

doi:10.15199/48.2019.06.17

Zastosowanie zmodyfikowanych estymatorów strumienia wirnika do kompensacji skutków zwarc zwojowych stojana silnika indukcyjnego

Streszczenie. W artykule przedstawiono szczegółową analizę wpływu uszkodzenia uzwojenia stojana silnika indukcyjnego na jakość estymacji strumienia skojarzonego wirnika w układzie sterowania wektorowego. Analizie poddano dwa układy, powszechnie znane jako symulatory zmiennych stanu, stosowane są często w przemysłowych układach napędowych. Badania przeprowadzono w układzie sterowania połowo zorientowanego (ang. DFOC – Direct Field Oriented Control). Uzyskane wyniki wykazały, że zwarcia zwojowe mogą prowadzić do niestabilnej pracy układu regulacji automatycznej. W celu zapewnienia odpowiedniej jakości estymacji - i w konsekwencji regulacji - nawet po wystąpieniu zwarc zwojowych zaproponowano zastosowanie zmodyfikowanych estymatorów strumienia wirnika. W pracy zaprezentowano szczegółową analizę teoretyczną oraz wyniki symulacji, które przeprowadzono w środowisku MATLAB/Simulink.

Abstract. The paper presents a detailed analysis of the impact of stator winding faults on the properties of the rotor flux estimation in the vector controlled induction motor drives. In the paper the two well-known simulators, often used in the industrial drives, were analyzed. The tests were carried out in a Direct Field Oriented Control (FOC) system. It was shown, that during inter-turn short circuits, the vector controlled system can be even unstable. To guarantee the stability during stator faults, a compensation method, based on the modified rotor flux estimators, was proposed. The article presents a detailed theoretical analysis as well as the results of simulations carried out in the MATLAB/Simulink environment. (**Compensation of the stator interturn short circuits using modified rotor flux estimators**).

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny, uszkodzenia stojana, detektor uszkodzenia stojana, estymator strumienia, DFOC, FTC.

Keywords: induction motor, stator faults, stator fault detector, flux estimator, DFOC, FTC.

Wstęp

Silniki indukcyjne (SI) są jednymi z najpopularniejszych maszyn elektrycznych stosowanych się w układach napędowych. Maszyny te charakteryzują się relatywnie niskim kosztem zakupu oraz dużą niezawodnością. Do regulacji SI można zastosować różnego rodzaju metody, które generalnie można podzielić na metody skalarne i wektorowe [1], [2]. Druga grupa metod charakteryzuje się możliwością bardzo dokładnej regulacji momentu i/lub prędkości maszyny, dlatego jest coraz częściej stosowana w praktycznych rozwiązaniach. Układy te należy uzupełnić o estymatory zmiennych stanu – estymatory strumienia wirnika lub stojana [3], [4]. Jednymi z takich układów są tak zwane symulatory zmiennych stanu – modele opisujące w sposób bezpośredni model matematyczny silnika indukcyjnego, które charakteryzują się nieskomplikowaną strukturą [3], [4].

Pomimo wielu zalet, SI nie są całkowicie niezawodne. W trakcie pracy maszyny może dojść do uszkodzenia jej elementów [5], [6], [7], [8]. W ogólnym przypadku można wyróżnić uszkodzenia mechaniczne oraz elektryczne. Najczęściej występującymi uszkodzeniami elektrycznymi są te związane z uzwojeniem stojana [8]. Uszkodzenie to związane jest z degradacją izolacji, które następnie objawia się zwarciami.

Uszkodzenia uzwojenia stojana mają negatywny wpływ na pracę maszyny elektrycznej [5], [6]. Są to uszkodzenia, które, w porównaniu do uszkodzeń uzwojenia wirnika postępują stosunkowo szybko i w skrajnym wypadku mogą doprowadzić do całkowitego uszkodzenia silnika lub nawet całego napędu elektrycznego [5], [6]. Jednakże są to uszkodzenia możliwe do wykrycia, a prędkość ich rozprzestrzeniania zależna jest między innymi od typu maszyny [5]. Pierwszym stadium tego typu uszkodzenia są zwarcia między zwojowe, dlatego większość badań skupia się właśnie na ich diagnostyce [6], [8].

Niestety każda zmiana (uszkodzenie) w uzwojeniu stojana pociąga za sobą zmiany w parametrach SI [9], [10], [11]. W przypadku, gdy silnik elektryczny jest sterowany w zamkniętych układach regulacji, zmiany te mogą doprowadzić nawet do niestabilnej pracy [12].

Analizując stan literatury można zobaczyć, że tematyka detekcji uszkodzeń stojana w układach sterowania wektorowego jest bardzo aktualna i ciągle rozwijana.

Diagnostyka stojana silnika indukcyjnego pracującego w zamkniętych układach regulacji momentu i/lub prędkości była analizowana w kilku pracach. Rozpatrywano w nich struktury sterowania FOC [13], [14], [15], [16] oraz układy bezpośredniej regulacji momentu elektromagnetycznego z tablicą przełączeń (DTC-ST) [17], [18] i układy bezpośredniej regulacji momentu elektromagnetycznego z modulacją wektorową (DTC-SVM) [15].

W większości prac sprawdzano możliwość wykorzystania sygnałów z wewnętrznych sprzężeń zwrotnych oraz sygnałów prędkości i prądów stojana do diagnostyki i wczesnego wykrycia uszkodzenia. Celem tych badań było wychwycenie momentu, w którym napęd należy wyłączyć i/lub poinformować obsługę o zaistniałej awarii [6], [16].

