

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Piotra Sobańskiego
pt. „*Metody diagnostyki i sterowania w napędach elektrycznych z silnikami indukcyjnymi
w stanach awaryjnych dwupoziomowego przemiennika częstotliwości*”
opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki
Wrocławskiej z dnia 14.07.2017, l.dz. W-5 / 863 / 2017

1. Ogólna charakterystyka rozprawy

Praca składa się z ośmiu rozdziałów, w tym wprowadzenia i podsumowania, wykazu oznaczeń, wykazu literatury (109 pozycji) i dwóch załączników. We wprowadzeniu Autor definiuje pojęcie *sterowania tolerującego uszkodzenia* (STU) i wskazuje na *diagnostykę awarii* jako pierwszą fazę takiego sterowania, umożliwiającą identyfikację nieprawidłowo funkcjonującego elementu sterowanego urządzenia, ewentualną rekonfigurację urządzenia i odpowiednią modyfikację sterowania w celu skompensowania negatywnych skutków awarii. Autor przedstawia również wstępną klasyfikację metod diagnostycznych oraz topologii układów napędowych umożliwiających realizację STU. Kandydat przytacza wybrane dane statystyczne dotyczące uszkodzeń układów napędowych i przekształtników energoelektronicznych. Według tych danych 12% wszystkich uszkodzeń w odnośnej (niezdefiniowanej w rozprawie) kategorii napędów elektrycznych stanowią uszkodzenia tranzystorów przekształtników energoelektronicznych. Wśród uszkodzeń przekształtników energoelektronicznych uszkodzenia tranzystorów stanowią 31% przypadków, co uzasadnia szczególne zainteresowanie Kandydata diagnostyką tych właśnie uszkodzeń. Autor zapowiada rozpatrywanie wyłącznie uszkodzeń objawiających się brakiem przewodzenia tranzystora. Ta kwestia jest przedmiotem mojej uwagi 2.1. W rozdziale wprowadzającym przedstawiono również cele i tezę pracy. Cele pracy obejmują:

- „opracowanie metod diagnostyki uszkodzeń tranzystorów w dwupoziomowych prostownikach aktywnych i falownikach napięcia, pracujących w napędach z silnikiem indukcyjnym, prostych w realizacji praktycznej i dedykowanych do wybranych wektorowych metod sterowania SI,

- porównanie właściwości zaprojektowanych metod diagnostycznych, tzn. czasu lokalizacji uszkodzenia oraz skuteczności działania w różnych warunkach pracy napędu,
- zastosowanie techniki sterowania, która zapewnia poprawę jakości pracy napędu elektrycznego w warunkach awarii.”

Cele są ambitne, niemniej w ich sformułowaniu brakuje odniesienia do rozwiązań znanych z literatury. Tę uwagę można zastosować do tekstu rozprawy w całości (por. uwaga 2.2). Teza pracy brzmi następująco: „Zastosowanie opracowanych prądowych lub napięciowych metod diagnostyki uszkodzeń tranzystorów w dwupoziomowych prostownikach aktywnych i falownikach napięcia oraz użycie zaproponowanej techniki sterowania zapewnia znaczną poprawę jakości regulacji prędkości w napędach z silnikiem indukcyjnym w awaryjnych stanach pracy przekształtników”. Sformułowanie tezy jest przedmiotem uwagi merytorycznej 2.3.

Rozdział 2 („*Diagnostyka awarii energoelektronicznych układów przekształtnikowych*”) zawiera szczegółowe omówienie znanych z literatury metod diagnostyki uszkodzeń tranzystorów w trójfazowych falownikach napięcia oraz dwukierunkowych przekształtnikach sieciowych AC/DC. W podsumowaniu rozdziału Autor zapowiada prezentację własnych algorytmów diagnostycznych, jednak bez odniesienia do metod omówionych na podstawie literatury. Wyróżnikiem metod autorskich ma być prostota implementacji praktycznej układu ze sterowaniem tolerującym uszkodzenia, co nie wystarcza do zdefiniowania swoistego charakteru poszukiwanych i proponowanych rozwiązań.

