

*falowniki napięcia, uszkodzenia tranzystorów IGBT,  
układy odporne, redundantne układy mocy,  
wektorowa modulacja napięcia*

Piotr SOBAŃSKI\*, Teresa ORŁOWSKA-KOWALSKA\*

## **ZASTOSOWANIE REDUNDANTNEGO FALOWNIKA NAPIĘCIA W UKŁADZIE NAPĘDOWYM Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM**

W artykule zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych modelu układu napędowego z trójfazowym silnikiem indukcyjnym zasilanym z dwupoziomowego falownika napięcia, w którym zastosowano dodatkowe urządzenia półprzewodnikowe umożliwiające rekonfigurację obwodów przekształtnika po wystąpieniu awarii jednego z tranzystorów. Główną uwagę poświęcono zagadnieniu sterowania napędem po identyfikacji uszkodzonego łącznika półprzewodnikowego falownika napięcia. Wskazano na istotne ograniczenia struktury regulacji prędkości silnika oraz określono zakres jej możliwych zastosowań przemysłowych.

### **1. WPROWADZENIE**

Obecnie najszerzej stosowaną grupą napędów elektrycznych stanowią układy z silnikami prądu przemiennego. Zakres ich przemysłowych aplikacji stale powiększa się oraz obejmuje nie tylko realizację typowych procesów produkcyjnych, ale również zastosowania w przemyśle samochodowym, w pojazdach hybrydowych oraz elektrycznych. W przypadku samochodów napędzanych jedynie silnikiem elektrycznym awaria przekształtnika energoelektronicznego najczęściej prowadzi do unieruchomienia pojazdu, a czasem może się przyczynić do zagrożenia zdrowia jego użytkowników. Zastosowanie redundantnych układów przekształtnikowych pozwala na zachowanie częściowej bądź pełnej funkcjonalności napędu, przez co minimalizowane jest ryzyko związane z użytkowaniem pojazdu. Z uwagi na aspekt ekonomiczny, prefero-

---

\* Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: piotr.sobanski@pwr.wroc.pl, teresa.orlowska-kowalska@pwr.wroc.pl

wane są rozwiązania o zredukowanej liczbie dodatkowych elementów energoelektronicznych, podwyższających koszty produkcji oraz obniżających sprawność układu napędowego [7].

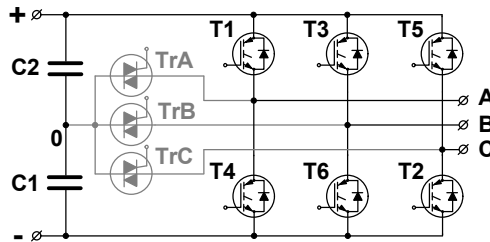
Pośród uszkodzeń tranzystorów falowników energoelektronicznych wyróżnia się zwarcia oraz awarie polegające na braku zdolności tranzystora do przewodzenia prądu elektrycznego [1]. W przypadku błędów programowych bądź uszkodzeń urządzeń izolujących układ sterowania od silnopiętowego, zastosowanie nowoczesnych układów sterowania tranzystorów (ang. *transistor drivers*) pozwala na uniknięcie dalszych, destruktywnych skutków spowodowanych przepływem prądu zwarciowego w gałęzi falownika, w której doszło do awarii tranzystora. W nieprawidłowo pracującej fazie przekształtnika wymuszane jest rozwarcie dwóch łączników. Innym sposobem zmniejszającym ryzyko wystąpienia rozległych uszkodzeń przekształtnika na skutek zwarcia jest zastosowanie w każdej gałęzi falownika dodatkowych szybkich bezpieczników, które mają za zadanie trwale odizolować uszkodzonego obwodu [2], [3], [5], [16]. Awaria układów sterowania tranzystorów może skutkować trwałym rozwarciem tranzystora, np. podczas uszkodzenia przetwornicy zasilającej sterownik tranzystora. W wyniku tego, zdolność do generowania napięcia o przebiegu sinusoidalnym przez standardowy, dwupoziomowy falownik napięcia jest istotnie ograniczona. Permanentny brak zdolności do przewodzenia prądu przez jeden z tranzystorów przekształtnika skutkuje jednokierunkowym przepływem prądu w uszkodzonej fazie napędu, co powoduje oscylacje momentu elektromagnetycznego silnika oraz znaczne obniżenie jakości regulacji prędkości mechanicznej napędu [9], [10].

