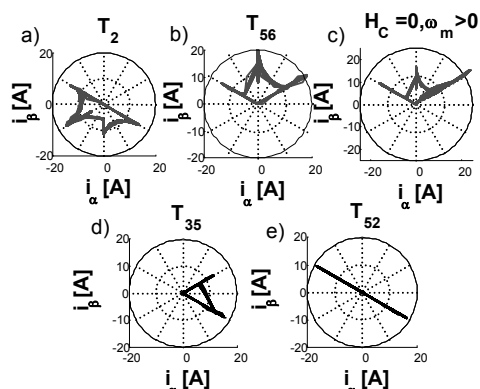
## Metoda diagnostyki i identyfikacji uszkodzeń pojedynczego tranzystora.

Nieprawidłowość pracy łączników tranzystorowych może objawiać się ciągłym ich przewodzeniem (zwarcie w obwodzie), bądź też brakiem przewodzenia (przerwa w obwodzie), niezależnie od sygnału sterującego, przy czym dioda zwrotna współpracująca z danym tranzystorem może pozostać sprawna. Przypadek ciągłego załączenia (zwarcia) może zostać sprowadzony za pomocą dodatkowych bezpieczników do przypadku typu przerwa [24]. Przyczyną braku poprawnej pracy nie zawsze musi być sam łącznik tranzystorowy, gdyż za jego pracę odpowiedzialnych jest szereg elementów, począwszy od prawidłowego programu sterującego, poprzez pin wyjściowy układu sterującego, bloki zasilania aż po blok wzmacniania (driverów) i/lub izolacji galwanicznej sygnału, dołączone bezpośrednio do bramek tranzystorów [24].

Aby prawidłowo wykryć i zlokalizować uszkodzenie, należy najpierw zdefiniować symptomy, którymi ono się objawia. Niesprawność elementów półprzewodnikowych mocy powoduje znaczące zmiany w sygnałach czasowych prądów fazowych, prądu obwodu pośredniczącego, w ich widmach amplitudowych [25], w sygnałach czasowych momentu i prędkości obrotowej. Klasyczne blokowe zasilanie silnika PM BLDC prowadzi do tego, że już przy uszkodzeniu pojedynczego tranzystora występują chwile, podczas których nie płynie prąd a silnik nie generuje momentu elektromagnetycznego (rys. 3). Z kolei gdy wirnik dokona obrotu i zasilanie odbywać się będzie przez kolejną parę (sprawnych) tranzystorów, układ regulacji może wymuszać znaczące prądy, by zniwelować uchyb prędkości (momentu). Specyficzny dla danego typu uszkodzenia kształt przyjmuje hodograf wektora prądów fazowych (rys. 4), który normalnie ma kształt zbliżony do sześciokąta.



Rys. 3. Prądy fazowe po uszkodzeniu tranzystora  $T_2$  (P – zakodowana sektor położenia wirnika)

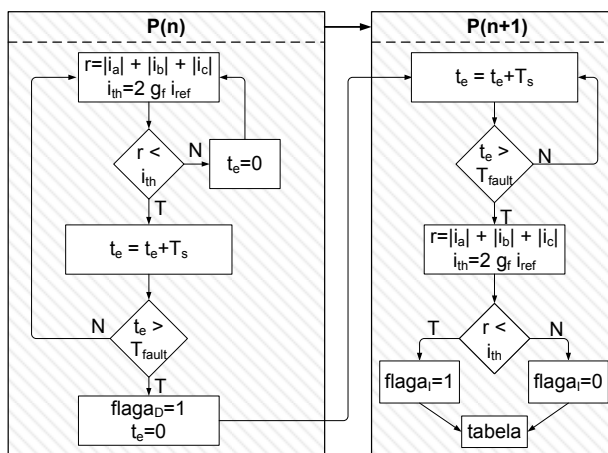


Rys. 4. Przykłady hodografów wektora prądów fazowych po wystąpieniu uszkodzeń różnego typu: brak przewodzenia tranzystora  $T_2$  a), równoczesny brak przewodzenia tranzystorów  $T_5$  i  $T_6$  b), uszkodzenie czujnika  $H_C$  tego rodzaju, że zwraca on ciągle wartość „0”, niezależnie od rzeczywistego położenia wirnika c), równoczesny brak przewodzenia tranzystorów  $T_3$  i  $T_5$  d), równoczesny brak przewodzenia tranzystorów  $T_5$  i  $T_2$  e)

