

**Andrzej Radecki**  
Politechnika Łódzka, Łódź

## **FALOWNIK NAPIĘCIOWY OPARTY NA POTRÓJNYM MOSTKU H DO ZASILANIA SILNIKA TRÓJFAZOWEGO Z PRZERWANĄ FAZĄ**

### **THREE PHASE MOTOR WITH OPEN PHASE SUPPLIED FROM VOLTAGE INVERTER BASED ON TRIPLE H BRIDGE**

**Abstract:** In this paper, a voltage inverter based on three independent H-bridges to supply healthy and faulty motor was presented. Operating conditions of this type of inverter were presented for each open phase. For proposed control scheme that refers to independent control of each phase current, a robust properties of control system was shown. Based on computer simulations and laboratory tests, the effectiveness of squirrel cage induction motor control, supplied from three independent H-bridges was shown in case of dynamic phase opening.

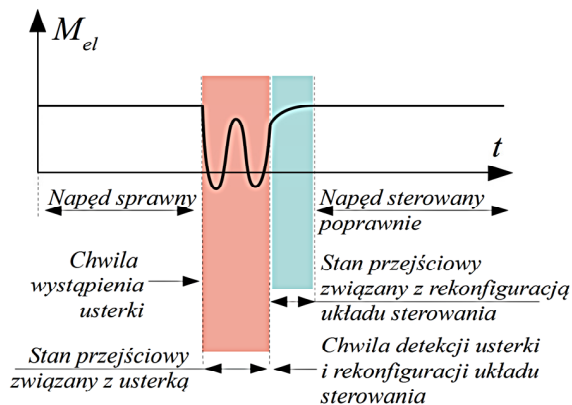
#### **1. Wstęp**

Współczesne silniki prądu przemiennego, sterowane metodami wektorowymi i zasilane z układów falownikowych, rozwijają zadany moment elektromagnetyczny z dużą dokładnością i w krótkim czasie, zapewniając przy tym wysoką efektywność energetyczną. Coraz częściej od napędów elektrycznych oczekuje się również wysokiego bezpieczeństwa, związanego z ich obsługą oraz realizowanym przez nie procesem technologicznym. W celu sprostania tym wymaganiom opracowywane są nowe konstrukcje układów zasilających silniki oraz metody sterowania, które umożliwiają kontrolę napędu nie tylko przy założeniu jego nominalnych warunków pracy, ale również w sytuacji określonego uszkodzenia wybranych jego elementów.

Zagadnienia diagnostyki i detekcji uszkodzeń silników (szczególnie silników indukcyjnych klatkowych), stanowią ważny problem naukowy i podejmowane są przez liczne ośrodki badawcze. Prowadzone badania dotyczą zarówno detekcji uszkodzeń mechanicznych [1], jak i elektrycznych, wśród których dominują algorytmy detekcji usterek klatki wirnika [2] oraz uzwojeń stojana [3,4]. Uszkodzenia uzwojeń stojana stanowią ok. 38% wszystkich uszkodzeń napędów indukcyjnych [5] i stanowią, obok uszkodzeń łożysk wirnika, największą grupę usterek. Uszkodzenia uzwojeń stojana związane są głównie ze zwarciami zwojowymi w cewkach i zwarciami do rdzenia stojana [6]. Napęd, w którym zdiagnozowane zostało uszkodzenie powinien zostać zatrzymany,

a uszkodzenie wyeliminowane. Nie jest jednak możliwe, w wielu sytuacjach, natychmiastowe zatrzymanie napędu po wykryciu usterki. Dotyczy to szczególnie tych układów napędowych, których niezaplanowane zatrzymanie, może doprowadzić do zagrożenia ich obsługi lub sterowanego przez nie procesu. Ważne jest w takiej sytuacji, aby można było doprowadzić realizowany proces do zadanego punktu umożliwiającego bezpieczne odstawienie napędu. Celowym jest zatem opracowywanie takich układów sterowania napędem elektrycznym, które w sytuacji uszkodzenia związanego z przerwą w fazie stojana silnika będą prawidłowo realizowały moment elektromagnetyczny, a w przypadku wystąpienia w niej zwarcia, odłączą uszkodzoną fazę i przeprowadzą proces regulacji z wykorzystaniem dwóch uzwojeń fazowych.