Na podstawie wyżej przedstawionej analizy, można potwierdzić zasadność stosowania metod diagnostyki nieprawidłowości pracy przekształtnika, polegających na braku zdolności do przewodzenia prądu przez tranzystory. Jak wskazano, uszkodzenia te mogą być następstwem działania układów zabezpieczających przed zwarciami bądź są wynikiem awarii sterowników tranzystorów.

W niniejszej pracy pominięto aspekt diagnostyki awarii tranzystorów, który został poruszony w innych pracach autorów [11]–[15]. Na podstawie przedstawionej w artykule [7] analizy właściwości głównych grup przekształtników redundantnych, dokonano wyboru topologii, której zastosowanie w napędach pojazdów samochodowych jest najbardziej uzasadnione. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych modelu napędu indukcyjnego zasilanego z wyspecjalizowanego przekształtnika energoelektronicznego, umożliwiającego zachowanie wysokiej funkcjonalności układu napędowego po awarii jednego z tranzystorów falownika. Badania zostały zrealizowane w środowisku MATLAB/Simulink przy dodatkowym użyciu biblioteki SimPower System. Awaria tranzystorów została zasymulowana poprzez trwałe wymuszenie sygnału logicznego o wartości zero na bramkę odpowiedniego łącznika [9].

## 2. TRÓJFAZOWY FALOWNIK NAPIĘCIA O REDUNDANTNEJ STRUKTURZE

Na podstawie przeprowadzonej analizy właściwości redundantnych systemów falownikowych [7], [16] wybrano układ (rys. 1), który zapewnia nie tylko zdolność do generacji znamionowego momentu elektromagnetycznego silnika  $m_e$  przy uszkodzeniu tranzystorów jednej fazy przekształtnika, ale również charakteryzuje się niskim kosztem produkcji.

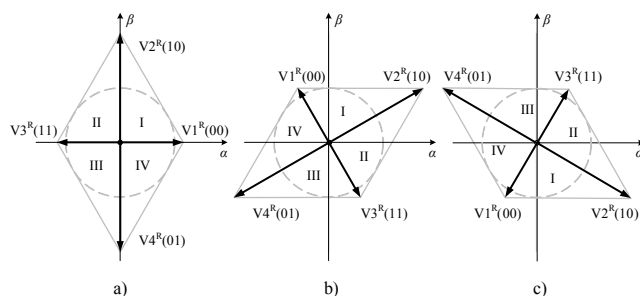


Rys. 1. Trójfazowy, dwupoziomowy falownik napięcia wyposażony w obwody do odizolowania uszkodzonej fazy przekształtnika

Pokazany na rysunku 1 falownik napięcia został opisany po raz pierwszy w artykule [3]. Jego budowa opiera się w znacznym stopniu na topologii układu, który został zaprezentowany w pracy [5]. Po zdiagnozowaniu awarii polegającej na braku przewodzenia prądu jednego z tranzystorów T1, ..., T6 jest wymuszane rozwarcie drugiego, prawidłowo funkcjonującego łącznika uszkodzonej fazy falownika, a następnie jest załączany triak TrA, TrB lub TrC, w zależności od fazy, w której nastąpiła awaria. Równocześnie jest wymuszane rozwarcie drugiego, prawidłowo funkcjonującego łącznika uszkodzonej fazy falownika. W przeciwieństwie do stanu awaryjnego, po przeprowadzeniu rekonfiguracji obwodów przekształtnika, istnieje możliwość generacji dwukierunkowych napięć fazowych falownika. Na rysunku 2 pokazano opisane w stacjonarnym układzie współrzędnych  $\alpha$ - $\beta$  wektory napięć fazowych przekształtnika  $\mathbf{V1}^R$ , ...,  $\mathbf{V4}^R$ , odpowiadające czterem możliwym do uzyskania konfiguracjom stanów łączników półprzewodnikowych, tj. „0” oznacza, że tranzystor jest rozwarci, natomiast „1” symbolizuje stan przewodzenia prądu. Pierwsza wartość logiczna odnosi się do tranzystora z grupy anodowej fazy następującej po tej, w której doszło do uszkodzenia, natomiast druga wartość do tranzystora z grupy anodowej fazy poprzedzającej fazę uszkodzoną. Pozostałe stany łączników są znane biorąc pod uwagę, że w tej samej chwili przewodzi tylko jeden z tranzystorów danej fazy prawidłowo funkcjonującego falownika.

