

doi:10.15199/48.2016.04.20

## Wybrane detektory uszkodzeń czujnika prędkości obrotowej dla napędu wektorowego z silnikiem indukcyjnym

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono modele i analizę wybranych detektorów uszkodzeń czujnika prędkości obrotowej silnika indukcyjnego dla napędu sterowanego metodą wektorową. Analizie poddane zostały zarówno systemy wykorzystujące teorię sztucznych sieci neuronowych, jak i proste techniki bazujące na relacjach pomiędzy wybranymi zmiennymi stanu napędu. Badania symulacyjne i eksperymentalne wykonano z wykorzystaniem struktury bezpośredniego sterowania polowo – zorientowanego (DFOC) na stanowisku laboratoryjnym z zestawem szybkiego prototypowania Micro Lab Box ds1202 firmy dSpace.

**Abstract.** In the paper the chosen speed sensor faults detectors for vector controlled induction motor drive system are presented and described. Systems based on the artificial intelligence (neural network) and simple algorithmic systems are analyzed and tested in different drive conditions. Simulation and experimental results are obtained in direct field oriented control algorithm (DFOC) on the laboratory set-up with rapid prototyping card Micro Lab Box DS1202 by dSpace. (**Chosen speed sensor fault detectors for vector controlled induction motor drive system**).

**Słowa kluczowe:** DFOC, czujnik prędkości, detektor, napęd odporny, sieci neuronowe.

**Keywords:** DFOC, speed sensor, detector, fault tolerant drive, neural networks.

### Wstęp

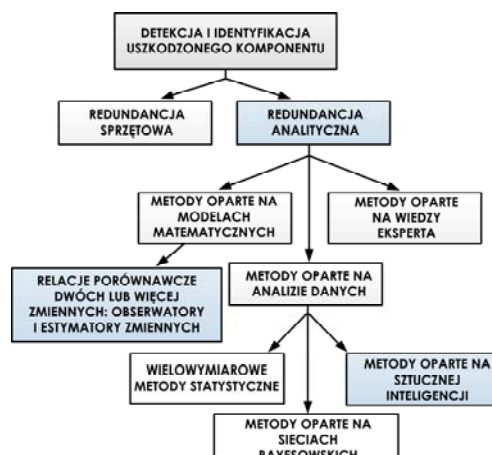
Układy napędowe o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa (FTC - ang. *Fault Tolerant Control* [17], [24]) zyskują coraz większe zainteresowanie w różnych gałęziach przemysłu. Systemy te gwarantują stabilną pracę napędu elektrycznego, pomimo wystąpienia awarii w tym układzie. Definicja systemów odpornych związana jest z detekcją [6], [13], [18] i kompensacją uszkodzeń [6], [13], [19] zarówno maszyny elektrycznej [6], [13], [14], [20], energoelektroniki [6], [13], [21] jak i czujników pomiarowych [6], [22]. Wzrost zainteresowania tymi układami wygenerował także potrzebę opracowywania uniwersalnych metod detekcji uszkodzeń komponentów całego systemu [16], [20], [24]. W zależności od napędu, detektory te mogą bazować na sygnałach mierzonych lub dodatkowo także na sygnałach pochodzących z wewnętrznej pętli regulacji (napędy sterowane metodami wektorowymi). Istotnym zagadnieniem związanym z napędami o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa jest czas od wykrycia uszkodzenia do podjęcia decyzji o dalszym stanie napędu [21]. Im dłuższy czas detekcji i kompensacji uszkodzenia, tym bardziej zakłócone są przebiegi podstawowych zmiennych stanu maszyny. Ponadto awarie czujników pomiarowych w napędach sterowanych metodami wektorowymi mogą doprowadzić do utraty stabilności bądź niepożądanych stanów pracy silnika [1], [9], [17], [24]. Aby zapewnić prawidłowe funkcjonowanie złożonych układów, konieczne jest zatem uwzględnienie technik diagnostyki [23] i kontroli, które w odpowiednio krótkim czasie pozwolą na detekcję uszkodzenia i adekwatną odpowiedź struktury sterowania [1], [9], [24].