Można jednak zauważyć, że nie wszystkie problemy badawcze zostały wzięte pod uwagę i rozwiązane.

Dla układów sterowania DFOC (Direct Field Oriented Control), który badany był między innymi w pracy [16], nie przedstawiono dokładnej analizy wpływu uszkodzenia stojana SI na dokładność estymacji zmiennych stanu, które są niezbędne do prawidłowego działania tej struktury (nie przedstawiano rzeczywistych wartości strumienia wirnika). Dodatkowo zakładano pracę przy stosunkowo niewielkim uszkodzeniu stojana. Założenie takie nie jest to do końca słuszne. Z punktu widzenia obecnie rozwijanych układów FTC (Fault Tolerant Control), które zakładają konieczność stabilnej pracy napędu nawet przy stosunkowo dużych uszkodzeniach maszyn [6], energoelektroniki [19] lub czujników pomiarowych [21], [20]. Głównym zadaniem tych systemów, znanych również jako układy napędowe o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa jest zapewnienie działania napędu po wystąpieniu uszkodzenia. Zakłada się, że napęd po wykryciu powinien zostać zatrzymany w bezpieczny sposób, lub jeżeli jest to możliwe kontynuować pracę do zakończenia pełnego cyklu pracy. Niedopuszczalne jest, aby napędy tego typu pozwalały na dłuższą pracę po wykryciu uszkodzenia. Napęd bezpieczny

musi gwarantować redundancję lub bezpieczeństwo pracy, które po wykryciu pierwszej awarii jest już zakłócone. Do realizacji tego zadania można stosować podejście bazujące na redundancji sprzętowej lub analitycznej [22], [23], [24].

Do tej pory dla układów napędowych z SI zaproponowano kilka rozwiązań. Pierwsze z nich bazują na redundancji sprzętowej. W pracy [25] zaprezentowano układ z dwoma silnikami sprzęgniętymi równolegle lub szeregowo. Docelowo pracuje jeden z nich, jednak w przypadku jego usterki uruchamiany jest drugi dzięki czemu możliwe jest zachowanie ciągłości pracy układu napędowego. Kolejnym rozwiązaniem mogą być silniki wielofazowe [26]. Podejście wykorzystujące redundancję sprzętową ma jednak wady: większe koszty, napęd zajmuje dużo miejsca, układ jest skomplikowany [22], [24].

Alternatywą jest stosowanie systemów bezpiecznych opartych na redundancji analitycznej, które przede wszystkim pozwalają na redukcję miejsca zajmowanego przez układ a także mogą być tańsze w realizacji [23], [24].

Ogólnie w przypadku układów odpornych na wewnętrzne uszkodzenia silnika elektrycznego za kamień milowy można uznać publikację [27], w której zaproponowano zastosowanie struktury Feedback Linear Control (FLC) z dodatkowym wbudowanym członem opartym na wewnętrznym modelu uszkodzeń do kompensacji skutków uszkodzenia prętów klatki wirnika.

Na bazie tej pracy opracowano kilka układów pozwalających na kompensację skutków uszkodzeń uzwojenia stojana. Można wyróżnić rozwiązania bazujące na metodzie Backstepping Control [28] współpracujące z rozszerzonym filtrem Kalmana (EKF – Extended Kalman Filter) [29] lub obserwatorem ślizgowym (SMO – Sliding Mode Observer) [30] w celu estymacji sygnałów związanych z uszkodzeniem. Kolejną techniką prezentowaną w literaturze jest zastosowanie sterowania odpornego – sterowania ślizgowego (SMC – Sliding Mode Control) [31], [32], również z dodatkowymi układami estymacji - EKF [33]. Są to jednak techniki nieliniowe, które wymagają skomplikowanych procedur projektowania i są silnie zorientowane na daną aplikację.

W układach sterowania ze standardowymi regulatorami (PI lub histerezowymi) również podejmowano próby kompensacji skutków zwarc zwojowych. W pracy [34] zastosowano obserwator z rozszerzonym wektorem stanu [35] w strukturze sterowania wektorowego IFOC (Indirect Field Oriented Control), który pozwalał na zachowanie odprężania torów sterowania, w przypadku zwarc zwojowych. Natomiast w pracy [36] zaproponowano zastosowanie estymatora rezystancji stojana bazującego na sztucznych sieciach neuronowych do kompensacji skutków tego uszkodzenia w DTC-ST.

Innymi ciekawymi technikami, które mogą zostać zastosowane w późniejszym etapie kompensacji są przełączalne struktury sterowania, zaproponowane początkowo w kontekście uszkodzeń czujników [37], a następnie do uszkodzeń silnika (zwarc zwojowych) [38]. Warto wspomnieć, że istnieje możliwość redukcji prądu w obwodzie zwarcowym [39], [40], dzięki czemu silnik może pracować przez dłuższy czas trwania kompensacji zwarc zwojowych, aż do przekroczenia wartości dopuszczalnej prądu lub bezpiecznego zatrzymania.