Maksymalna wartość amplitudy wektora napięcia falownika w liniowym zakresie modulacji wynosi  $U_{s\text{maks}} = 1/(2\sqrt{3})U_{dc}$ , gdzie  $U_{dc}$  oznacza wartość napięcia sta-

łego członu pośredniczącego przekształtnika. Wartość ta jest dwukrotnie mniejsza niż przypadku prawidłowo funkcjonującego układu przed rekonfiguracją obwodów. W konsekwencji, po nastąpieniu rekonfiguracji obwodów falownika, znamionowy moment elektromagnetyczny silnika  $m_{eN}$  może zostać osiągnięty jedynie przy obniżonej, zadanej prędkości mechanicznej napędu. Maksymalna wartość prędkości kątowej silnika  $\omega_m$ , przy której jest możliwe utrzymanie na stałym poziomie znamionowego momentu elektromagnetycznego maszyny jest równa około połowie wartości prędkości znamionowej  $\omega_{mN}$ . Biorąc pod uwagę charakter docelowej aplikacji falownika, tj. napęd samochodu elektrycznego, ograniczenie zakresu regulacji prędkości w systemie napędowym ma drugorzędne znaczenie. Dużą zaletą prezentowanego układu przekształtnikowego jest fakt, że istnieje możliwość długotrwałej pracy napędu po przeprowadzeniu procesu rekonfiguracji połączeń falownika, ponieważ amplituda prądów fazowych stojana  $i_{sA,B,C}$  w warunkach pracy ze znamionową wartością obciążenia silnika  $m_N$  nie przekracza wartości znamionowej. W związku z tym, po wystąpieniu awarii falownika, zagwarantowane jest bezpieczeństwo pracy napędzanego pojazdu do chwili naprawy, tj. przywrócenia pełnej funkcjonalności przekształtnika.



Rys. 2. Wektory możliwych do uzyskania napięć fazowych przekształtnika po załączeniu jednego z triaków: TrA (a), TrB (b) oraz TrC (c)

Tabela 1. Wektory napięcia falownika po przeprowadzeniu rekonfiguracji jego obwodów

Wektor napięcia	$V1^R(00)$	$V2^R(10)$	$V3^R(11)$	$V4^R(01)$
	[V]			
Uszkodzona faza A	$\frac{U_{dc}}{3} e^{j0}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}} e^{j\frac{\pi}{2}}$	$\frac{U_{dc}}{3} e^{j\pi}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}} e^{j\frac{3\pi}{2}}$
Uszkodzona faza B	$\frac{U_{dc}}{3} e^{j\frac{2\pi}{3}}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}} e^{j\frac{\pi}{6}}$	$\frac{U_{dc}}{3} e^{j\frac{5\pi}{3}}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}} e^{j\frac{7\pi}{6}}$
Uszkodzona faza C	$\frac{U_{dc}}{3} e^{j\frac{4\pi}{3}}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}} e^{j\frac{5\pi}{6}}$	$\frac{U_{dc}}{3} e^{j\frac{\pi}{3}}$	$\frac{U_{dc}}{\sqrt{3}} e^{j\frac{5\pi}{6}}$