Ekstrakcja symptomów uszkodzenia wymaga odpowiedniego przygotowania sygnałów, w tym przypadku prądowych. W tym kontekście ciekawą jest propozycja przedstawiona w [14], gdyż jest prosta w implementacji i nie wymaga skomplikowanych obliczeń, takich jak transformata Fouriera [2], falkowa [12] czy też identyfikacja online parametrów [11][19]. W dalszej części zostanie przedstawione działanie metody, opierające się na prostej analizie prądów.

Idea metody [14] polega na ciągłym sprawdzaniu, czy zsumowane mierzone prądy fazowe są większe niż pewna część prądu zadanego. Jeśli warunek ten nie jest spełniony przez znaczący procent czasu przebywania wirnika w danym położeniu (danym sektorze), to otrzymuje się pierwszą przesłankę mówiącą o awarii. Po obrocie wirnika do następnego sektora, należy ponownie sprawdzić relację pomiędzy prądami zadanymi i mierzonymi. Mając do dyspozycji informację o poprzednim i bieżącym sektorze położenia wirnika oraz relacji między prądami w stanach normalnym i awaryjnym, można wyznaczyć numer uszkodzonego tranzystora.

Algorytm opisanego postępowania przedstawiono na rysunku 5. W położeniu wirnika  $P(n)$  (2) porównywany jest sygnał residuum  $r$  (3) z progiem  $i_{th}$  (4). Jeśli zachodzić będzie relacja (5) przez co najmniej czas  $T_{fault}$  (6), to awaria zostanie wykryta i zapamiętana poprzez ustawienie znacznika  $flaga_D$ . W kolejnym położeniu wirnika  $P(n+1)$  należy ocenić, czy w dalszym ciągu mierzony prąd jest niższy od progu  $i_{th}$ , ustawić odpowiednio poziom znacznika  $flaga_i$ , a następnie z tabeli jak np. tabela 2 wybrać odpowiedni przypadek. Pewność i szybkość działania opisanego metody można ustalić za pomocą dwóch parametrów:  $k_f$  (odpowiedzialnego za czas zliczania w ramach danego sektora  $P$ ) i  $g_f$  (odpowiedzialnego za poziom do porównania). Przykładowy przebieg opisywanych sygnałów podczas działania detektora przedstawiono na rysunku 6.



Rys.5. Schemat metody detekcji tranzystorów wg [14]

$$(2) \quad P = 4H_A + 2H_B + H_C$$

$$(3) \quad r = |i_A| + |i_B| + |i_C|$$

$$(4) \quad i_{th} = 2g_f i_{refDC}$$

$$(5) \quad r < i_{th}$$

$$(6) \quad T_{fault} = k_f \frac{2\pi}{p_b \omega_m N}$$

gdzie  $i_k$  ( $k \in \{A, B, C\}$ ) – prądy fazowe,  $i_{th}$  – próg przełączania,  $i_{refDC}$  – prąd zadany (wyjście nadrzędnego regulatora prędkości w kaskadowej strukturze sterowania),  $T_{fault}$  – czas graniczny dla detekcji uszkodzenia,  $g_f, k_f$  – parametry,  $N=6$  dla silnika trójfazowego – liczba sektorów położenia wirnika przypadająca na obrót,  $\omega_m$  [rad/s] – prędkość kątowna mechaniczna.

