

Kamil KLIMKOWSKI*
Mateusz DYBKOWSKI*

ANALIZA WEKTOROWEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM ODPORNEGO NA USZKODZENIA WYBRANYCH CZUJNIKÓW POMIAROWYCH

W pracy przedstawiono analizę pracy układu napędowego z silnikiem indukcyjnym pracującym w strukturze sterowania połowo zorientowanego DFOC podczas uszkodzeń wybranych czujników pomiarowych na pracę układu napędowego. Zaproponowano algorytmy detekcji uszkodzeń czujnika prędkości kątowej oraz czujników prądu stojana. Opracowano kompletną strukturę napędu odpornego na uszkodzenia tych elementów. Badania symulacyjne wykonano w środowisku Matlab/SimPowerSystem. Zaproponowane rozwiązanie może być z powodzeniem wykorzystane w systemach o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa.

SŁOWA KLUCZOWE: DFOC, sterowanie wektorowe, napęd bezpieczny, detektor uszkodzenia, napęd bezczujnikowy

1. WPROWADZENIE

1.1. Wstęp

Do prawidłowej pracy napędów wektorowych z silnikami indukcyjnymi niezbędne są informacje o zmiennych stanu maszyny uzyskiwanych na podstawie bezpośredniego pomiaru bądź estymacji [1]. Elementy elektroniczne i pomiarowe mogą ulec zużyciu, bądź uszkodzeniu mechanicznemu, zatem ogranicza się ich ilość w układzie sterowania poprzez wykorzystywanie w algorytmach regulacji coraz bardziej zaawansowane estymatory [2]. Aby zapewnić prawidłowe funkcjonowanie złożonych układów konieczne jest zatem uwzględnienie technik diagnostyki i kontroli, które w odpowiednio krótkim czasie pozwolą na detekcję uszkodzenia i adekwatną odpowiedź struktury sterowania. Mówi się wtedy o układach napędowych odpornych na uszkodzenia (*ang. FTCS - Fault Tolerant Control Systems*) [3, 4]. Zasadniczo można je podzielić na dwa główne typy: pasywne oraz aktywne [4]. Pierwsze z nich projektowane są tak, aby zapewnić optymalną wydajność przy wystąpieniu określonej liczby uszkodzeń bez

* Politechnika Wroclawska.

konieczności stwierdzania ich obecności. Zaliczane są do tej grupy napędy ze sterowaniem adaptacyjnym oraz predykcyjnym. Natomiast aktywne układy odporne na uszkodzenia wykorzystują detektory i/lub obserwatory, które wykrywają awarię [4].

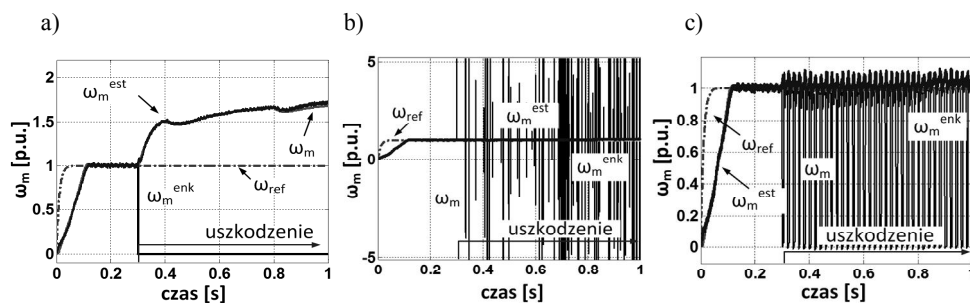
W niniejszej pracy przedstawiono możliwości wykorzystania podstawowych zmiennych stanu napędu indukcyjnego, sterowanego metodą DFOC [1], do diagnostyki i wykrywania uszkodzenia wybranych czujników pomiarowych. Strumień wirnika w badaniach wyliczany jest z modelu prądowego silnika indukcyjnego [1, 2]. Przedstawiono propozycje układów odpornych na analizowane uszkodzenia. Badania wykonano w środowisku *MATLAB-SimPowerSystem*.