W artykule przedstawiono analizę wybranych systemów detekcji uszkodzenia czujnika prędkości kątovej silnika indukcyjnego. Badania wykonano w strukturze sterowania polowo zorientowanego (DFOC – ang. *Direct Field Oriented Control*). Do estymacji strumienia wirnika wykorzystano model prądowy silnika indukcyjnego [1], [2], a do estymacji prędkości – estymator MRAS<sup>CC</sup> [1]. Zwrócono szczególną uwagę na czas potrzebny na prawidłową detekcję uszkodzenia enkodera inkrementalnego. Badania symulacyjne zostały zrealizowane w środowisku MATLAB/SimPowerSystems. Badania eksperymentalne wykonano na zestawie do szybkiego prototypowania MicroLabBox firmy dSpace z kartą pomiarową DS1202 i układem FPGA.

### Metody detekcji uszkodzeń czujników pomiarowych

Konwencjonalne techniki weryfikacji poprawnego działania czujników dotyczą ich okresowego sprawdzania i kalibrowania zgodnie z określonym zestawem procedur [12]. Pomimo, że takie rozwiązanie jest powszechnie stosowane w przemyśle to nie pozwala ono na identyfikację uszkodzenia w czasie rzeczywistym, zatem jest nieefektywne przy wystąpieniu wczesnych oznak awarii [12], [16]. Obecnie projektowane są bardziej systematyczne techniki, które najogólniej można podzielić na metody redundancji sprzętowej oraz analitycznej. Ogólna idea pierwszych z nich polega na ciągłym pomiarze odpowiedniej zmiennej stanu z użyciem dwóch lub większej ilości czujników, a następnie izolacji uszkodzonego komponentu poprzez porównanie z odczytami pozostałych czujników. Metody te, ze względu na swoją prostotę są najczęściej stosowane [6], [12], [13].

Metody oparte na redundancji analitycznej nie wykorzystują dodatkowych czujników, lecz bazują na wzajemnych relacjach pomiędzy mierzonymi zmiennymi stanu i otrzymanymi z modelu matematycznego procesu. Różnica pomiędzy tymi wartościami wskazuje na wystąpienie uszkodzenia elementu pomiarowego [9], [13], [18]. Jak przedstawiono na rysunku 1 metody redundancji analitycznej mogą być podzielone na kategorie w zależności od sposobu uzyskiwania informacji o danej zmiennej stanu: bazujące na modelach matematycznych, wiedzy eksperta czy analizie danych [12], [13].



Rys. 1. Podział metod detekcji i identyfikacji awarii [12], [13]

Metody oparte na modelu matematycznym wymagają dokładnego opisu badanego systemu, który może być przedstawiony za pomocą relacji parzystości, obserwatorów czy estymatorów zmiennych stanu [6], [15], [18], [24]. Systemy oparte na wiedzy eksperta opierają się na zestawie reguł nawiązujących do uprzednio zdefiniowanych i zaakceptowanych definicji [6], [16], [17], [18]. W przypadku bardzo skomplikowanych systemów można posłużyć się metodami wykorzystującymi odpowiednio dużą liczbę danych o danym procesie [6], [16], [17]. W złożonych systemach sterowania stosowanych jest coraz więcej czujników, w wyniku czego liczne dane z pomiarów mogą być zbierane w celu sterowania i diagnostyki. Umożliwia to rozwój technik opartych na wielowymiarowych metodach statystycznych, sieciach Bayesowskich i sztucznych sieciach neuronowych [14], [18], [19], [20], [22], [29], [30].

W układach napędowych odpornych na uszkodzenia (ang. FTCS - Fault Tolerant Control Systems) metody detekcji i identyfikacji awarii można podzielić na dwa główne typy: pasywne oraz aktywne [12], [16], [17], [18]. Pierwsze z nich wykorzystują techniki sterowania zapewniające, że sterowany w zamkniętej pętli system pozostaje niewrażliwy na pewne awarie, w taki sposób, że wadliwy proces kontynuuje pracę przy zachowaniu tej samej struktury i parametrów sterowania [6], [17], [19].