Tabela 2. Reguły identyfikacji uszkodzonego tranzystora (rozszerzenie z [14])

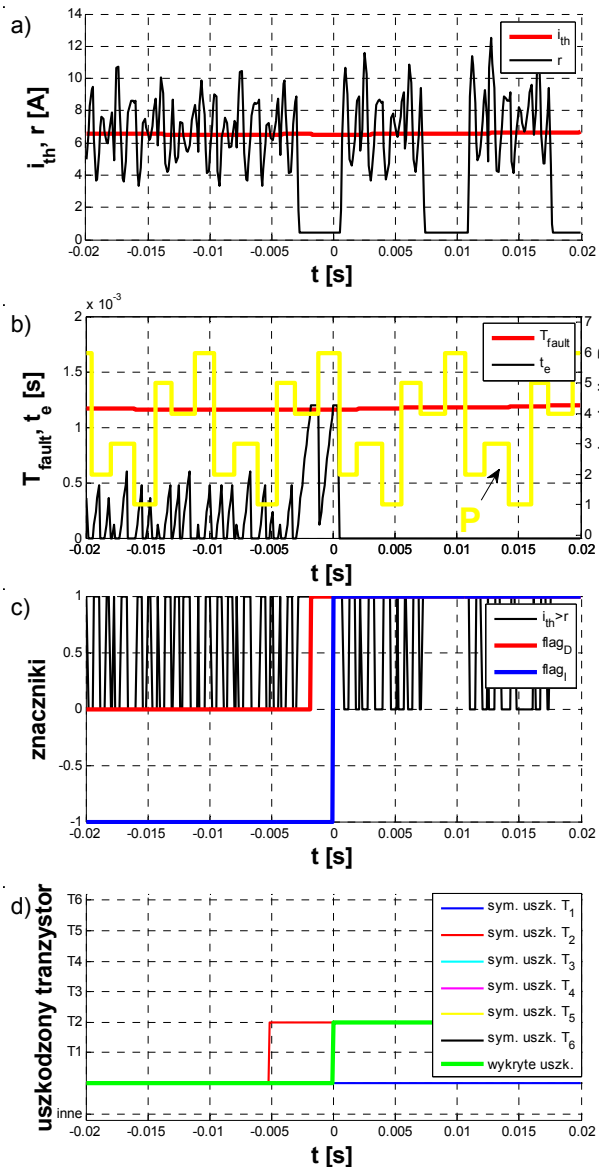
$P(n) \rightarrow P(n+1)$ $\omega_m > 0$	$flaga_i$	oznaczenie uszkodzonego tranzystora	$flaga_i$	$P(n) \rightarrow P(n+1)$ $\omega_m < 0$
4 → 6	0	<b>T1</b>	1	3 → 2
	1	<b>T2</b>	0	
6 → 2	0	<b>T2</b>	1	1 → 3
	1	<b>T3</b>	0	
2 → 3	0	<b>T3</b>	1	5 → 1
	1	<b>T4</b>	0	
3 → 1	0	<b>T4</b>	1	4 → 5
	1	<b>T5</b>	0	
1 → 5	0	<b>T5</b>	1	6 → 4
	1	<b>T6</b>	0	
5 → 4	0	<b>T6</b>	1	2 → 6
	1	<b>T1</b>	0	
W pozostałych przypadkach problem nierozpoznany, wartość zwracana: -1. Jeśli dodatkowo stwierdzono symptomy uszkodzenia czujnika położenia wirnika – wartość zwracana: -2.				

Prostota metody niesie za sobą również ograniczenia. Przede wszystkim nadaje się do detekcji pojedynczego nieprzewodzącego tranzystora. W przypadku wystąpienia awarii co najmniej dwóch tranzystorów (bądź też braku sterowania – przypadek awarii czujnika położenia wirnika), w wyniku wskazywany będzie jeden z nich, bądź będzie informacja, że przypadek ten nie pasuje do żadnego wzorca zebranego w tabeli 2. Innym zauważonym ograniczeniem działania detektora jest fakt, że silnik musi być w jakimś stopniu obciążony, tj. prąd zadany musi być większy od prądu biegu jałowego. Czas od wystąpienia uszkodzenia do jego identyfikacji zależy od przyjętych parametrów  $k_f$  oraz  $g_f$ . Niekiedy jednak detekcja i identyfikacja nie następuje w pierwszym możliwym położeniu wirnika  $P$ , w którym uszkodzenie się uwidacznia, lecz dopiero w kolejnych. Można temu zaradzić, zmniejszając nieco parametr czasowy  $k_f$ .