Po rekonfiguracji obwodów przekształtnika zachodzi konieczność dokonania zmian w algorytmie sterowania mostkiem. Obecnie najczęściej stosowaną metodą modulacji napięć fazowych w falownikach napięcia jest modulacja wektorowa (ang. *Space Vector Modulation*). Wektor zadanego napięcia wyjściowego falownika  $\mathbf{V}_{\text{ref}}$  jest uzyskiwany poprzez wymuszenie na pewien czas wektorów przyległych do sektora płaszczyzny zespolonej  $\alpha\text{-}\beta$ , w którym znajduje się  $\mathbf{V}_{\text{ref}}$ . Jak wynika z rys. 2, po rekonfiguracji obwodów falownika, możliwe jest uzyskanie jedynie wektorów aktywnych, które zostały zdefiniowane w tabeli 1. Zachowanie stałej częstotliwości łączeń przekształtnika jest uzyskiwane dzięki generacji wektora napięcia przekształtnika o amplitudzie równej zero. Załączenie na taki sam czas dwóch wektorów o równej amplitudzie, tym samym kierunku, lecz przeciwnym zwrocie pozwala uzyskać pożądaną wektor zerowy  $\mathbf{V0}$ . W przypadku analizowanej topologii przekształtnika do generacji  $\mathbf{V0}$  korzystniejszym wyborem, ze względu na mniejsze pulsacje momentu elektromagnetycznego silnika, jest zastosowanie wektorów o mniejszych amplitudach, tzn.  $\mathbf{V1}^R$  oraz  $\mathbf{V3}^R$  [4], [6].

### 3. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH UKŁADU WEKTOROWEGO STEROWANIA SILNIKIEM INDUKCYJNYM W WARUNKACH AWARII JEDNEGO Z TRANZYSTORÓW FALOWNIKA

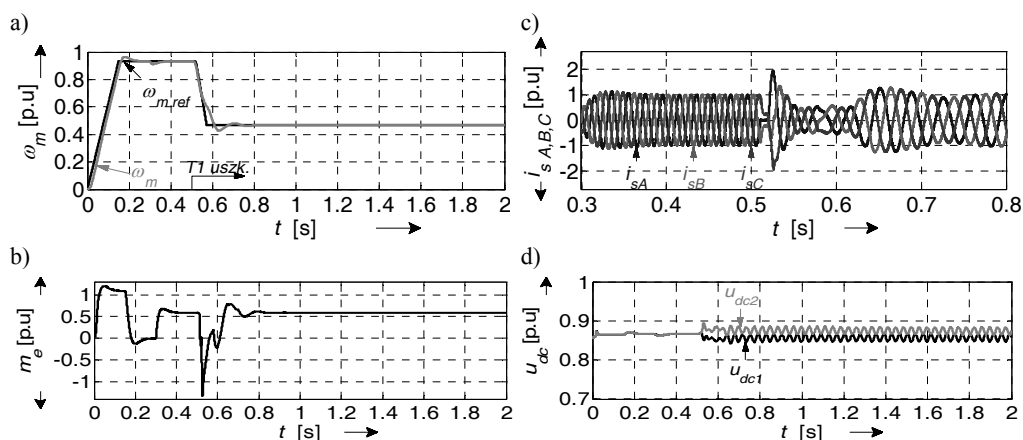
W niniejszym rozdziale zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych napędu o bezpośrednim sterowaniu polowo-zorientowanym w warunkach uszkodzenia polegającego na braku przewodzenia prądu jednego z łączników tranzystorowych falownika napięcia. Model symulacyjny został zrealizowany w środowisku Matlab/Simulink, przy dodatkowym wykorzystaniu biblioteki SimPower System. Dane znamionowe silnika napędowego podano w tabeli 2. Ponadto zastosowano normalizację zmiennych stanu napędu zgodnie z [8].

Tabela 2. Dane znamionowe silnika

Moc $P_N$	1,1 kW
Napięcie zasilające $U_N$	220/380 V
Prąd stojana $I_N$	5,0/2,9 A (1 p.u.)
Prędkość obrotowa $n_N$	1400 obr/min (0,93 p.u.)
Częstotliwość napięcia zasilającego $f_N$	50 Hz
Liczba par biegunów $p_b$	2
Napięcie stałe filtra wejściowego falownika ( $u_{dc1} + u_{dc2}$ )	563V (1,73 p.u.)