W rozdziale 3 („*Metody sterowania napędami elektrycznymi w warunkach awarii tranzystorów przekształtnika energoelektronicznego*”) Autor omawia wybrane topologie przekształtników energoelektronicznych tolerujących awarie łączników półprzewodnikowych, w tym topologię wybraną do badań w ramach rozprawy. W rozdziale tym zawarto również przegląd algorytmów modulacji napięcia wyjściowego wybranej topologii falownika w warunkach awaryjnych.

W rozdziale 4 (zatytułowanym niezbyt trafnie „*Analiza układu napędowego tolerującego awarie tranzystorów przekształtnika energoelektronicznego*”) przedstawiono między innymi analizę działania falownika o podstawowej topologii 6T w warunkach awaryjnych. Mimo że wybrana do badań i analiz topologia falownika zawiera dodatkowe łączniki pomiędzy wyjściami falownika i punktem środkowym obwodu pośredniczącego – które umożliwiają pracę trójpoziomową falownika – Kandydat założył, że dodatkowe łączniki służą jedynie do

rekonfiguracji topologii 6T do topologii 4T po wykryciu awarii tranzystora w topologii podstawowej. Innymi słowy, w warunkach bezawaryjnych falownik pracuje jak klasyczny falownik dwupoziomowy 6T, a zatem zarówno sterowanie, jak i diagnostyka uszkodzeń dotyczą wyłącznie sześciu tranzystorów topologii podstawowej. Na podstawie przeprowadzonej analizy, Autor zaproponował dwie metody diagnostyki uszkodzeń tranzystorów w układach napędowych o zamkniętej strukturze sterowania prędkością silnika indukcyjnego: metodę opartą na analizie napięcia zadanego falownika oraz metodę opartą na analizie strumienia silnika. W omawianym rozdziale zaproponowano również dwie metody diagnostyki awarii tranzystorów w przekształtniku sieciowym AC/DC (jeden oparty na estymacji napięć prostownika, drugi wykorzystujący predykcję prądu sieci zasilającej). Jako zalety zaproponowanych metod Kandydat podkreśla prostotę implementacji oraz poprawne działanie zarówno przy pracy prostownikowej, jak i falownikowej. Ostatnim aspektem omówionym w rozdziale jest proponowany sposób modulacji napięcia falownika w warunkach normalnych i awaryjnych. Algorytm modulacji w warunkach awaryjnych obejmuje wyrównywanie napięć obwodu pośredniczącego i dokładne formowanie napięć fazowych mimo niezrównoważenia w obwodzie pośredniczącym.

W rozdziałach 5 i 6 (odpowiednio „*Weryfikacja skuteczności działania algorytmów diagnostyki awarii tranzystorów w falowniku napięcia*” i „*Weryfikacja skuteczności działania algorytmów diagnostyki awarii tranzystorów w prostowniku aktywnym*”) przedstawiono wyniki testów symulacyjnych i laboratoryjnych zaproponowanych metod diagnostyki uszkodzeń tranzystorów falownika napięcia zasilającego silnik indukcyjny i przekształtnika sieciowego AC/DC. Zaprezentowany bogaty program badań potwierdza skuteczność proponowanych metod.

W rozdziale 7 („*Weryfikacja działania zaprojektowanego napędu tolerującego awarie tranzystorów*”) przedstawiono wyniki badań symulacyjnych oraz laboratoryjnych zaproponowanego algorytmu modulacji napięcia w rozważanym układzie napędowym oraz całości zaproponowanego sterowania tolerującego uszkodzenia. Przeprowadzone badania potwierdzają założone korzystne właściwości proponowanych rozwiązań.