W celu podniesienia niezawodności oraz bezpieczeństwa pracy silników stosowane są układy sterowania tolerujące uszkodzenia [7,8]. Układy te wymagają rekonfiguracji struktury sterowania na podstawie zdiagnozowanej usterki i w stanach przejściowych związanych z detekcją uszkodzenia nie pozwalają na prawidłową pracę napędu (rys.1).



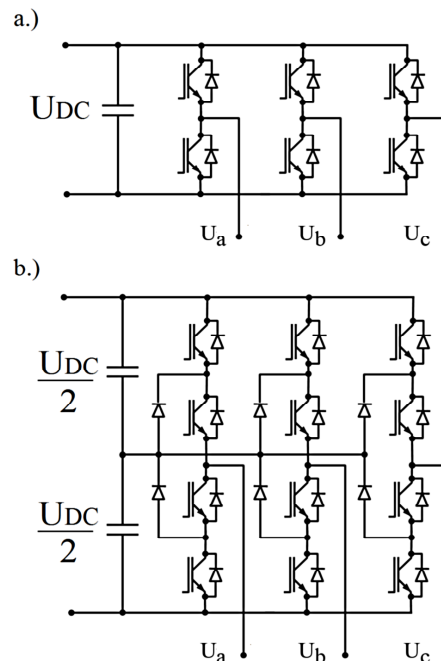
Rys. 1. Przebieg momentu elektromagnetycznego  $M_{el}$ , w układzie sterowania tolerującym uszkodzenia napędu elektrycznego, w chwili wystąpienia usterki.

Pożądanym jest, aby układ sterowania silnikiem trójfazowym umożliwiał kontrolę momentu elektromagnetycznego również w czasie, gdy usterka nie została jeszcze zdiagnozowana. W takiej sytuacji wymagany jest odporny układ regulacji momentu elektromagnetycznego, który wykorzystując do zasilania silnika odpowiedni falownik prawidłowo zrealizuje proces sterowania.

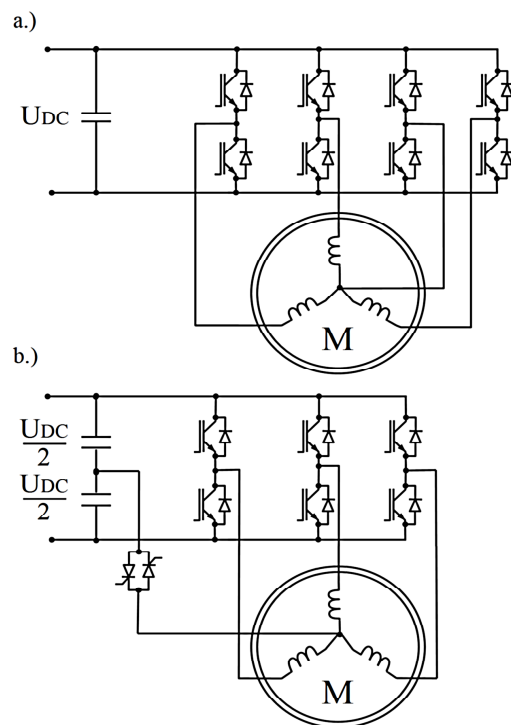
## 2. Struktury falowników napięciowych

Układy napędowe sterowane metodami wektorowymi, wykorzystują do zasilania silników głównie falowniki napięciowe. Typowa struktura takiego falownika zakłada możliwość realizacji sześciu wektorów napięcia stojana i jest oparta na trzech gałęziach półmostka H (rys.3a). W sytuacji podwyższonych wymagań dotyczących jakości realizowanego napięcia stojana stosowane są falowniki trójpoziomowe [9] (rys.3b) lub wielopoziomowe [10,11]. Umożliwiają one zmniejszenie zawartości wyższych harmonicznych w realizowanych przebiegach napięć i prądów. Falowniki te nie umożliwiają jednak prawidłowego sterowania silnikiem w sytuacji wystąpienia uszkodzenia uzwojeń stojana.