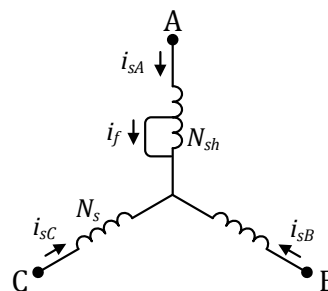
Analizując dotychczasowe osiągnięcia można zauważyć, że układy napędowe odporne na wewnętrzne uszkodzenia silnika znajdują się w kręgu zainteresowań wielu zespołów badawczych. Tematyka związana z bezpieczeństwem jest ważnym kierunkiem w dalszym rozwoju napędów elektrycznych, szczególnie jeżeli uwzględni się coraz większe zainteresowanie pojazdami z napędem hybrydowym lub elektrycznym.

Niniejsza praca ma na celu wypełnienie luki, którą można zaobserwować w literaturze, poprzez przedstawienie szczegółowej analizy wpływu uszkodzenia zwojenia stojana SI na jakość estymacji strumienia wirnika przy wykorzystaniu prostych symulatorów zmiennych stanu.

W związku z tym, że nie analizowano wcześniej wpływu zwarcia zwojowego SI na jakość estymacji strumienia wirnika lub stojana z zastosowaniem symulatora prądowego w strukturze sterowania wektorowego DFOC, w niniejszej pracy podjęta zostanie próba przedstawienia i opisanie zjawisk powstających w takim układzie. Wykazane zostanie, że model prądowy podobnie jak model napięciowy jest wrażliwy na zwarcie stojana. Ponadto, zgodnie z obecnie rozwijanymi układami FTC w artykule zaproponowano nowe zmodyfikowane estymatory zmiennych stanu, które umożliwią dokładną estymację strumienia wirnika podczas zwarcia uzwojenia, co pozwala na zachowanie odpowiedniej jakości regulacji. Jednocześnie możliwe jest wykrycie uszkodzenia stojana.

Model matematyczny silnika indukcyjnego z uszkodzonym uzwojeniem stojana

Analizę teoretyczną oraz badania symulacyjne przeprowadzono w oparciu o model matematyczny SI, który umożliwi modelowanie zwarc zwojowych w każdej z faz uzwojenia stojana [41]. Na rysunku 1 przedstawiono schemat poglądowy uzwojeń stojana SI, na którym zaznaczono obwód zwarcowy w fazie A.



Rys.1. Schemat uzwojeń silnika indukcyjnego z obwodem zwarcowym w fazie A

W modelu przyjęto, że N_{sh} oznacza liczbę zwartych zwojów, natomiast N_s całkowitą liczbę zwojów w fazie. Stosunek liczby zwartych zwojów do ich całkowitej liczby wyraża się jako:

$$(1) \quad \eta_f = \frac{N_{sh}}{N_s}$$

W omawianym modelu zastosowany został dodatkowy składnik w postaci wektora $\mathbf{\mu}_{\alpha\beta}$, którego składowe w osiach α - β pozwalają na określenie fazy, w której wystąpiło zwarcie. Natomiast moduł określa względną liczbę zwartych zwojów. Równania wspomnianego wektora dla każdej fazy silnika można wyrazić następująco:

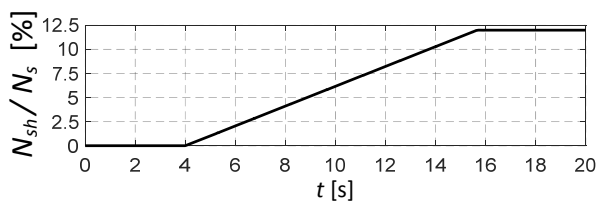
$$(2) \quad \mathbf{\mu}_{\alpha\beta|A} = \eta_{fA} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}^T$$

$$(3) \quad \mathbf{\mu}_{\alpha\beta|B} = \eta_{fB} \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^T$$

$$(4) \quad \mathbf{\mu}_{\alpha\beta|C} = \eta_{fC} \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}^T$$

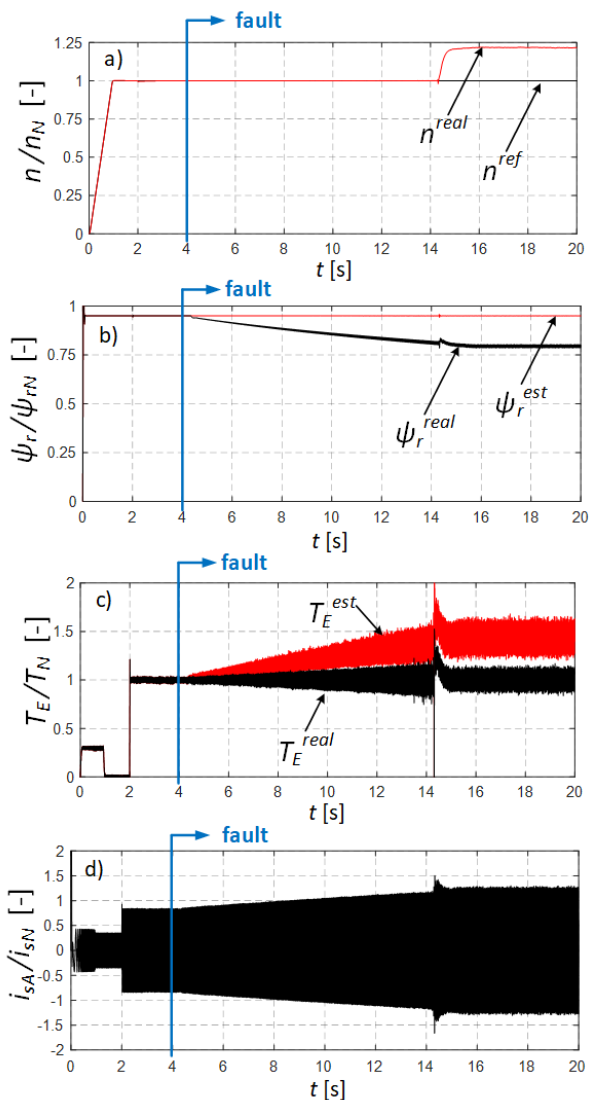
gdzie: $\eta_{fA}, \eta_{fB}, \eta_{fC}$ – względna liczba zwartych zwojów odpowiednio dla każdej fazy silnika.