2. DIAGNOSTYKA NAPĘDU INDUKCYJNEGO

2.1. Wpływ uszkodzeń czujnika prędkości na pracę napędu indukcyjnego

Wystąpienie awarii czujnika prędkości kątovej wiąże się z powstaniem niekontrolowanych zjawisk w układzie napędowym. W zależności od typu uszkodzenia enkodera mogą one doprowadzić nawet do zniszczenia silnika lub elementów przekształtnika częstotliwości.

Na rys. 1 przedstawiono przebiegi prędkości zadanej, rzeczywistej, mierzonej i estymowanej przez estymator MRAS^{CC} podczas wystąpienia awarii przetwornika obrotowo impulsowego.

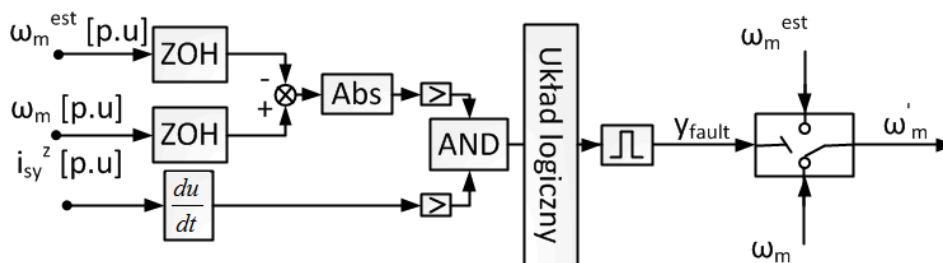


Rys. 1. Przebiegi prędkości kątovej przy wystąpieniu całkowitego uszkodzenia czujnika prędkości (a), przy zaniku poszczególnych impulsów sygnału pomiarowego (b), przy cyklicznym gubieniu impulsów (c)

Skutki wystąpienia awarii czujnika prędkości w układach napędowych, sterowanych metodami wektorowymi, najbardziej widoczne są w przebiegach momentu elektromagnetycznego, w składowych prądu stojana oraz w prędkości kątovej [6]. Ponadto do diagnostyki można wykorzystać sygnały sprzężone z tymi wielkościami.

2.2. Wykrywanie uszkodzeń czujnika prędkości kątowej

W artykule skupiono się na detektorach algorytmicznych, których działanie opiera się na wykrywaniu uszkodzeń na podstawie sygnałów, na które mogą one oddziaływać. W przypadku czujnika prędkości najszybszym i najprostszym sposobem na detekcję awarii może być porównywanie przebiegów prędkości mechanicznej oraz estymowanej [2] (rys. 2). Dodatkowo wykorzystywana może być informacja o składowej prądu stojana i_{sy}^z .



Rys. 2. Schemat blokowy detektora uszkodzeń czujnika prędkości dla sterowania wektorowego DFOC

Istotnym utrudnieniem w tego rodzaju algorytmie jest ustalenie progowej wartości błędu między tymi sygnałami, dla której detektor powinien zostać aktywowany. Po stwierdzeniu wystąpienia awarii dokonywane jest przełączenie na obwód zawierający estymator MRAC^{CC} [2], a w momencie powrotu sygnału z czujnika, detektor przełącza sterowanie z powrotem na układ czujnikowy.

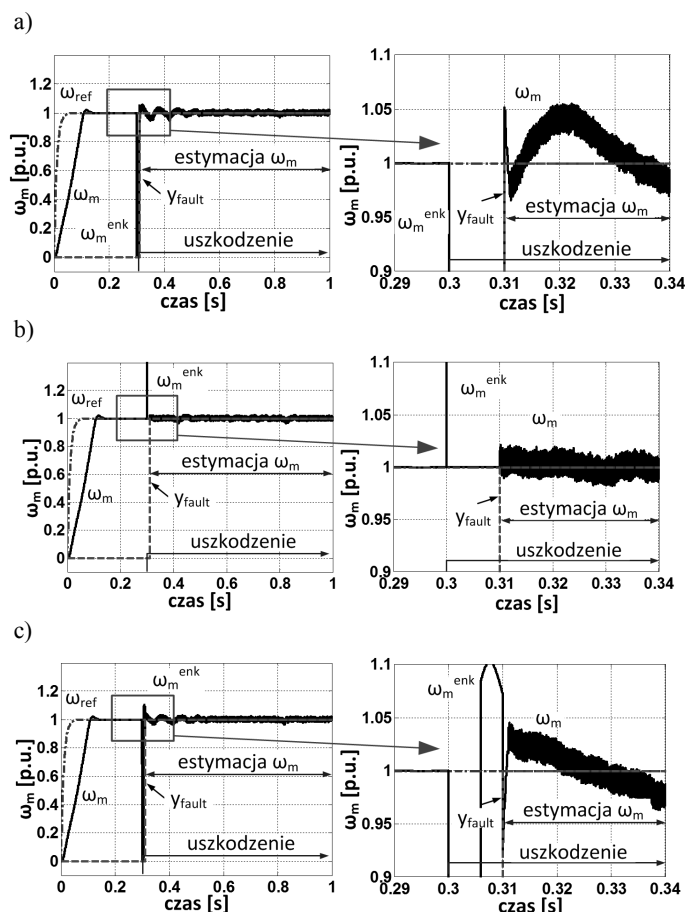
Zasadę działania można opisać za pomocą zależności:

$$if \left| \omega_m - \omega_m^{est} \right| \geq x \text{ then } \omega_m^{est} \text{ else } \omega_m \quad (1)$$

gdzie x jest maksymalną dopuszczalną różnicą prędkości.

Wynikiem działania takiego detektora jest wartość bezwzględna porównywana z wartością dopuszczalnej różnicy prędkości. Jeśli wartość absolutna jest większa to układ generuje impuls logiczny informujący o wystąpieniu uszkodzenia. Potwierdzona awaria czujnika powoduje przełączenie pomiędzy mierzoną prędkością kątową, a estymowaną przy pomocy estymatora MRAS^{CC} i ta wartość jest przekazywana do struktury sterowania.

Na rys. 3 zaprezentowano działanie detektora podczas uszkodzenia enkodera. Po pojawieniu się awarii czujnika w chwili $t = 0,3s$ układ logiczny załączył obwód sterowania bezczujnikowego [1, 2]. Czas reakcji dla wszystkich przypadków awarii wyniósł w przybliżeniu 0,01 sekundy, zatem reakcja napędu jest niewielka. Ponadto zauważalne są krótkie impulsy w przebiegu prędkości mierzonej, jednakże nie wpływają one znacząco na pracę całego układu regulacji.

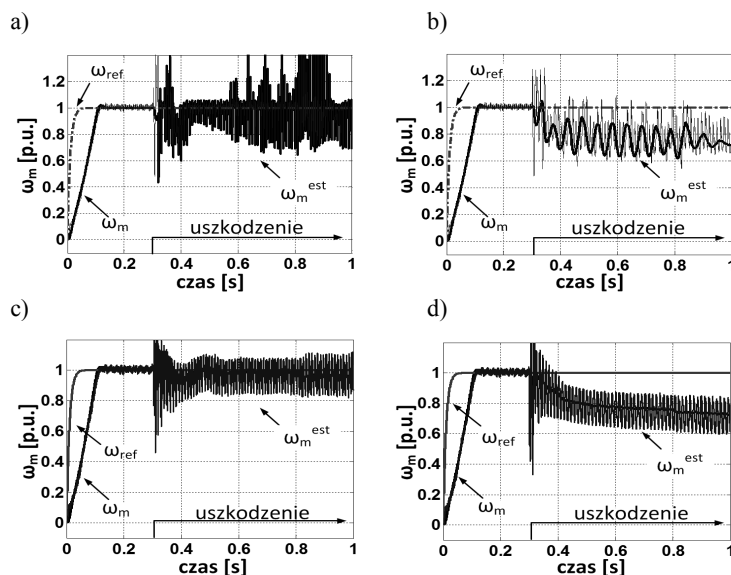


Rys. 3. Przebieg prędkości mierzonej i estymowanej dla poszczególnych uszkodzeń czujnika prędkości: a) zanik sygnału pomiarowego, b) zanik poszczególnych impulsów, c) cykliczne gubienie impulsów, przy sterowaniu wektorowym DFOC

2.3. Wpływ uszkodzeń czujnika prądu stojana na pracę napędu indukcyjnego

W rozdziale przedstawiono wpływ uszkodzenia czujnika prądu stojana na pracę napędu sterowanego metodą DFOC.