Do sterowania układami napędowymi w stanach awaryjnych stosowane są zmodyfikowane struktury typowych falowników napięciowych. Najprostsza modyfikacja falownika napięciowego 6T związana jest z dołączeniem dodatkowej gałęzi półmostka (rys.3a) lub gałęzi umożliwiającej podłączenie do punktu neutralnego połowy wartości napięcia obwodu pośredniczącego (rys.3b).



Rys. 2. Typowe falowniki napięciowe przeznaczone do sterowania silników trójfazowych a.) dwupoziomowy, b.) trójpoziomowy



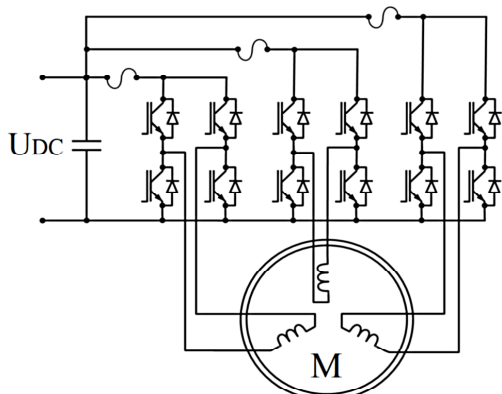
Rys. 3. Falowniki napięciowe przeznaczone do sterowania częściowo uszkodzonymi silnikami trójfazowymi a.) falownik dodatkową gałęzią półmostka H, b.) falownik z awaryjnym załączeniem napięcia do punktu neutralnego

W nominalnych warunkach pracy układu napędowego dodatkowa struktura falownika jest zwykle nieaktywna, a jej wykorzystanie od-

bywa się w stanie zdiagnozowanej usterki falownika lub silnika. Wykorzystanie właściwości takich falowników do sterowania częściowo uszkodzonym silnikiem wymaga rekonfiguracji ich struktury sterowania [12,13,14]. W przypadku sterowania silnikiem z jedną rozwartą fazą, falowniki te umożliwiają realizację zredukowanej liczby wektorów napięcia stojana, zapewniając jednak zdolność sterowania wektorem napięcia stojana o dowolnej wartości argumentu.

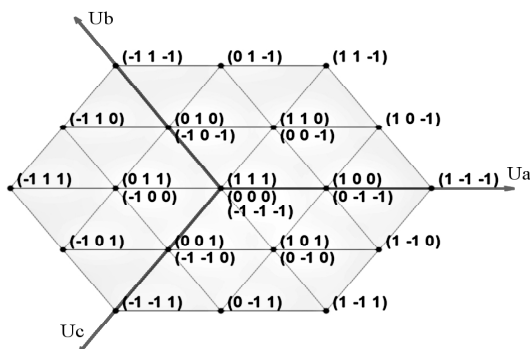
### 3. Falownik napięciowy oparty na potrójnym mostku H

Jedną z możliwych konstrukcji falownika napięciowego jest struktura oparta na wykorzystaniu trzech mostków H (falownik 3H) do niezależnego zasilania każdej z trzech faz silnika [15,16] (rys.4).



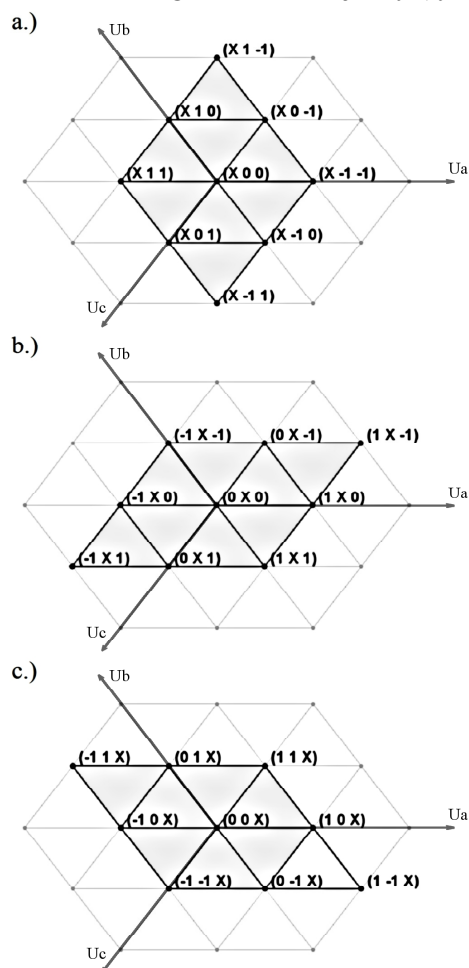
Rys. 4. Falownik napięciowy oparty na potrójnym mostku H

Falownik taki charakteryzuje się taką samą liczbą wektorów napięcia stojana jak falownik trójpoziomowy (rys.5), przy wykorzystaniu do jego konstrukcji tej samej liczby kluczy energoelektronicznych.