Konieczne jest również diagnozowanie stanu łączników tranzystorowych przed rozpoczęciem pracy napędu. Ich działanie można sprawdzić w prosty sposób, mianowicie załączając kolejne pary tranzystorów (zgodnie z tabelą 3) i stwierdzając przy których kombinacjach nie ma przepływu prądu. Z uwagi na niskie rezystancje uzwojeń silników należy wykorzystać modulację PWM z niedużym współczynnikiem wypełnienia, natomiast czas testu każdej pary dobrać w ten sposób, by nie był zbyt długi, ale by można było odróżnić wymuszone prądy od zakłóceń pomiarowych. Wskazanie nieprzewodzących tranzystorów następuje po porównaniu średniego prądu w każdej testowanej parze z wartością graniczną i regułami zebranymi w tabeli 4, co schematycznie przedstawiono na rysunku 7. Przykład działania pokazano na rysunku 8.

Podana metoda, przy swojej prostocie, ma również ograniczenia: wirnik zostanie obrócony o jeden obrót (elektryczny), przy uszkodzeniach typu zwarcie (ciągłe przewodzenie danego łącznika) powoduje, że układ mocy zostaje awaryjnie odłączony przez zabezpieczenie nadprądowe, nie pozwala również określić miejsca uszkodzenia, jeśli niesprawne są więcej niż 2-3 tranzystory (przy braku możliwości przepływu prądu w jakiegokolwiek kombinacji załączonych tranzystorów), ponadto

w niektórych przypadkach może oceniać dodatkowo sprawny łącznik jako uszkodzony (np. gdy nie będą pracowały łączniki  $T_3$  i  $T_5$ , prąd nie będzie mógł również płynąć przez  $T_4$ , zatem jako potencjalnie uszkodzone zostaną wskazane łączniki  $T_3, T_4, T_5$ ). Nie są to istotne wady, gdyż w tych przypadkach moduł mocy nie nadaje się do dalszej pracy i napęd nie może być dalej eksploatowany i powinien zostać poddany serwisowi.



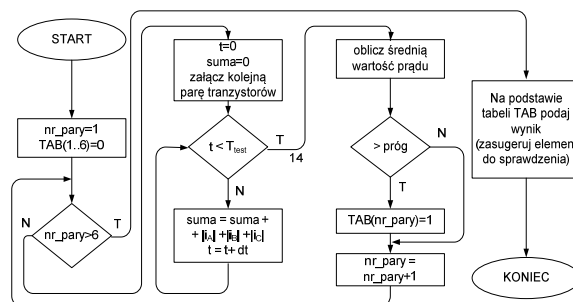
Rys.6. Działanie metody detekcji uszkodzonych tranzystorów

Tabela 3. Pary załączanych tranzystorów podczas testu

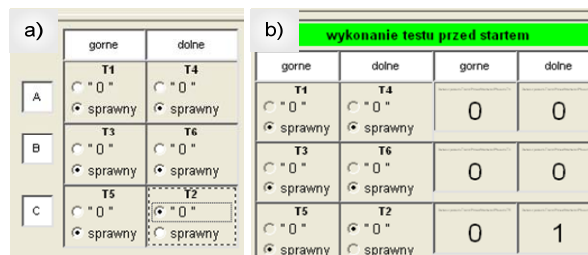
numer pary	nr tranzystora	
	PWM	ON
1	1	6
2	1	2
3	3	2
4	3	4
5	5	4
6	5	6

Tabela 4. Reguły detekcji uszkodzonych tranzystorów przed rozpoczęciem pracy, na podstawie tabeli TAB

warunek, po którego spełnieniu uszkodzony (podejrzany) jest tranzystor	numer tranzystora
$TAB(1)=0 \vee TAB(2)=0$	1
$TAB(2)=0 \vee TAB(3)=0$	2
$TAB(3)=0 \vee TAB(4)=0$	3
$TAB(4)=0 \vee TAB(5)=0$	4
$TAB(5)=0 \vee TAB(6)=0$	5
$TAB(6)=0 \vee TAB(1)=0$	6



Rys.7. Schemat metody sprawdzania sprawności łączników tranzystorowych przed rozpoczęciem pracy