możliwości pracy podczas tego typu uszkodzenia. Charakterystykę zmian uszkodzenia przedstawiono na rysunku 3.



Rys.3. Zmiana liczby zwartych zwojów podczas badań

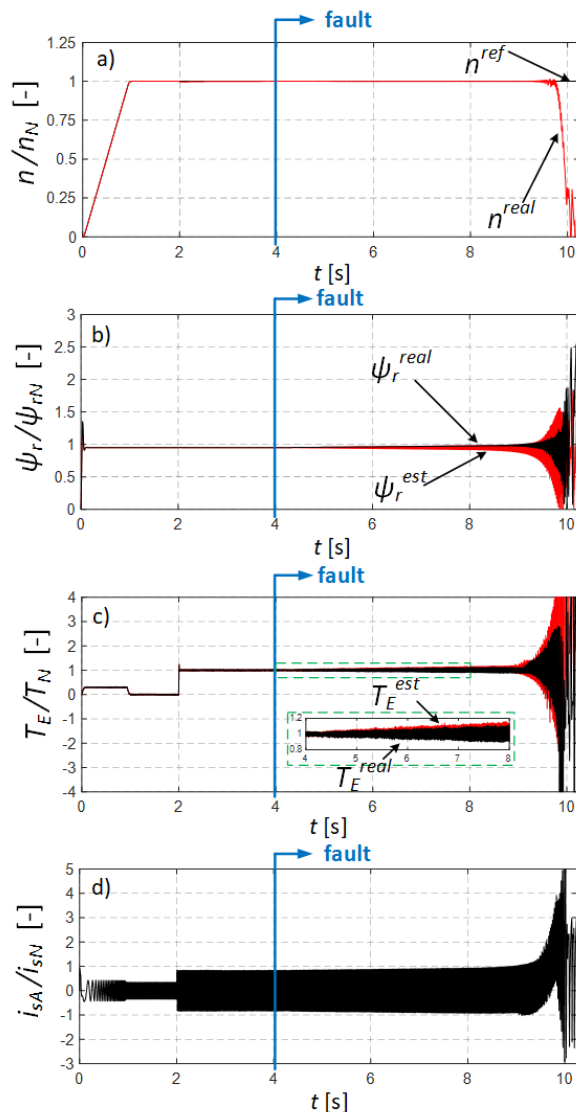
Przedstawiono przebiegi prędkości, strumienia skojarzonego wirnika, momentu a także prądów fazowych. Wyniki przedstawiono oddzielnie dla symulatora prądowego (rysunek 4) i napięciowego (rysunek 5).



Rys.4. Przebiegi prędkości obrotowej (a), modułu strumienia wirnika (b), momentu elektromagnetycznego (c) oraz prądu fazy A (d) podczas zwarcia zwojowego dla symulatora prądowego w strukturze sterowania

Analizując wyniki przedstawione na rysunku 4 można zauważyć, że zwarcie zwojowe powoduje błąd estymacji strumienia wirnika. Nie jest to oczywiste, ponieważ symulator prądowy nie jest bezpośrednio zależny od parametrów stojana. Uszkodzenie to jest praktycznie niewidoczne przez układ sterowania (jest kompensowane), widoczny jest tylko wzrost prądu stojana. Jednakże dla

około 10% zwartych zwojów układ traci możliwość kontroli prędkości kątovej.



Rys.5. Przebiegi prędkości obrotowej (a), modułu strumienia wirnika (b), momentu elektromagnetycznego (c) oraz prądu fazy A (d) podczas zwarcia zwojowego dla symulatora napięciowego w strukturze sterowania

Podobne badania przeprowadzono dla modelu napięciowego. W tym przypadku układ działa niestabilnie już przy około 6% zwartych zwojów. Wynika to z bezpośredniej zależności i wrażliwości modelu napięciowego na zmiany lub błędną identyfikację rezystancji stojana. Wyraźnie widoczne jest, że efekty uszkodzenia są groźniejsze w napędzie wektorowym z estymatorem napięciowym. Można zauważyć, że uszkodzenie uzwojenia stojana ma wpływ na dokładność estymacji strumienia wirnika zarówno dla modelu prądowego jak i napięciowego. Ważną cechą tego jest to, że są to efekty nie widoczne przez zamknięty układ sterowania, który jest w stanie je kompensować, lecz tylko do pewnego stopnia. Kompensacja ta jest jednak niezamierzona i prowadzi do jeszcze szybszego uszkodzenia silnika poprzez forsowanie sygnałów zadanych o niewłaściwej amplitudzie i częstotliwości.