Rys.5. Siatka wektorów napięć możliwych do uzyskania, w falowniku napięciowym opartym na potrójnym mostku H, poprzez niezależne sterowanie napięciami fazowymi ( $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$ )

Podobnie jak falowniki przedstawione na rysunku 3, falownik napięciowy 3H umożliwia sterowanie silnikiem z jedną fazą rozwartą. Wynika to z faktu, iż składowe wektora napięcia stojana lub wektora prądu stojana tworzące niezerowy iloczyn wektorowy mogą zostać wykorzystane do opisu wektora położonego w dowolnym punkcie przestrzeni rozpiętej na tych składowych. Falownik taki umożliwia zatem prawidłowe sterowanie nie tylko w pełni sprawnym silnikiem trójfazowym, ale również takim, w którym na skutek awarii uszkodzeniu uległy klucze energoelektroniczne jednego z mostków lub przerwaniu uległa jedna z faz silnika. W sytuacji takiego uszkodzenia liczba wektorów napięć stojana podlega redukcji do podzbioru zależnego od utraconej fazy (rys.6).



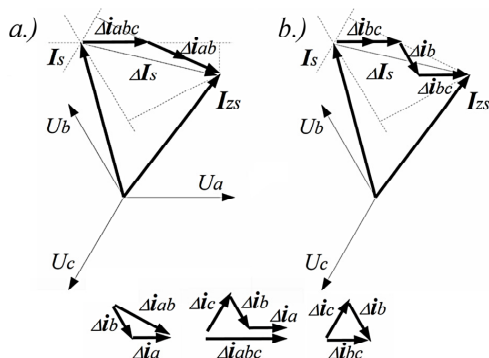
Rys.6. Siatka wektorów napięć możliwych do uzyskania, w falowniku napięciowym opartym na potrójnym mostku H, w sytuacji utraty możliwości sterowania a.) fazą a, b.) fazą b, c.) fazą c.

Istotną korzyść, wynikającą z wykorzystania falownika opartego na potrójnym mostku H,

związana jest z możliwością prawidłowej realizacji wektora prądu stojana zarówno w sytuacji silnika sprawnego, jak i z uszkodzoną fazą, bez konieczności rekonfiguracji struktury sterowania.

#### 4. Sterowanie falownikiem napięciowym opartym na potrójnym mostku H

W falowniku opartym na potrójnym mostku H istnieje możliwość realizacji układu regulacji wektora prądu stojana  $I_s$ , odpornego na asymetrię uzwojeń stojana oraz przerwę w jednej z jego faz. Bazując na układzie sterowania wektora prądu stojana opartym na kompensacji wektora uchybu prądu stojana  $\Delta I_s$  poprzez uchyby prądów fazowych [9,14], można wykorzystać falownik 3H do niezależnej kompensacji uchybów prądów fazowych w każdej ze sprawnych faz. Umożliwi to realizację wektora prądu w każdej sytuacji, w której tylko osiągalne składowe fazowe będą w stanie go opisać. Zakładając dla uproszczenia, że na wymuszenie napięciowe w trakcie jednego okresu sterowania każda faza odpowiada pewnym przyrostem prądu  $\Delta i$ , to wówczas proces sterowania można odwzorować w postaci trajektorii wektora prądu stojana, którego przykładowa (dla czytelności uproszczona) krzywa została przedstawiona na rysunku 7.