Rys.8. Przykład testu z użyciem metody sprawdzania sprawności łączników tranzystorowych przed rozpoczęciem pracy, zrzut z programu kontrolnego zrealizowanego w ControlDesk: a) panel zadawania uszkodzeń tranzystorów (wybór „0” na liście wyboru powoduje brak sterowania danego tranzystora), b) wynik pracy algorytmu („1” wskazuje na tranzystor, z którym był problem, w tym przypadku  $T_2$ )

### Kompensacja uszkodzeń tranzystorów

Po wykryciu i zlokalizowaniu awarii należy podjąć odpowiednie działania, by zapewnić pracę odporną na uszkodzenia. W przypadku uszkodzeń tranzystorów, możliwe są do wykonania następujące kroki:

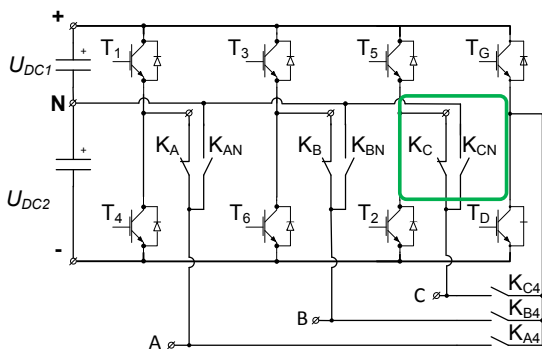
- zignorowanie wykrytego uszkodzenia,
- zmiana sposobu sterowania,
- wykorzystanie dodatkowej, redundantnej gałęzi w przekształtniku,
- wykorzystanie przekształtnika o zredukowanej topologii.

Podejście przedstawione w podpunkcie a) jest najprostsze, napęd powinien dalej pracować, może obniżyć prędkość w zależności od obciążenia, lecz występują znaczące i niekorzystne chwilowe zaniki momentu elektromagnetycznego prowadzące do drgań, szybszego zużycia się łożysk i będące niekorzystnym czynnikiem dla procesu produkcyjnego / użytkownika pojazdu. Istnieje ryzyko, że po zatrzymaniu napęd pozostanie nieruchomy. Podejście z podpunktu b) ma największy sens w przypadku silników wielofazowych [10][19], choć można próbować w przypadku standardowych trójfazowych [17], za cenę znaczącej komplikacji algorytmu sterowania i konieczności dokładnej identyfikacji parametrów silnika. Rozwiązanie z podpunktu c) [15] jest najprostsze, pozwala na zachowanie dotychczasowych warunków pracy napędu, lecz jest najbardziej kosztowne – wymaga dodatkowego półmostka w falowniku oraz dodatkowo dwukierunkowych łączników (np. przekaźnikowych) w każdej fazie silnika, by odłączyć ją od półmostka z uszkodzonym tranzystorem i dołączyć ją do zapasowego półmostka. Dodatkowo należy dokonać przekierowania sygnałów sterujących.

Pewnym kompromisem jest opcja opisana w podpunkcie d), w zastosowaniu do silników bezszczotkowych prądu stałego spopularyzowana przez zespół, któremu przewodził prof. Ehsani [16]. Polega ona na przełączeniu fazy silnika, w której wystąpiło uszkodzenie tranzystora do

punktu neutralnego zasilania (co nie jest trudne przy parzystej liczbie akumulatorów), do czego również potrzebne są łączniki dwukierunkowe. Pewne zmiany mogą być konieczne w algorytmie sterowania, żeby np. zredukować pulsacje momentu elektromagnetycznego [23].

Na rysunku 9 przedstawiono propozycję układu komutatora elektronicznego, który pozwoli na skompensowanie uszkodzeń tranzystorów w dwóch fazach, jedną awarię dzięki dodatkowej gałęzi w falowniku, drugą dzięki dołączeniu fazy do punktu neutralnego zasilania. Rozwiązanie takie wymaga 9 pomocniczych łączników, które wymagają własnego sterowania, zajmują miejsce i zwiększają finalny koszt. Wybór typu tych łączników (przełączniki, moduły tranzystorowe) nie jest prosty, gdyż należy wziąć pod uwagę łatwość sterowania, możliwość modulowanej pracy łącznika, sposób załączania i czas zadziałania.