Na rysunku 3 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych napędu pracującego ze znamionowym momentem obciążenia  $m_N$  oraz znamionową prędkością kątową  $\omega_m = \omega_{mN}$ . W chwili  $t = 0,5$  s zasymulowano uszkodzenie tranzystora T1 falownika. Po

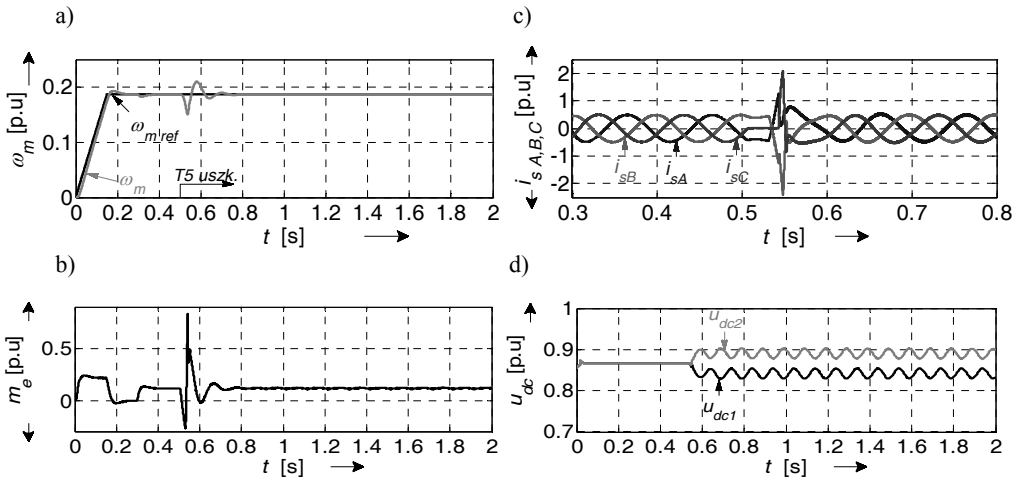
zdiagnozowaniu uszkodzenia w czasie krótszym niż dwa okresy przebiegu prądu silnika [14], w automatyczny sposób została przeprowadzona rekonfiguracja przekształtnika, tzn. został załączony triak TrA oraz na bramkę tranzystora T4 podano sygnał powodujący jego rozwarcie. Następnie zmniejszono prędkość zadaną napędu do wartości odpowiadającej połowie prędkości znamionowej. Pokazano przebiegi zmiennych stanu, tj. zadanej prędkości kątovej  $\omega_{m,ref}$  oraz zmierzonej  $\omega_m$  (rys. 3a), momentu elektromagnetycznego  $m_e$  (rys. 3b), prądów fazowych  $i_{sA,B,C}$  silnika (rys. 3c) oraz przebiegi napięcia  $u_{c1}$ ,  $u_{c2}$  na kondensatorach C1 oraz C2 filtra wejściowego falownika (rys. 3d) w krótkim odstępie czasowym, uwzględniającym pracę napędu przed wystąpieniem awarii łącznika T4 oraz po rekonfiguracji obwodów przekształtnika.



Rys. 3. Przebiegi: zadanej  $\omega_{m,ref}$  oraz zmierzonej  $\omega_m$  prędkości kątovej napędu (a), momentu elektromagnetycznego silnika  $m_e$  (b), prądów fazowych silnika  $i_{sA,B,C}$  (c) oraz napięć  $u_{dc1}$ ,  $u_{dc2}$  na kondensatorach C1 oraz C2 filtra wejściowego falownika (d) w warunkach awarii tranzystora T1, przy znamionowym obciążeniu napędu  $m_o = m_N$