Badania wykonano dla pracy napędu przy prędkości znamionowej silnika indukcyjnego, a w chwilach $t = 0,4$ s oraz $t = 0,8$ s silnik został obciążony momentami kolejno: $0,5m_{oN}$ i m_{oN} . Uszkodzenie czujnika nastąpiło w chwili $t = 0,3$ s. W niniejszej pracy zaprezentowano wyłącznie przebiegi prędkości kątowej aby zilustrować wpływ uszkodzeń czujnika na pracę napędu. Szczegółowe badania przedstawiono w [6]. Na rys. 4 przedstawiono wpływ uszkodzeń czujnika fazy A oraz B prądu stojana na pracę napędu przy sterowaniu DFOC.



Rys. 4. Przebieg prędkości kątowej mierzonej, zadanej, estymowanej przy cyklicznie przerywanym sygnale pomiarowym z czujnika fazy A (a) i fazy B (c), przy zaniku sygnału pomiarowego z czujnika fazy A (b) i fazy B (d)

Największe skutki uszkodzeń czujnika prądu wystąpiły dla całkowitym przerwaniu sprzężenia zwrotnego oraz cyklicznie przerywanym sygnale pomiarowym. Cyklicznie przerywany sygnał pomiarowy wywołuje ogromne oscylacje o dużej amplitudzie i częstotliwości prędkości mechanicznej, estymowanej, a także w efekcie momentu elektromagnetycznego.

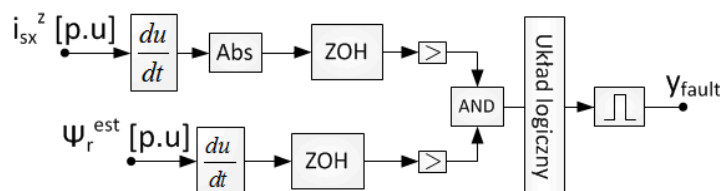
Przerwanie sprzężenia zwrotnego powoduje oscylacje prędkości oraz momentu o mniejszej niż w poprzednim przypadku częstotliwości. Dla wszystkich rodzajów uszkodzenia istotne znaczenie z punktu widzenia diagnostycznego ma przebieg składowej i_{sx} prądu stojana.

2.4. Wykrywanie uszkodzeń czujnika prądu stojana

Zaproponowano układ wykrywania uszkodzeń czujnika prądu stojana na podstawie obserwacji wartości estymowanej strumienia wirnika. Dodatkowo w strukturze sterowania połowo zorientowanego wykorzystywano informację o składowej i_{sx} . Rys. 5. przedstawia schemat blokowy detektora uszkodzeń czujnika prądu zaimplementowanych w strukturze sterowania wektorowego.

Dla struktury połowo-zorientowanej musi być spełniony warunek (2)

$$\text{if } \left| \frac{d}{dt} i_{sx}^x \right| \geq y_1 \quad \text{AND} \quad \frac{d}{dt} \psi_r^{est} \geq y_2 \quad (2)$$

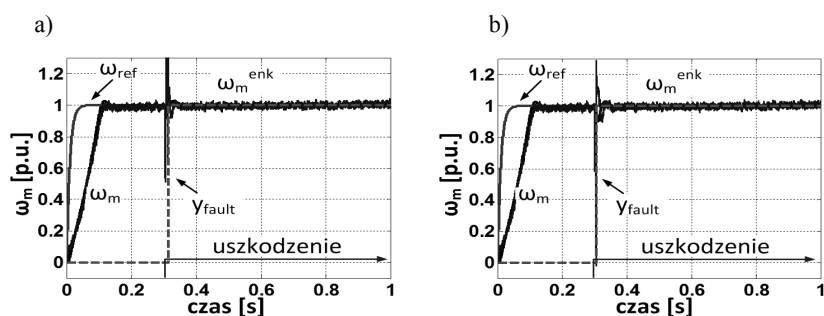


Rys. 5. Schemat blokowy detektora uszkodzeń czujnika prądu dla sterowania wektorowego DFOC