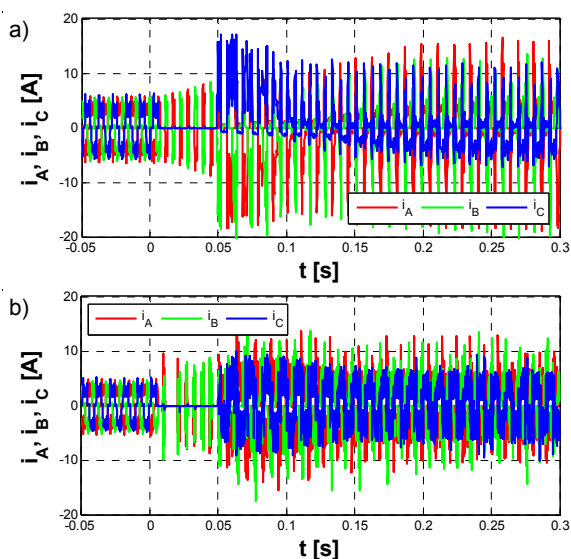


Rys.9. Topologia falownika umożliwiającą kompensację dowolnego uszkodzenia tranzystorów, za pomocą łączników przełącznikowych, z wykorzystaniem dodatkowej gałęzi przekształtnika bądź dołączeniem fazy do punktu neutralnego zasilania (na podstawie [15][23])

Stanowisko badawcze przedstawione na rysunku 1 wyposażono jedynie w przełącznik przelączny, którego styki połączone jak styki  $K_C$  i  $K_{CN}$  z rysunku 9, brak jest dodatkowej gałęzi w przekształtniku. W ten sposób możliwe jest sprawdzenie metody kompensacji uszkodzeń tranzystorów w fazie C, poprzez przełączenie fazy C silnika do punktu neutralnego zasilania. Na rysunku 10 przedstawiono przykład przebiegu prądów fazowych po wykryciu i kompensacji uszkodzenia tranzystora  $T_2$ . Rekonfiguracja połączeń następuje w stanie bezprądowym, tj. po uprzednim zaniesieniu sterowania tranzystorami w fazie C. Z przebiegów na rysunku 10 wynika także, że czas przełączenia był długi. Niestety wynika to z faktu zastosowania wolnego przełącznika, którego cewka załączana jest napięciem niższym od nominalnego.

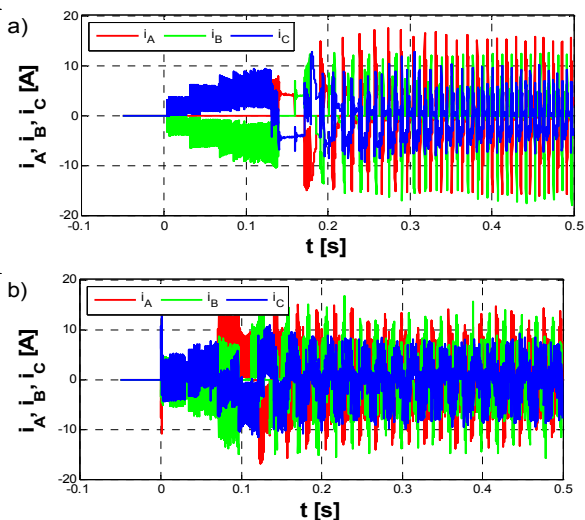
Pewnego komentarza wymaga tutaj sposób sterowania tranzystorami falownika o zredukowanej topologii. Zasada działania silnika PM BLDC nie została zmieniona, w dalszym ciągu należy zasilac uzwojenia odpowiednio do pozycji wirnika. Zmieniły się jednakże możliwe wektory napięć, pojawiło się ograniczenie w postaci nierówności napięć  $U_{DC1}$ ,  $U_{DC2}$  na kondensatorach zasilających (rys. 9), co dodatkowo odkształca przebiegi prądowe. Stąd układ sterowania po rekonfiguracji powinien w najprostszym przypadku pozwalać na niezależną regulację prądów fazowych, dzięki czemu podane wyżej ograniczenia nie będą bardzo dotkliwe. Do testów wybrano regulator prądów typu P (rys. 10a: z modulacją napięcia na tranzystorach górnych, dolne załączane na stałe w danym sektorze położenia wirnika) oraz histerezowy (rys. 10b: z modulacją bipolarną). Zauważono, że regulator histerezowy, mimo niskiej wynikowej częstotliwości łączeń, pozwala uzyskać bardziej równomierne prądy fazowe, mniejsze tętnienia