Kompensacja skutków uszkodzeń stojana z zastosowaniem zmodyfikowanych estymatorów

Jak wspomniano wcześniej, błąd estymacji zmiennych stanu jest niewidoczny dla układu sterowania co niesie za

sobą negatywne skutki. Wynika to z faktu, że modele estymatorów (13 – 15) oparte są na modelu silnika pracującego bez uszkodzeń.

Zgodnie z równaniami (1-11) podczas zwarcia w modelu pojawiają się dodatkowe współczynniki zależne od prądu zwarcioowego i_f oraz wektora $\mu_{\alpha\beta}$. Klasyczne estymatory oraz układy sterowania nie uwzględniają tych komponentów.

Metodą pozwalającą na dokładną estymację strumienia wirnika, także podczas zwarcia, może być zastosowanie zmodyfikowanych estymatorów zmiennych stanu, które bazują na modelu matematyczny silnika indukcyjnego z uszkodzeniem (1-11) zamiast na modelu silnika nieuszkodzonego.

Zmodyfikowany symulator napięciowy bazuje na równaniu (7) oraz równaniach strumieniowo-prądowych (9-10):

$$(16) \quad \Psi_s^{vm} = \int (\mathbf{u}_s - R_s (\mathbf{i}_s - \frac{2}{3} \mu_{\alpha\beta} i_f)) dt$$

$$(17) \quad \Psi_r^{vm} = \frac{L_r}{L_m} \Psi_s^{vm} - \frac{w}{L_m} (\mathbf{i}_s - \frac{2}{3} \mu_{\alpha\beta} i_f)$$

Natomiast zmodyfikowany model prądowy:

$$(18) \quad \Psi_r^{im} = \int (\frac{R_r}{L_r} (L_m (\mathbf{i}_s - \frac{2}{3} \mu_{\alpha\beta} i_f) - \Psi_r^{im}) + j p_b \omega_m \Psi_r^{im}) dt$$

Można zauważyć, że w każdym z równań pojawia się dodatkowy czynnik: $2/3 \mu_{\alpha\beta} i_f$, który w niniejszej pracy został określony jako współczynnik uszkodzenia. Gdy silnik pracuje bez zwarcia równania te przyjmują standardową postać (13-15). Tak określone symulatory pozwalają na dokładną estymację strumienia wirnika w stanach awaryjnych i podczas normalnej pracy.

Do odtwarzania współczynnika uszkodzenia można zastosować metodę przedstawioną w [41], która bazuje na zastosowaniu obserwatora prądu stojana. Obserwator ten oparty jest na standardowym modelu matematycznym silnika indukcyjnego, pracującym bez uszkodzenia [3]:

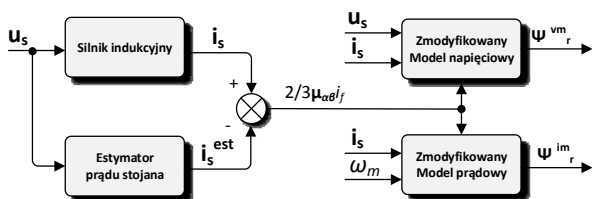
$$(19) \quad \mathbf{i}_s^{est} = \frac{L_r}{w} \Psi_s - \frac{L_m}{w} \Psi_r$$

W układzie tym zastosowane mogą być estymatory strumienia stojana (13) i wirnika (15) – oparte na standardowym modelu silnika.

Obliczając różnicę między prądem rzeczywistym (mierzonym) $\mathbf{i}_s^{real} = \mathbf{i}_s$ i estymowanym \mathbf{i}_s^{est} otrzymuje się dokładnie współczynnik uszkodzenia:

$$(20) \quad \mathbf{i}_s^{real} - \mathbf{i}_s^{est} = \frac{2}{3} \mu_{\alpha\beta} i_f$$

który może zostać bezpośrednio wykorzystany do przestrajania zmodyfikowanych symulatorów (16-18) podczas wystąpienia zwarcia. Schemat układu obliczającego omawiany współczynnik przedstawiono na rysunku 6.



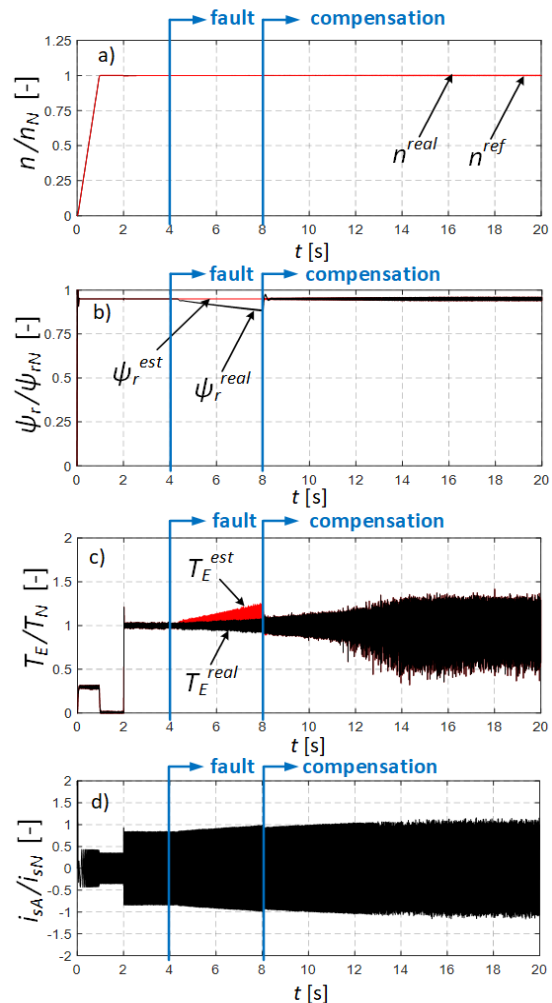
Rys.6. Schemat układu obliczającego współczynnik uszkodzenia

Należy zaznaczyć, że równanie (20) jest prawdziwe jedynie przy założeniu dokładnej znajomości parametrów maszyny przez układ estymacji prądu stojana.