2. Uwagi merytoryczne

2.1 Autor rozpatruje wyłącznie uszkodzenia objawiające się brakiem przewodzenia tranzystora. Należy zwrócić uwagę na dwa aspekty. Po pierwsze, Autor w żaden sposób nie odnosi się do zagadnienia wczesnej (predykcyjnej) diagnostyki stanu łączników półprzewodnikowych, która ma największe znaczenie ekonomiczne. Po

drugie, Autor uzasadnia swoją koncentrację na uszkodzeniach typu przerwa m.in. w następujący sposób (str. 22): „Z uwagi na funkcjonalność obecnie wykorzystywanych sterowników bramek tranzystorów, tzn. m.in. ich zdolności do szybkiego zabezpieczania łączników w czasie zwarć, w niniejszej pracy uwagę poświęcono awariom tranzystorów polegającym na przerwach. ... Brak zdolności do przewodzenia prądu przez tranzystory może być efektem zadziałania zabezpieczenia przed zwarciem, tzn. wymuszone rozwarcie tranzystora przez sterownik jego bramki.” Warto zauważyć, że sterowniki bramkowe, o których pisze Autor sygnalizują zbyt wysokie napięcie kolektor-emiter tranzystora nominalnie załączonego za pomocą specjalnego wyjścia FAULT. Innymi słowy, funkcjonalność sterowników bramkowych, na którą powołuje się Autor, może uzasadniać tezę przeciwną, tj. że nie ma potrzeby wykrywania braku przewodzenia tranzystora za pomocą analizy prądów, napięć lub innych zmiennych skoro sterowniki wprost wskazują taki stan odpowiednim sygnałem diagnostycznym. Takie właściwości mają między innymi sterowniki HCPL A316J wykorzystywane w układzie laboratoryjnym Kandydata. Zasadne byłoby więc odniesienie się do tej kwestii w rozprawie.

- 2.2 W rozprawie brakuje wyraźnego odniesienia do rozwiązań znanych z literatury. Nie wykazano w sposób jasny potrzeby poszukiwania rozwiązań innych niż wcześniej opracowane. Kandydat nie przeprowadził badań rozwiązań innych niż swoje własne i nie przedstawił choćby najprostszej analizy porównawczej własnych rozwiązań z propozycjami wcześniejszymi.
- 2.3 Niektóre aspekty w sformułowaniu tezy rozprawy budzą wątpliwości. Po pierwsze, jakość regulacji prędkości po awarii nie zależy od zastosowanej metody diagnostyki uszkodzeń tranzystorów, więc problematyczne jest stwierdzenie, że zaproponowane metody diagnostyczne zapewniają „znaczną poprawę jakości regulacji”. Po drugie, Autor nie przeprowadził badań dotyczących jakości pracy napędu po awarii przekształtnika sieciowego, więc trudno uznać, że w rozprawie udowodniono jakąkolwiek prawdę na ten temat.
- 2.4 Wątpliwości budzi również następujące stwierdzenie (str. 44): „W przypadku diagnostyki awarii falownika czas lokalizacji nieprawidłowo pracującego tranzystora nie jest dłuższy niż jeden okres prądu silnika, co czyni opracowane metody konkurencyjnymi w stosunku do tych znanych z literatury.” Zgodnie z analizą literaturową przeprowadzoną przez Autora jest to typowa cecha różnych metod



diagnostycznych, więc proponowane metody są co najwyżej *porównywalne* pod tym względem, a nie konkurencyjne.