momentu oraz utrzymywać napięcie na kondensatorach  $U_{DC1}$  i  $U_{DC2}$  na zbliżonym poziomie, jednakże powoduje większy hałas. Ponieważ w większości przypadków, układ sterowania reguluje prądy fazowe, więc po rekonfiguracji nie trzeba wprowadzać większych zmian (oprócz braku sterowania tranzystorów uszkodzonej fazy). Możliwe jest jednakże dokładniejsze rozważenie problemu sterowania falownikiem o zredukowanej topologii, gdyby czas planowanego działania napędu był dłuższy niż niezbędny z punktu widzenia obsługującego pojazd/ maszynę. Należy wtedy rozważyć osobny układ sterowania dla każdego położenia wirnika, dzięki czemu osiągnie się mniejsze pulsacje momentu elektromagnetycznego i prędkości obrotowej [23]. Z dotychczasowych obserwacji wynika również, że regulator histerezowy z ustaloną częstotliwością łączeń może być stosowany w układach odpornych na uszkodzenia tranzystorów i/lub czujników położenia wirnika, gdyż po wystąpieniu awarii nie pozwala prądom fazowym osiągać zbyt dużych (niebezpiecznych) amplitud. Może on być stosowany w klasycznej formie, jak i w postaci wektorowej [18].



Rys.10. Kompensacja uszkodzenia tranzystora  $T_2$  – w układzie falownika o zredukowanej topologii (zadana prędkość obrotowa 50%  $\omega_{mN}$ ), gdzie po uszkodzeniu pracują: a) regulatory prądów fazowych typu P (rozwiniecie przykładu z rysunku 3), b) histerezowe regulatory prądów fazowych

Nieco uwagi należy poświęcić również procedurze rozruchu i wymuszaniu przez dłuższy czas tych samych wektorów napięć. Powodem są układy *bootstrap*, standardowo zasilające drivery górnych tranzystorów ( $T_1$ ,  $T_3$ ,  $T_5$ ). Jeśli ich kondensatory zostaną rozładowane, nie będzie można kontynuować załączenia tranzystorów. Można temu zapobiec, unikając 100% wypełnienia sygnału PWM (np. zredukować do 99%) lub co jakiś czas załączyć krótkotrwale inną parę tranzystorów, by doładować kondensatory *bootstrap*. Szczególnie to drugie podejście może być przydatne podczas rozruchu z wybranych pozycji. Przykład procesu rozruchowego przedstawiono na rysunku 11. Na przebiegu z rysunku 11b dodatkowo widać, że przed rozpoczęciem ruchu układ sterowania przez krótką chwilę załączył dolne tranzystory (tj.  $T_4$  i  $T_6$ , bo  $T_2$  należy do fazy niesterowanej z powodu kompensacji uszkodzenia  $T_2$ ), żeby mogły naładować się kondensatory *bootstrap*. Efektem tego jest krótka „szpilka” widoczna w prądach fazowych w czasie  $t=0$  s.



Rys.11. Rozruch w układzie falownika o zredukowanej topologii z regulatorami prądów fazowych typu P (a) oraz histerezowymi (b)

### Podsumowanie

W pracy przedstawiono postępowania na wypadek awarii tranzystora komutatora elektronicznego w napędzie z silnikiem PM BLDC. Uszkodzenia czujników położenia wirnika (CPW), mające wpływ na sterowanie komutatora, zostały omówione np. w pracach [8][21][25]. Kompletny system diagnostyczny powinien rozróżniać oba typy uszkodzeń, by podjąć prawidłowe działanie. W omawianym systemie wykrycie symptomu uszkodzeń CPW powoduje zignorowanie informacji wyjściowej detektora (komentarz na dole tabeli 2). Podjęty temat badań jest niezwykle istotny w napędach pojazdów, stąd wynika potrzeba rozwoju tych zagadnień.