Aby wyeliminować nieprawidłowe obliczanie współczynnika uszkodzenia na skutek błędnej identyfikacji parametrów SI można zastosować dekompozycję błędu $\mathbf{i}_s^{real} - \mathbf{i}_s^{est}$ na składową zależną od uszkodzenia i składową zależną od niedokładności znajomości parametrów [41]. Innym rozwiązaniem może być zastosowanie dodatkowych układów identyfikujących parametry schematu zastępczego silnika [4], [12].

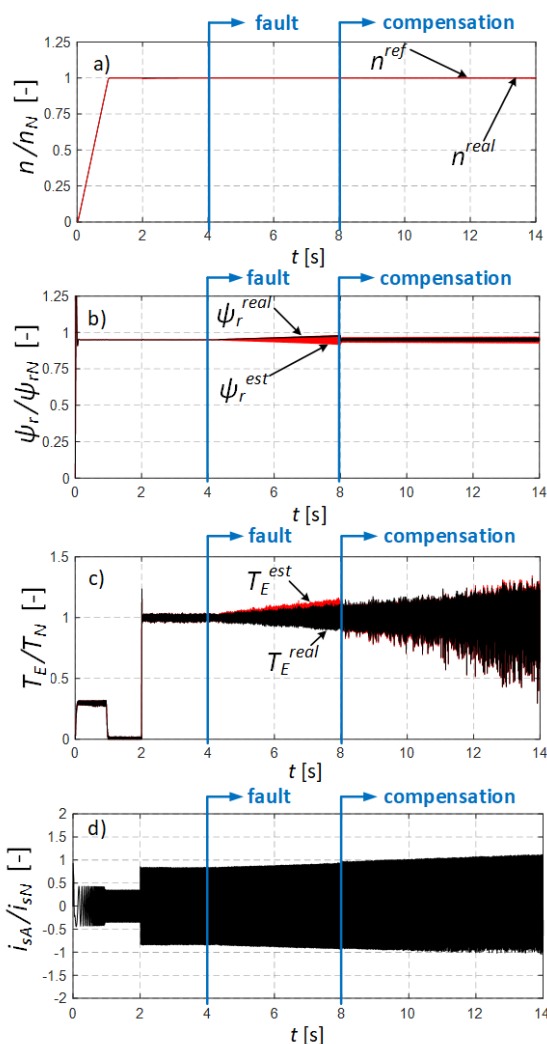
Zaproponowaną metodę przetestowano symulacyjnie. Układ pracował dla takiej samej trajektorii prędkości i momentu obciążenia jak przy wcześniejszych testach. Wykorzystywana charakterystyka uszkodzenia również pozostała bez zmian.

Jako pierwszy badano układ z symulatorem prądowym (rysunek 7).

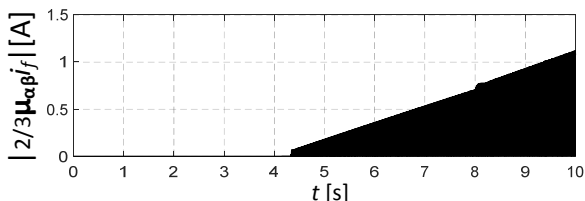


Rys.7. Przebiegi prędkości obrotowej (a), modułu strumienia wirnika (b), momentu elektromagnetycznego (c) oraz prądu fazy A (d) podczas kompensacji skutków zwarcia dla symulatora prądowego w strukturze sterowania

Układ kompensujący uruchamiano w czasie $t = 8s$. Analizując otrzymane wyniki można zauważyć, że kompensowany jest błąd estymacji strumienia oraz momentu elektromagnetycznego. Ponadto widać, że prędkość stabilizowana jest na zadanej wartości przez cały czas. Kompensacja nie wpływa mocno na wzrost wartości prądu, jednak można zauważyć silne oscylacje momentu silnika.



Rys.8. Przebiegi prędkości obrotowej (a), modułu strumienia wirnika (b), momentu elektromagnetycznego (c) oraz prądu fazy A (d) podczas kompensacji skutków zwarcia dla symulatora napięciowego w strukturze sterowania



Rys.9. Zmiana modułu współczynnika uszkodzenia

Po uszkodzeniu stojana, gdy układ kompensacji jest nieaktywny wartość strumienia rzeczywistego spada, co nie jest rejestrowane przez układ estymacji i sterowania. Do czasu załączenia estymatorów z członem kompensującym błąd ten sukcesywnie wzrasta. Po uruchomieniu kompensacji, w obu przypadkach, strumień jest stabilizowany przez strukturę sterowania na właściwej wartości. Oczywiście jest, że każde uszkodzenie wpływa negatywnie na pracę napędu elektrycznego. W tym wypadku także zmienne stanu charakteryzują się większymi oscylacjami niż przed uszkodzeniem. Moment elektromagnetyczny nie zwiększa się jednak powyżej tego, wynikającego z pracy i obciążenia.