Po zdiagnozowaniu awarii tranzystora T1, faza A silnika została przyłączona do punktu neutralnego 0 filtra przekształtnika za pomocą triaka TrA (rys. 1). W celu zredukowania pulsacji momentu elektromagnetycznego silnika, zmniejszono prędkość napędu do  $\omega_m = 0,5 \omega_{mN}$ . W stanie ustalonej pracy maszyny, stwierdzono brak istotnego wpływu niezbalansowanego napięcia na kondensatorach C1 oraz C2 na przebieg momentu elektromagnetycznego (rys. 3b), który po rekonfiguracji przekształtnika i obniżeniu prędkości kątovej napędu utrzymuje się na poziomie znamionowym, zapewniając poprawną pracę napędu z obciążeniem znamionowym. Po wyzwoleniu triaka TrA, obserwowana jest gwałtowna zmiana momentu  $m_e$  generowanego przez silnik, a następnie stabilizacja  $m_e$  na znamionowej wartości. W stanie ustalonej pracy silnika amplituda prądów fazowych stojana utrzymana jest na znamionowym poziomie, a ich kształt jest sinusoidalny.

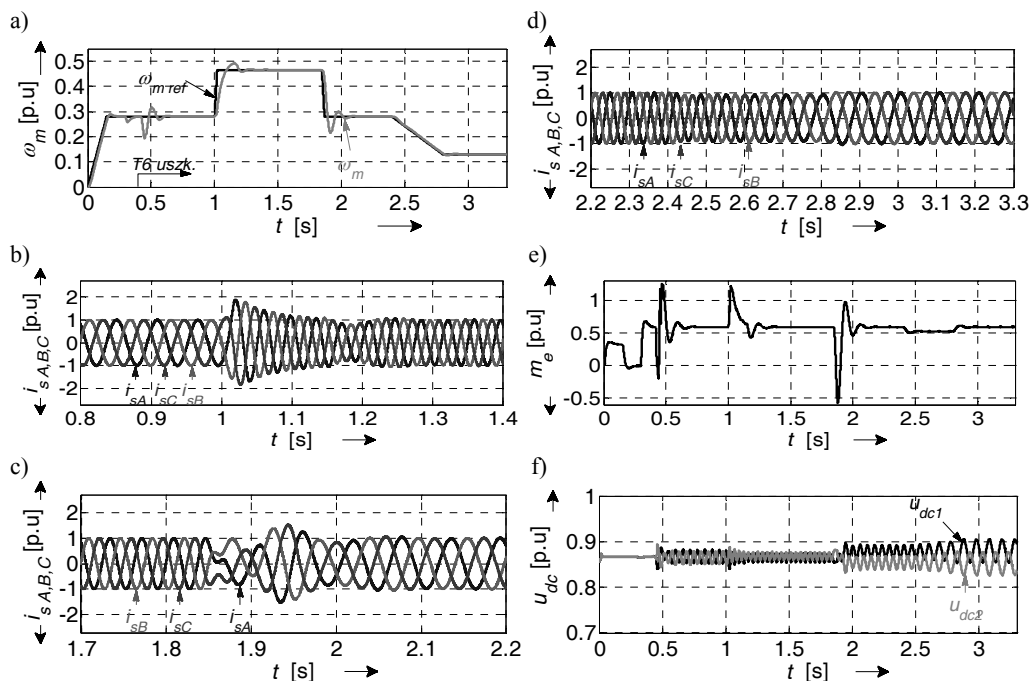
Na rysunku 4 przedstawiono wyniki badań pracy napędu z niską prędkością kątową  $\omega_m = 0,2 \omega_{mN}$  z momentem obciążenia  $m_o = 0,2 m_N$ , w trakcie symulacji awarii tranzystora T5. Oscylacje napięcia na kondensatorach C1 oraz C2 (rys. 4d), o zwiększonej amplitudzie w stosunku do wcześniej prezentowanego testu (rys. 3), wywołują widoczne pulsacje momentu elektromagnetycznego silnika. Niemniej jednak nadal zachowany jest sinusoidalny kształt prądów silnika (rys. 4c), napęd pracuje z zadanym obciążeniem, a przebiegi prędkości charakteryzują się brakiem widocznych oscylacji spowodowanych niezbalansowanym napięciem kondensatorów C1 oraz C2 (rys. 4 a).