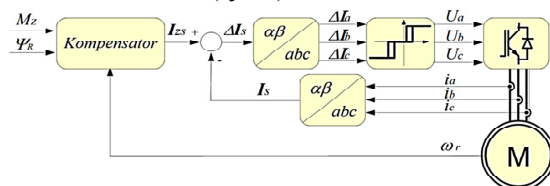


Rys. 7. Uproszczona trajektoria wektora prądu stojana, realizowana dla a.) trzech sprawnych faz, b.) przerwanej fazy a

Sterowanie takie umożliwia zatem prawidłową realizację wektora prądu stojana zarówno z wykorzystaniem dwóch, jak i trzech faz (przy założeniu zapasu napięcia fazowego, niezbędnego do realizacji prądów fazowych), bez konieczności rekonfiguracji struktury sterowania, co w dalszej konsekwencji eliminuje niekorzystny efekt występujący w układach sterowania tolerujących uszkodzenia, a związany z utratą kontroli nad momentem elektromagne-

tycznym w czasie niezdiagnozowanego uszkodzenia silnika.

Podstawą do realizacji układu sterowania silnikiem trójfazowym, odpornego na przerwanie fazy silnika, powinna być wobec powyższego metoda regulacji zorientowana prądowo, w której realizacja zadanego wektora prądu stojana  $I_{zs}$  będzie gwarantowała prawidłowe sterowanie momentem elektromagnetycznym. Jedną z takich metod opracowanych dla silników indukcyjnych klatkowych jest wektorowa metoda pośredniego sterowania momentem elektromagnetycznym i strumieniem skojarzonym wirnika [17,18] o wartościach zadanych odpowiednio  $M_z$  i  $\Psi_R$  (rys.8).

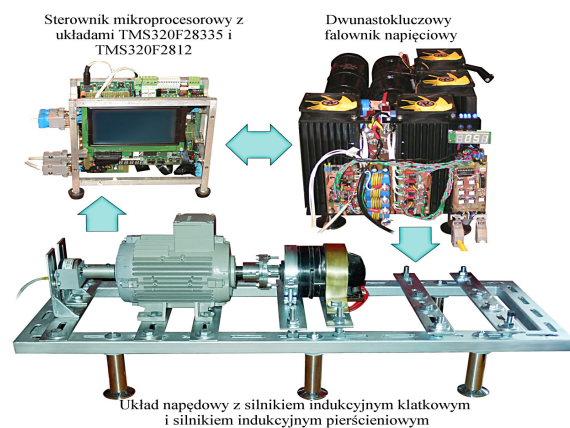


Rys. 8. Układ sterowania momentem elektromagnetycznym silnika indukcyjnego klatkowego bazujący na metodzie pośredniej zorientowanej prądowo

Niezależne wyjścia napięciowe ( $U_a$ ,  $U_b$ ,  $U_c$ ) trójpołożeniowych regulatorów prądów fazowych, przyjmują poziomy napięć bezpośrednio realizowalne w każdym z mostków H.

#### 5. Wyniki badań symulacyjnych i laboratoryjnych

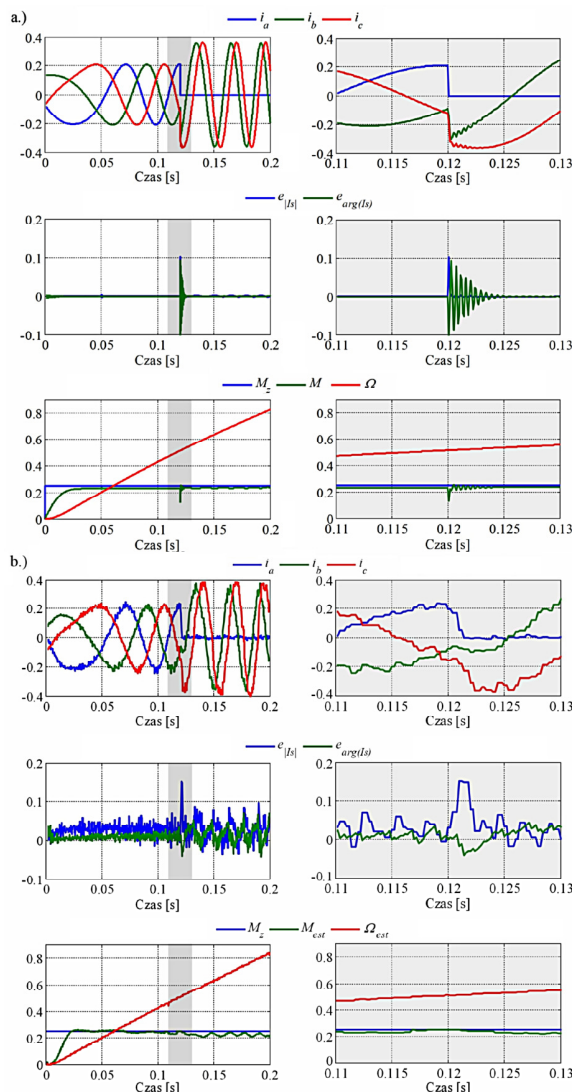
W celu weryfikacji struktury sterowania wykorzystującej falownik 3H do regulacji wektora prądu stojana silnika sprawnego i z przerwana faza, zostały przeprowadzone badania symulacyjne w środowisku Matlab-Simulink 2009 oraz na stanowisku laboratoryjnym z silnikiem indukcyjnym klatkowym o mocy 2.2kW (rys.9).