Opracowane estymatory pozwalają także na wykrycie samego uszkodzenia i zasygnalizowania operatorowi o

konieczności szybkiego wyłączenia napędu. W przypadku szybko postępującego uszkodzenia możliwe jest także automatyczne, bezpieczne wyhamowanie napędu do zera i odłączenia zasilania. Na rysunku 9 przedstawiono zmiany wartości modułu współczynnika uszkodzenia na skutek zwarc zwojowych.

Wnioski

W artykule przedstawiono szczegółową analizę wpływu zwarc zwojowych na jakość estymacji strumienia wirnika. Badano symulatory napięciowy i prądowy, które pracowały w pętli zamkniętej w strukturze sterowania DFOC. Wykazano, że podczas zwarcia rzeczywista wartość strumienia wirnika różni się od tej estymowanej (widzianej przez układ), co prowadzi do niestabilności całego systemu. Zarówno model napięciowy i prądowy jest wrażliwy na zwarcia, co zostało również wykazane analitycznie.

W celu zapewnienia odpowiedniej jakości estymacji strumienia wirnika zaproponowano zmodyfikowane modele symulatorów. Modele te wymagają estymacji współczynnika uszkodzenia. Do tego celu wykorzystano prostą technikę bazującą na estymacji prądu stojana. Otrzymane wyniki wykazały, że zaproponowana metoda jest skuteczna.

Układ badano dla stosunkowo dużych uszkodzeń. W przypadku zwarc zwojowych może to być dyskusyjne założenie, ponieważ jest to stosunkowo szybko rozprzestrzeniające się uszkodzenie. Jednakże z punktu widzenia układów FTC zapewnienie odpowiedniej jakości działania układu w trakcie uszkodzenia jest kluczowe, nawet jeżeli silnik może ulec całkowitej degradacji. Ponadto w układach takich zakłada się pracę do przekroczenia granicznej wartości prądu lub innej wielkości charakterystycznej. Problemem są występujące silne oscylacje momentu elektromagnetycznego, dlatego również należy je kompensować.

Należy zaznaczyć, że w badaniach symulacyjnych dokładnie znany jest model silnika, który ponadto przybliża jedynie procesy występujące w układzie rzeczywistym. Dlatego ważna jest weryfikacja eksperymentalna tego układu. Jednakże, zastosowany model matematyczny był już weryfikowany eksperymentalnie wiele razy.

Autorzy: dr hab. inż. Mateusz Dybkowski, mgr. inż. Szymon Antoni Bednarz, Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław, E-mail: mateusz.dybkowski@pwr.edu.pl, szymon.bednarz@pwr.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Zawirski K., Deskur J., Kaczmarek J., Automatyka napędu elektrycznego, *Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej*, (2012)
- [2] Sieklucki G., Biszyga B., Zdrojewski A., Orzechowski T., Sykulski R., Modele i zasady sterowania napędami elektrycznymi, *Wydawnictwo Akademii-Górnictwo Hutniczej w Krakowie*, (2014)
- [3] Orłowska-Kowalska T., J Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, (2003)
- [4] Dybkowski M., J Estymacja prędkości kątowej w złożonych układach napędowych – zagadnienia wybrane, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, (2013)
- [5] Bellini A., Filippetti F., Tassoni C., Capolino G.A., Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 55 (2008), n.12, 4109–4126
- [6] Kowalski Cz.T., Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, (2014)
- [7] Szymaniec S., Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej*, (2013)
- [8] Riera-Guasp M., Antonino-Daviu J.A., Capolino G.A., Advances in Electrical Machine, Power Electronic, and Drive Condition