Rys. 4. Przebiegi: zadanej  $\omega_{m\text{ref}}$  oraz zmierzonej  $\omega_m$  prędkości kątowej napędu (a), momentu elektromagnetycznego silnika  $m_e$  (b), prądów fazowych silnika  $i_{sA,B,C}$  (c) oraz napięć  $u_{dc1}$ ,  $u_{dc2}$  na kondensatorach C1 oraz C2 filtra wejściowego falownika (d) w warunkach awarii tranzystora T5, w trakcie obniżonej prędkości napędu oraz przy obciążeniu  $m_o = 0,2 m_N$

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, które dotyczą pracy napędu po wystąpieniu w chwili  $t = 0,5$  s awarii tranzystora T6 falownika. Krótko po załączeniu triaka TrB oraz dostosowaniu algorytmu modulacji napięcia dokonano zmiany prędkości kątowej napędu. Skokowym wymuszeniem prędkości towarzyszy chwilowy wzrost amplitudy prądów fazowych silnika, co sprzyja zwiększeniu się różnicy wartości napięć na kondensatorach filtra wejściowego falownika. Jak można również zauważyć, efekt niezbalansowania napięć  $u_{dc1}$  oraz  $u_{dc2}$  jest większy w trakcie pracy napędu z niższą prędkością kątową, tzn. wtedy gdy zmiany polaryzacji prądu płynącego w uszkodzonej fazie (prądu przepływającego przez kondensator filtra) mają mniejszą częstotliwość. Efekt niezbalansowanych napięć  $u_{dc1}$  oraz  $u_{dc2}$  może być znacznie zredukowany poprzez zastosowanie kondensatorów filtra obwodu pośredniczącego falownika napięcia o większej pojemności, niemniej jednak zabieg ten prowadzi do podwyższenia kosztów przekształtnika. Z przeprowadzonych te-

stów wynika, że niezależnie od wartości zadanej prędkości kątowej, dzięki właściwej rekonfiguracji układu mocy falownika po wystąpieniu awarii tranzystora oraz zastosowaniu odpowiedniej modulacji napięcia, silnik napędowy może pracować w warunkach obciążenia znamionowego.



Rys. 5. Przebiegi: zadanej  $\omega_{m,ref}$  oraz zmierzonej  $\omega_m$  prędkości kątowej napędu (a), prądów fazowych silnika  $i_{sA,B,C}$  (b, c, d), momentu elektromagnetycznego silnika  $m_e$  (e) oraz napięć  $u_{dc1}$ ,  $u_{dc2}$  na kondensatorach C1 oraz C2 filtra wejściowego falownika (f) w warunkach awarii tranzystora T6, przy różnej wartości zadanej prędkości kątowej napędu, przy obciążeniu  $m_o = m_N$

#### 4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych napędu indukcyjnego o sterowaniu połowo-zorientowanym, w którym silnik jest zasilany z falownika napięcia o budowie umożliwiającej regulację prędkości układu napędowego po wystąpieniu uszkodzenia, polegającego na braku zdolności przewodzenia prądu jednego z tranzystorów przekształtnika w różnych warunkach pracy napędu. Ponadto, wskazano na ograniczenia pracy układu napędowego wynikające z niezbalansowania napięć na kondensatorach filtra przekształtnika oraz niższej amplitudy możliwych do wygenerowania przez falownik napięć fazowych po uszkodzeniu jednego z tranzystorów.



Zaprezentowany układ napędowy charakteryzuje przede wszystkim niski koszt produkcji oraz możliwość długotrwałej pracy ze znamionowym momentem obciążenia po zejściu uszkodzenia tranzystora.

*Praca zrealizowana w ramach projektu finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki na podstawie decyzji DEC-2013/09/B/ST7/04199.*