- 2.5 Dodatkowe łączniki pomiędzy wyjściami falownika i punktem środkowym obwodu pośredniczącego umożliwiają w warunkach bezawaryjnych pracę trójpoziomową falownika, jednak Kandydat założył, że łączniki te służą jedynie do rekonfiguracji topologii falownika po wykryciu awarii tranzystora w topologii podstawowej. Kandydat uzasadnia takie podejście dążeniem do unikania wzrostu liczby elementów podatnych na uszkodzenia. Jednak warto rozważyć, choćby krótkiego, byłoby inne podejście, tzn. pełne wykorzystanie możliwości falownika w normalnym stanie pracy (modulacja trójpoziomowa). Ewentualne uszkodzenia tranzystorów dodatkowych mogłyby być wykrywane z wykorzystaniem funkcjonalności sterowników bramkowych, o której mowa w uwadze 2.1.
- 2.6 Badania laboratoryjne dotyczące przekształtnika sieciowego, opisane w rozdziale 6, nie zostały przeprowadzone z wykorzystaniem przekształtnika wchodzącego w skład badanego układu napędowego, lecz innego przekształtnika obciążonego maszynami prądu stałego. Takie rozwiązanie nie zostało wyraźnie zasygnalizowane ani uzasadnione w tekście rozprawy (dopiero ostatnie zdanie w rozdziale 7 można uznać za dość niezręczne i lapidarne wyjaśnienie tego stanu rzeczy).
- 2.7 Str. 47: „Układ ten nazywany dalej falownikiem 4T, z uwagi na niską redundancję sprzętową, a przez to dużą niezawodność pracy, jest często wykorzystywany w systemach tolerujących awarie tranzystorów” – czy chodzi o „wykorzystywanie” w literaturze, czy realne zastosowania przemysłowe?
- 2.8 Str. 126: „Na podstawie przeglądu literatury naukowej stwierdza się, że około 12% wszystkich awarii w układach napędowych stanowią uszkodzenia tranzystorów. Brak jest informacji jednoznacznie określających, jaką część tych uszkodzeń stanowią przerwy w przewodzeniu prądu. Niemniej jednak, biorąc pod uwagę dużą liczbę artykułów naukowych traktujących o przerwach tranzystorów w przekształtnikach energoelektronicznych można stwierdzić, że zagadnienie to ma istotne znaczenie.” – diagnostyka przerw jest rzeczywiście bardzo popularna w literaturze, ale brak jest przełożenia tej popularności na realne znaczenie praktyczne i przykłady zastosowań przemysłowych.
- 2.9 Str. 74: „Zoptymalizowaną pod względem liczby przełączeń tranzystorów sekwencję załączeń poszczególnych wektorów dla analizowanego przykładu przedstawiono na



rysunku 4.15” – problematyczne sformułowanie (są sekwencje wymagające mniejszej liczby przełączeń).

3. Uwagi szczegółowe i redakcyjne

- 3.1 Str. 16, rys. 1.6: dwukrotnie na rysunku użyto opisu „Redundancja programowa”, choć z prawej strony powinna być zapewne „Redundancja sprzętowa”.
- 3.2 Str.21, rys. 1.12: brak wyjaśnienia czego dotyczy lewy wykres kołowy, a czego prawy.
- 3.3 Autor często niepotrzebnie używa przecinków (np. „przyczyniają się do generacji, tzw. fałszywych alarmów”, „W drugim załączniku pokazano metodologię, zastosowaną do sformułowania algorytmu modulacji ...”, „Przyjęto, że zależność pomiędzy prędkością napędu, a częstotliwością napięcia falownika jest liniowa”, „test prowadzący do wyeliminowania ewentualności generowania przez system diagnostyczny, tzw. fałszywych alarmów”, „stosuje się transformację do układu współrzędnych, zorientowanego względem wektora napięcia sieci zasilającej”, „liczba analizowanych próbek sygnałów, składających się na jeden okres napięcia sieci zasilającej”, „zbadano stany awaryjne, występujące podczas różnych wartości prędkości napędu” i in.)
- 3.4 W pracy zdarzają się zdania niepełne, urwane itp. (np. „...”, natomiast opisując metody bezpośrednio.”, „W czwartym rozdziale przedstawiono wyniki analizy wpływu uszkodzeń tranzystorów w dwupoziomowym falowniku napięcia zasilającym maszynę indukcyjną.” – wpływu na co?, „W wyniku tego, że w niektórych sektorach układu współrzędnych uchyb regulacji strumienia nie jest możliwy do skompensowania.”)
- 3.5 Autor wielokrotnie pisze o pracy „generatorowej” przekształtnika sieciowego, co należy uznać za sformułowanie niewłaściwe.
- 3.6 „nie mniej jednak” (str. 27, 64) – powinno być *niemniej*; „nie przekraczającej” (str.71) – powinno być *nieprzekraczającej*.
- 3.7 Różne usterki językowe i logiczne dostrzeżone w pracy: „poprzez obliczenie obliczając” (str. 32), „w odróżnieniu do” (str. 33), „Przedstawione spostrzeżenia mogą zostać wykorzystane do bezbłędnej identyfikacji jednego bądź dwóch tranzystorów w falowniku napięcia” (chodzi o identyfikację uszkodzenia, a nie tranzystora), „metody wykorzystujący” (str. 40), „sygnał diagnostyczny D wynosi zero” (str. 40), „układu falownikowego umożliwiający” (str. 46), „Zgodnie z zaproponowanym