- Monitoring and Fault Detection: State of the Art, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 62 (2015), n.3, 1746–1759
- [9] Singh G.K., Ahmed Saleh Al Kazzaz S., Induction machine drive condition monitoring and diagnostic research—a survey, *Electr. Power Syst. Res.*, 64 (2003), n.2, 145–158.
- [10] Kowalski Cz.T., Wierzbiński R., Wolkiewicz M., Stator and Rotor Faults Monitoring of the Inverter-Fed Induction Motor Drive using State Estimators, *Autom. – J. Control. Meas. Electron. Comput. Commun.*, 54 (2013), n. 3, 348–355
- [11] Bednarz Sz., Dybkowski M., Wolkiewicz M., Identification of the Stator Faults in the Induction Motor Drives Using Parameter Estimator, *IEEE Inter. Power Electro. and Motion Control Conf. (PEMC), Hungary, Budapest, 26-30 August 2018*, 688 – 693
- [12] Toliyat H., Levi E., Raina M., A review of RFO induction motor parameter estimation techniques, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 18 (2003), n. 2, 271–283
- [13] Tallam R. M., Habetler T. G., Harley R. G., Stator winding turn-fault detection for closed-loop induction motor drives, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 39 (2003), n. 3, 1553–1557
- [14] Cheng S., Zhang P., Habetler T. G., An impedance identification approach to sensitive detection and location of stator turn-to-turn faults in a closed-loop multiple-motor drive, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58 (2011), n. 5, 1545–1554
- [15] Wolkiewicz M., Tarchała G., Kowalski Cz.T., Orłowska-Kowalska T., Stator Faults Monitoring and Detection in Vector Controlled Induction Motor Drives-Comparative Study, *Adv. Control of El. Drives and Power Electronic Converters. Studies in Systems, Decision and Control*, 75 (2017), 169-191
- [16] Wolkiewicz M., Tarchała G., Orłowska-Kowalska T., Kowalski Cz. T., Online Stator Interturn Short Circuits Monitoring in the DFOC Induction-Motor Drive, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 63 (2016), n. 4, 2517–2528
- [17] Cruz S. M. A., Cardoso A. J. M., Diagnosis of Stator Inter-Turn Short Circuits in DTC Induction Motor Drives, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 40 (2004), n. 5, 1349–1360
- [18] Berzoy A., Mohammed O. A., Restrepo J., Analysis of the Impact of Stator Interturn Short-Circuit Faults on Induction Machines Driven by Direct Torque Control, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 33 (2018), n. 3, 1463–1474
- [19] Sobański P., IGBTs Open-Circuit Faults Diagnostic Methods for the Voltage Inverter Fed Induction Motor Drives, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), n. 5, 72–77
- [20] Dybkowski M., Klimkowski K., Wybrane detektory uszkodzeń czujnika prędkości obrotowej dla napędu wektorowego z silnikiem indukcyjnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), n. 4, 85–91
- [21] Klimowski K., Układ sterowania wektorowego silnikiem indukcyjnym odporny na uszkodzenia przetwornika prądu stojana, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), n. 5, 86–89
- [22] Isermann R., Fault-Diagnosis Applications, Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, (2011)
- [23] Jiang J., Yu X., Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and passive approaches, *Annu. Rev. Control*, 36 (2012), n. 1, 60–72
- [24] Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M., Staroswiecki, Diagnosis and Fault-Tolerant Control, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, (2016)
- [25] Muenchhof M., Beck M., Isermann R., Fault-tolerant actuators and drives-Structures, fault detection principles and applications, *Annu. Rev. Control*, 33 (2009), n. 2, 136–148
- [26] Levi E., Multiphase electric machines for variable-speed applications, *IEEE Trans. Ind. Electron*, 55 (2008), n. 5, 1893–1909
- [27] Bonivento C., Isidori A., Marconi L., Paoli A., Implicit fault-tolerant control: Application to induction motors, *Automatica*, 40 (2004), n. 3, 355–371
- [28] Roubache T., Chaouch S., Naït Saïd M.S., Backstepping fault tolerant control for induction motor, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, (2018), 472–477
- [29] Roubache T., Chaouch S., Naït Saïd M.S., Backstepping design for fault detection and FTC of an induction motor drives-based EVs, *Autom. – J. Control. Meas. Electron. Comput. Commun.*, 57 (2017), n. 3, 736–748
- [30] Djeghali N., Ghanes M., Djennoune S., Barbot J.P., Tadjine M., Fault tolerant control for induction motors using sliding mode observers, *International Workshop on Variable Structure Systems (VSS)*, (2010), 190–196
- [31] Kouchih D., Hachelaf R., Boumalha N., Tadjine M., Boucherit M.S., Vector fault tolerant control of induction motor drives subject to stator interturn faults, *IEEE Inter. Power Electro. and Motion Control Conf. (PEMC)*, (2014), 108–113
- [32] Abdelmadjid G., Ahmed S., Mohamed B.S., Mohamed T., Sliding mode observer for fault tolerant control of induction motor, *Int. Symp. Environ. Friendly Energies Appl.*, (2012)
- [33] Roubache T., Chaouch S., Naït Saïd M. S., Sensorless Fault-Tolerant Control of an Induction Motor Based Electric Vehicle, *J. Electr. Eng. Technol.*, 11 (2016), 1921–718
- [34] Toumi D., Boucherit M., Tadjine M., Observer-based fault diagnosis and field oriented fault tolerant control of induction motor with stator inter-turn fault, *Arch. Electr. Eng.*, 61 (2012), n. 2, 165–188
- [35] Kallesøe C.S., Izadi-Zamanabadi R., Vadstrup P., Rasmussen H., Observer-based estimation of stator-winding faults in delta-connected induction motors: A linear matrix inequality approach, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 43 (2007), n. 4, 1022–1031
- [36] Refaat S.S., Abu-Rub H., Iqbal A., ANN-based system for inter-turn stator winding fault tolerant DTC for induction motor drives, *European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, (2015), 1–7
- [37] Diallo D., Benbouzid M.E.H., Makouf A., A Fault-Tolerant Control Architecture for Induction Motor Drives in Automotive Applications, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 53 (2004), n. 6, 1847–1855
- [38] Gaeid K.S., Ping H.W., Khalid M., Masaoud A., Sensor and sensorless fault tolerant control for induction motors using a wavelet index, *Sensors*, 12 (2012), n. 4, 4031–4050
- [39] Youngkook L., Habetler T.G., A Stator Turn Fault Tolerant Strategy for Induction Motor Drives in Safety Critical Applications, *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, (2006), 1–7
- [40] Refaat S.S., Abu-Rub H., Saad M.S., Aboul-Zahab E. M., Iqbal A., Fault tolerance of stator turn fault for three phase induction motors star-connected using artificial neural network, *IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo (APEC)*, (2013), 2336–2342
- [41] De Angelo C.H., Bossio G.R., Giaccone S.J., Valla M.I., Solsona J.A., Garcia G.O., Online Model-Based Stator-Fault Detection and Identification in Induction Motors, *IEEE Trans. Ind. Electron*, 56 (2013), n. 6, 1847–1855