Rys. 9. Stanowisko laboratoryjne wykorzystane do badań eksperymentalnych



W trakcie procesu sterowania napędem sprawnym została, w chwili czasowej  $t=0,12s$ , rozwarła faza a (rys.10).



Rys.10. Przebiegi regulacji momentu elektromagnetycznego uzyskane a.) w procesie symulacji komputerowych, b.) na stanowisku laboratoryjnym, gdzie:

$i_a, i_b, i_c$  - zmierzone prądy fazowe,

$e_{|Is|}$  - uchyb regulacji modułu wektora prądu stojana,

$e_{arg\{Is\}}$  - uchyb regulacji kąta wektora prądu stojana,

$M_z, M, M_{est}$  - Moment elektromagnetyczny silnika: zadany, wytworzony i estymowany,

$\Omega$  i  $\Omega_{est}$  - prędkość kątowna wirnika zmierzona i estymowana

W wyniku zastosowanego falownika 3H i opisywanego w artykule układu sterowania, wygenerowane uszkodzenie w chwili czasowej  $t=0,12s$  powoduje jedynie krótkotrwałe zabu-

wienie procesu regulacji składowych wektora prądu stojana, co przekłada się na chwilowe zaburzenie momentu elektromagnetycznego. Nie jest przy tym potrzebna detekcja uszkodzenia, ponieważ odporny układ regulacji w chwili wystąpienia zakłócenia wektora prądu, bezzwłocznie dokonuje kompensacji prądu fazy przerwanej prądami faz pozostałych.

Podstawowym problemem związanym ze sterowaniem wektorem prądu stojana w silniku uszkodzonym może okazać się niedostateczna wartość napięcia obwodu pośredniczącego niezbędna do realizacji prądów fazowych, których zwiększona amplituda kompensuje rozwartą fazę. W takiej sytuacji może okazać się konieczne zastosowanie odwzbudzenia silnika indukcyjnego klatkowego z wykorzystaniem metody opartej na analizie odfiltrowanego napięcia sterującego [19].

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono sposób wykorzystania falownika napięciowego opartego na potrójnym mostku H do sterowania silnikiem trójfazowym z przerwą fazą. Wykorzystany algorytm odpornego sterowania wektorem prądu stojana bazujący na niezależnej regulacji prądów fazowych silnika umożliwia uzyskanie, w przypadku przerwania jednej fazy, bezzwłoczną reakcję układu regulacji, niemożliwą do uzyskania w typowych układach sterowania tolerujących uszkodzenia. W artykule zostały przedstawione możliwości realizacji wektorów napięcia stojana w falowniku napięciowym opartym na trzech niezależnych mostkach H, które odpowiadają możliwością trójpoziomych falowników napięciowych, a w stanach awarii zapewniają realizację ośmiu wektorów napięcia.

## 7. Literatura

- [1]. Ewert P., Kowalski C.T.: *Neuronowy detektor uszkodzeń łożysk tocznych*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 92, 2011, s. 205-210.
- [2]. Kozik J.: *Zastosowanie sieci neuronowych w detekcji uszkodzeń silnika synchronicznego ze zwartym uzwojeniem wirnika*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 80, 2008, s. 69-72.
- [3]. Kowalski C.T., Wierzbicki R.: *Zastosowanie rozszerzonego obserwatora stanu i parametrów do wykrywania uszkodzeń uzwojenia wirnika oraz stojana silnika indukcyjnego*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 84, 2009, s. 65-69.
- [4]. Pietrowski W.: *Zastosowanie radialnej sieci neuronowej w diagnostyce uszkodzeń uzwojenia*

stojana maszyny indukcyjnej klatkowej. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 88, 2010, s. 93-96.