strukturą” (str. 64), „oznacza wartość całkowitą z zaokrągloną w dół” (str.65), „wymuszono nawrót silnia” (str. 111), „Celem rozprawy w tym zakresie było wykazanie właściwości (podkr. JN) obu metod”, „obniżoną o około dwa razy” (błędne użycie przyimka „o”).

- 3.8 Str. 55, rys. 4.1: węzeł oznaczony jako „M” powinien być oznaczony jako „N”.
- 3.9 Str. 97: „Skuteczność działania algorytmów diagnostyki awarii tranzystorów została zweryfikowana w układzie regulacji prostownika PWM, zorientowanym względem napięcia sieci zasilającej (VOC)” – układ zorientowany względem napięcia?
- 3.10 Str. 124: „Czas potrzebny na zlokalizowanie uszkodzonego tranzystora jest wystarczający do podjęcia sterowania zapewniającego kompensację negatywnych skutków awarii przed wystąpieniem utyku napędu, w przypadku gdy prędkość silnika jest większa niż 300 obr/min” – dziwne sformułowanie (czas jest wystarczająco długi, czy wystarczająco krótki?)

4. Ocena rozprawy

Kandydat zaproponował oryginalne rozwiązania metod diagnostyki uszkodzeń tranzystorów przekształtników energoelektronicznych DC/AC i AC/DC pracujących w zamkniętym układzie sterowania prędkością obrotową silnika indukcyjnego oraz modulacji napięcia falownika o wybranej topologii umożliwiającej poprawną pracę po awarii tranzystora. Autor opracował modele symulacyjne bardzo złożonego systemu sterowania oraz implementację praktyczną opracowanych algorytmów diagnostyki i sterowania w układzie laboratoryjnym. W oparciu o opracowane modele i układ laboratoryjny Kandydat przygotował i zrealizował bardzo bogaty program badań symulacyjnych i laboratoryjnych weryfikujących poprawne działanie zaproponowanych rozwiązań.

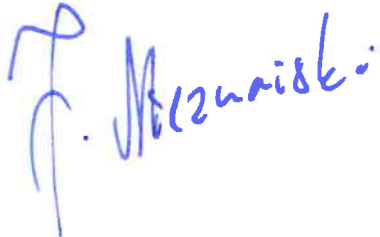
Niezależnie od przedstawionych wcześniej uwag krytycznych i dyskusyjnych, pracę Kandydata we wszystkich jej aspektach oceniam bardzo wysoko. Rozprawa wnosi istotny wkład do rozwoju wiedzy na temat diagnostyki układów energoelektronicznych i napędowych oraz sterowania tolerującego uszkodzenia. Na podkreślenie zasługuje też bardzo dobry poziom językowy rozprawy.

5. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie przez Autora istotnego i niebanalnego zagadnienia naukowego. Wykazuje Jego ogólną wiedzę w dyscyplinie

elektrotechnika, dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i posługiwania się podstawowymi metodami pracy badawczej.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że przedstawiona rozprawa spełnia wymagania określone przez obowiązującą ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych i stawiam wniosek o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

F. Młuczowski