Zasada działania algorytmu polega na obserwowaniu pochodnej estymowanej wartości strumienia wirnika. Sygnał z estymatora jest dodatkowo próbkowany i opóźniany, aby uniknąć przypadkowego stwierdzenia uszkodzenia w stanach przejściowych. Dodatkowo obserwowany jest przebieg składowej i_{sx} . Wynikiem działania takiego detektora jest wartość porównywana z dopuszczalną wartością graniczną. Jeśli wartość ta jest większa to układ generuje impuls logiczny informujący o wystąpieniu uszkodzenia. Potwierdzona awaria czujnika powoduje przełączenie pomiędzy pomiarem prądu z czujnika, a obliczeniem jego wartości według zależności:

$$i_A = -(i_B + i_C) \quad (3)$$

W rezultacie możliwa jest poprawna praca napędu po wystąpieniu uszkodzenia.



Rys. 6. Przebieg prędkości kątowej mierzonej i estymowanej przy uszkodzeniu czujnika czujnika fazy A prądu stojana: (a) - zanik sygnału pomiarowego, (b)- przerywany sygnał pomiarowy

W układzie sterowania składowe α - β prądu stojana są otrzymywane na podstawie pomiaru prądów fazowych A i B. Zatem możliwe jest stwierdzenie, który z czujników uległ awarii. Jeżeli po wykryciu uszkodzenia składowa α prądu stojana różni się od sygnału pomiarowego z fazy A oznacza to, że awarii uległ czujnik pierwszy, natomiast w przeciwnym wypadku czujnik drugi - fazy B.

Układ odporny na uszkodzenia czujnika prądu zadziałał w przybliżeniu 0,01 sekundy po wykryciu awarii (rys. 6). Zaproponowane rozwiązanie układu odpornego opierające się na redundancji pomiarowej prądu stojana pozwoliło na wykrycie awarii i umożliwienie tym samym dalszej pracy układu oraz na poprawną estymację prędkości.

3. PODSUMOWANIE

W artykule zaproponowano układy do wykrywania uszkodzenia czujników pomiarowych prędkości i prądu stojana, które z powodzeniem mogą być wykorzystane w napędach o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa. Należy zaznaczyć, że zaproponowane algorytmy detekcji są bardzo proste w konstrukcji, nie obciążają kompletnego układu napędowego i bazują na sygnałach dostępnych w wewnętrznych strukturach sterowania wektorowego. Możliwe jest opracowanie bardziej złożonych i niezawodnych systemów detekcji uszkodzeń czujników pomiarowych.

*Praca zrealizowana w ramach projektów finansowanych przez:
Narodowe Centrum Nauki na podstawie decyzji DEC-2013/09/B/ST7/04199
Politechnika Wroclawska – zlecenie B30036/I-29/W-5*

LITERATURA

- [1] Orłowska-Kowalska T., Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, (2003).
- [2] Dybkowski M., Estymacja prędkości kątowej w złożonych układach napędowych – zagadnienia wybrane, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 67, seria Monografie nr 20, Wrocław 2013.
- [3] Khalaf Salloum Gaeid, Hew Wooi Ping "Fault Tolerant Control of Induction Motor", Modern Applied Science Vol. 5, No. 4; August 2011, pp 83-94.
- [4] Li Jiang, "Sensor fault detection and isolation using system dynamics identification techniques", PhD thesis, The University of Michigan, 2011.
- [5] K.-S. Lee, J.-S. Ryu „Instrument fault detection and compensation scheme for direct torque controlled induction motor drivers”, IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 150, No. 4, 2003.
- [6] Klimkowski K., Dybkowski M., Wpływ uszkodzenia wybranych czujników pomiarowych na pracę napędu indukcyjnego sterowanego metodą wektorową, Zastosowanie Komputerów w Elektrotechnice ZKwE 2014 (w druku), Poznań 2014.

AN ANALYSIS OF THE CHOSEN SENSOR FAULT TOLERANT INDUCTION MOTOR DRIVE

In the paper the influence of the chosen sensors faults (rotor speed and stator current sensors) to the properties of vector controlled motor drive are tested. Faults detection algorithms are developed. The simulation tests carried out in Matlab/SimPowerSystem software. The proposed solution can be successfully applied in the fault tolerant drive systems.