[5]. Khalaf S.G., Haider M.: *Diagnosis and Fault Tolerant Control of the Induction Motors Techniques a Review*, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2010, s. 227–246.

[6]. Drak B.: *Typowe uszkodzenia silników indukcyjnych dużej mocy*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 89, 2011, s. 7-14.

[7]. Campos-Delgado D.U., Espinoza-Trejo D.R., Palacios E.: *Fault-tolerant control in variable speed drives: a survey*. IET Electric Power Applications nr 2, 2008, s. 121-134.

[8]. Khalaf S.G., Haider M.: *Diagnosis and Fault Tolerant Control of the Induction Motors Techniques a Review*, Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2010, s. 227-246.

[9]. Pawlaczek L.: *Sterowanie prądem wyjściowym trójfazowego falownika napięcia*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych nr 62, 2008, s. 387-395.

[10]. Płachtyna O., Śarnowski R.: *Wielopozomowy falownik w zastosowaniu do silnika indukcyjnego lub autonomicznej prądnicy indukcyjnej albo synchronicznej*, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 86, 2010, s.1-4.

[11]. Khoucha, F., Lagoun, S.M., Marouani, K., Kheloui, A., El Hachemi Benbouzid, M. L.: *Hybrid Cascaded H-Bridge Multilevel-Inverter Induction-Motor-Drive Direct Torque Control for Automotive Applications*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume 57, Issue 3, 2010, s. 892-899.

[12]. Hoang, K. D., Zhu, Z. Q., Foster, M. P., Stone, D. A.: *Comparative study of current vector control performance of alternate fault tolerant inverter topologies for three-phase PM brushless ac machine with one phase open - circuit fault*, 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2010, s. 1-6.

[13]. 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 Transactions on power electronics, Nr 4, 2004, s.1108-1116.

[14]. Hai Lin, Hong Li, Yintao Wang, Mingfeng Li, Peng Wen, Chunhui Zhang: *On inverter fault-tolerant operation vector control of a PMSM drive*, IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems, 2009, s.522-526.

[15]. Ertugrul N., Soong W., Dostal G., Saxon D.: *Fault tolerant motor drive system with redundancy for critical applications*. IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, Volume 3, 2002, s.1457-1462.

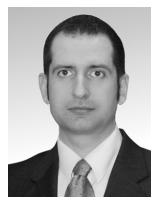
[16]. Corzine K.A., Sudhoff S.D., Whitcomb C.A.: *Performance characteristics of a cascaded two-level converter*, IEEE Transactions on Energy Conversion, Volume 14, Issue 3, 1999, s. 433-439.

[17]. Dębowski A.: *Pośrednie sterowanie w napędzie elektrycznym przy wykorzystaniu stymulatora stanu*. Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej nr 552, 1991, Rozprawy Naukowe z.111.

[18]. Chudzik P., Radecki A.: *Korekta syntezy kąta wektora prądu w układach sterowania napędami indukcyjnymi*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 84, 2011, s. 17-21.

[19]. Radecki A., Chudzik P.: *Badania porównawcze wybranych metod odzwbudzania silnika indukcyjnego zasilanego z sieci o dużych, chwilowych spadkach napięć*. Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 90, 2011, s. 23-28.

#### Autor



dr inż. Andrzej Radecki  
Politechnika Łódzka  
Instytut Automatyki  
ul. Stefanowskiego 18/22  
90-924 Łódź  
andrzej.radecki@p.lodz.pl

#### Informacje dodatkowe

Praca naukowa oraz badania współfinansowane ze środków z działalności statutowej Instytutu Automatyki Politechniki Łódzkiej oraz w ramach projektu „Innowacyjna dydaktyka bez ograniczeń - zintegrowany rozwój Politechniki Łódzkiej - zarządzanie uczelnią, nowoczesna oferta edukacyjna i wzmacnianie zdolności do zatrudniania, także osób niepełnosprawnych” współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.