**Autor:** mgr inż. Marcin Skóra, Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: [marcin.skora@pwr.edu.pl](mailto:marcin.skora@pwr.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Kowalski Cz., Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013
- [2] Tashakori A., Ektesabi M., Fault Diagnosis of In-wheel BLDC Motor Drive for Electric Vehicle Application, IV Intelligent Vehicles Symposium, 2013, 925-930
- [3] 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 (VPPC), 2011, 1-7
- [4] Meingue F., Fault-tolerant permanent-magnet synchronous machine drives. Fault detection and isolation, control reconfiguration and design considerations, rozprawa doktorska, Bruksela, 2012
- [5] 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), 2061-2069
- [6] Tashakori A., Ektesabi M., A Simple Fault Tolerant Control System for Hall, Effect Sensors Failure of BLDC Motor, IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013, 1011-1016
- [7] Scelba G., Scarcella G., De Donato G., Giulii Capponi F., Bonaccorso F., Fault Tolerant Rotor Position and Velocity Estimation Using Binary Hall-Effect Sensors for Low Cost Vector Control Drives, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013 IEEE, 15-19 Sept. 2013, 2123-2130
- [8] Skóra M., Kowalski C.T., 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, 2013, 357-366
- [9] 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, 2007, 3481-3485
- [10] Olivieri C., A fault-adaptive and observer-based sensorless strategy for a fault-tolerant five-phase BLDC motor, IEEE International Symposium on Sensorless Control for Electrical Drives and Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics (SLED/PRECEDE), 2013, 1-8
- [11] Meagan M., Jayakumar J.M., Jaleel A., Fault Detection in Brushless DC Motors using Discrete Square Root Filtering and Fuzzy Logic, International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies, 2012, 12-17
- [12] Awadallah M.A., Morcos M.M., Automatic Diagnosis and Location of Open-Switch Fault in Brushless DC Motor Drives Using Wavelets and Neuro-Fuzzy Systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 21 (2007), n.1, 104-111
- [13] Estima J.O., Freire N.M.A., Cardoso A.J.M., Recent Advances in Fault Diagnosis by Park's Vector Approach, IEEE Workshop on Electrical Machines Design Control and Diagnosis (WEMDCD), 2013, 279 - 288
- [14] Byoung-Gun P., Kui-Jun L., Rae-Young K., Tae-Sung K., Ji-Su R., Dong-Seok H., Simple Fault Diagnosis Based on Operating Characteristic of Brushless Direct-Current Motor Drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (2011), n.5, 1586-1593
- [15] Errabelli R.R., Mutschler P., Fault-Tolerant Voltage Source Inverter for Permanent Magnet Drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27 (2012), n.2, 500-508
- [16] 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*, 18 (2003), 164-172
- [17] Aghili F., Fault-Tolerant Torque Control of BLDC Motors, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26 (2011), n.2, 355-363
- [18] Freire N. M.A, Cardoso A. J. M., Fault-Tolerant Converter for AC Drives using Vector-Based Hysteresis Current Control, IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2013, 249-256
- [19] Salehifar M., Salehi Arashloo R., Moreno-Equilaz M., Sala V., Romeral L., Fault Detection and Fault Tolerant Operation of a Five Phase PM Motor Drive Using Adaptive Model Identification Approach, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2 (2014), 212-223
- [20] Skóra M., Stanowisko do badania układów napędowych z silnikiem PM BLDC, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*, nr 70, 2014, 183-192
- [21] Skóra M., Kowalski C.T., Analiza wpływu uszkodzeń czujników na pracę napędu z silnikiem PM BLDC, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, (2014), nr 104, 37-42
- [22] Krykowski K., Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym. Analiza, właściwości, modelowanie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011
- [23] Masmoudi M., Badi B.E., Masmoudi A., DTC of B4-Inverter-Fed BLDC Motor Drives With Reduced Torque Ripple During Sector-to-Sector Commutations, *IEEE Transactions On Power Electronics*, 29 (2014), n.9, 4855-4865
- [24] Sobański P., Fuzzy-logic-based approach to voltage inverter fault diagnosis in induction motor drive, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 6, 149-153
- [25] Skóra M., Kowalski C.T., Analiza wpływu wybranych uszkodzeń sterownika silnika PM BLDC na widma prądów fazowych, *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, nr 108, (2015), 7-13