*Praca została wykonana z wykorzystaniem Infrastruktury PL-Grid.*

#### LITERATURA

- [1] ALAVIJE H.S., AKHBARI M., *Investigation of Induction Motor Drive Behavior in Low-cost Fault Tolerant Control for Electric Vehicles*, IEEE 5th Int. Power Engineering and Optimization Conf., PEOCO, Shah Alam, Selangor, Malaysia, 2011, 176–181.
- [2] BOLOGNANI S., ZORDAN M.; ZIGLIOTTO M., *Experimental fault-tolerant control of a PMSM drive*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2000, Vol. 47, No. 5, 1134–1141.
- [3] DE ARAUJO RIBEIRO R.L., JACOBINA C.B., DA SILVA E.R.C., LIMA A.M.N., *Fault-Tolerant Voltage-Fed PWM Inverter AC Motor Drive Systems*, IEEE Trans. Industrial Electronics, 2004, Vol. 51, No. 2, 439–446.
- [4] EL BADASI B., BOUZIDI B., MASMOUDI A., *DTC Scheme for a Four-Switch Inverter-Fed Induction Motor Emulating the Six-Switch Inverter Operation*, IEEE Trans. on Power Electronics, 2013, Vol. 28, No. 7, 3528–3538.
- [5] FU JR., LIPO T.A., *A Strategy to Isolate the Switching Device Fault of a Current Regulated Motor Drive*, Proc. of IEEE Industry Appl. Soc. Ann. Meet., Toronto, Canada, 1993, Vol. 2, 1015–1020.
- [6] LEE H.H., DZUNG P.Q., PHUONG L.M., KHOA L.D., THANH H.T., *New Space Vector Control Approach for Four Switch Three Phase Inverter under DC – Link Voltage Ripple*, Proc. IEEE Int. Conf. Sustainable Energy Technologies, ICSET, Singapore, 2008, 1059–1064.
- [7] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., SOBAŃSKI P., *Przegląd dwupoziomowych falowników napięcia odpornych na uszkodzenia tranzystorów IGBT*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 69, Studia i Materiały, Nr 33, 2013.
- [8] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003, 60–64.
- [9] SOBAŃSKI P., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Wpływ uszkodzenia tranzystora IGBT falownika napięcia na przebiegi zmiennych stanu silnika indukcyjnego ze sterowaniem wektorowym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, Vol. 89, Nr 2b, 162–165.
- [10] SOBAŃSKI P., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Analiza wpływu uszkodzenia tranzystora IGBT falownika napięcia na przebiegi zmiennych stanu w napędzie indukcyjnym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 66, Studia i Materiały, Nr 32, 2012, 145–152.
- [11] SOBAŃSKI P., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Metoda diagnostyki uszkodzenia typu przerwa łącznika IGBT falownika napięcia w układzie wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, Vol. 89, Nr 6, 159–163.
- [12] SOBAŃSKI P., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Simple Sensorless Diagnosis Method for Open-Switch Faults in SVM-VSI-fed Induction Motor Drive*, IEEE-IECON '13 Conf., Vienna, Austria, 2013.
- [13] SOBAŃSKI P., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Diagnostyka awarii falownika napięcia w bezczujnikowym napędzie indukcyjnym z estymatorem prędkości typu MRAS<sup>CC</sup>*, XI Konferencja Naukowa. Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE, 2013, Łódź, Polska.

- [14] SOBAŃSKI P., *Szybka metoda diagnostyki uszkodzenia falownika napięcia w układzie bezpośredniego sterowania polowo zorientowanego*, XI Konferencja Naukowa. Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE, Łódź 2013.
- [15] SOBAŃSKI P., *Open-Circuit Fault Diagnosis Problem in Two-Level Voltage Inverter-Fed AC Drives*, XV International PhD Workshop OWD, Wisła 2013, 228–233.
- [16] WELCHKO B.A., LIPO T.A., JAHNS T.M., SCHULZ S.E., *Fault Tolerant Three-Phase AC Motor Drive Topologies: A Comparison of Features, Cost, and Limitations*, IEEE Trans. Power Electronics, 2004, Vol. 19, No. 4, 1108–1116.

#### APPLICATION OF REDUNDANT VOLTAGE INVERTER IN INDUCTION MOTOR DRIVE

In this paper simulation results related to a model of a three-phase two-level redundant voltage inverter-fed induction motor drive are presented. The described system, due to its reconfigurable topology, is capable to operate properly during an inverter open-switch failure. A main focus of the study has been oriented to the drive control after a transistor fault identification. In the article, limitations of the control method and its range of effective application were specified.