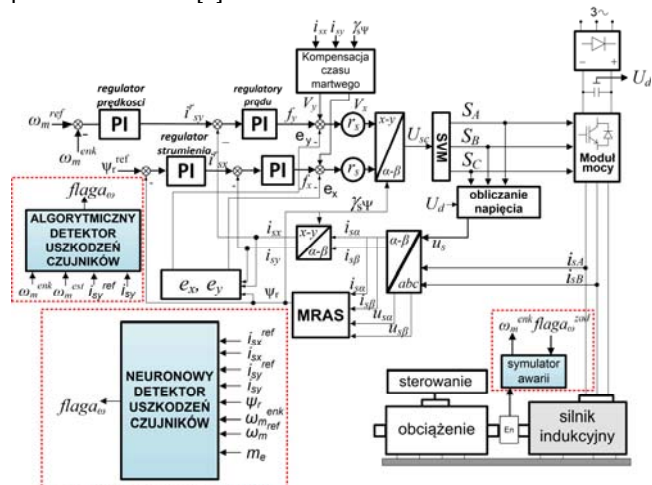
Aktywne układy odporne na uszkodzenia wykorzystują detektory i/lub obserwatory stanu [6], [12], [13], [20], które wykrywają awarię. Głównym celem jest tutaj odzyskanie sprawności poprzez użycie dodatkowych obwodów redundantnych lub przez dostosowanie parametrów regulatorów i estymatorów w wyniku identyfikacji nowego obiektu sterowania [13], [20]. Zamiast polegać na stałej niewrażliwości systemu sterowania na każdą możliwą sytuację, aktywne układy FTC reagują na awarię poprzez dostosowanie parametrów i warunków regulacji. W celu osiągnięcia pożądanej rekonfiguracji system wymaga albo informacji dotyczących awarii albo odpowiedniego mechanizmu ich wykrywania i izolacji [6], [13], [20].

### Model układu napędowego

Jednym z najczęściej wykorzystywanych systemów sterowania wektorowego silnika indukcyjnego, w różnych gałęziach przemysłu, w tym także w niniejszej pracy, jest układ bezpośredniego sterowania połowo zorientowanego DFOC [1]. Schemat ideowy analizowanego układu przedstawiono na rysunku 2.

Do estymacji strumienia wirnika wykorzystano model prądowy silnika indukcyjnego, natomiast do estymacji prędkości – estymator MRAS<sup>CC</sup>, który w wewnętrznym

obwodzie wykorzystuje estymator prądowy [1]. Dokładny model tego układu, wraz ze szczegółowymi badaniami przedstawiono w [1].



Rys.2. Schemat sterowania wektorowego DFOC wraz z systemem diagnostyki czujnika prędkości

### Wpływ uszkodzeń czujnika prędkości na pracę napędu sterowanego metodą wektorową DFOC

Awarye czujnika prędkości (enkodera inkrementalnego) można podzielić na trzy rodzaje, które przedstawiono w tabeli 1. Zależą one od współczynnika pomocniczego  $\gamma$ . W tabeli 1 przedstawiono również wyniki eksperymentalne ilustrujące wpływ opisanych uszkodzeń czujnika prędkości na pracę układu napędowego sterowanego metodą połowo zorientowaną DFOC.

Można zauważyć, że jednym z najmniejbezpiecznych rodzajów uszkodzeń jest całkowite przerwanie pętli pomiarowej prędkości. Wartość prędkości bardzo szybko rośnie, co związane jest z wystawianiem przez regulator prędkości maksymalnej (ograniczonej) wartości składowej  $i_{sy}$  prądu stojana.

Gubienie pojedynczych impulsów nie powoduje znaczących negatywnych skutków w pracy napędu z silnikiem indukcyjnym, ale długotrwałe uszkodzenie tego typu może doprowadzić do niekontrolowanych zjawisk w napędzie elektrycznym sterowanym wektorowo.

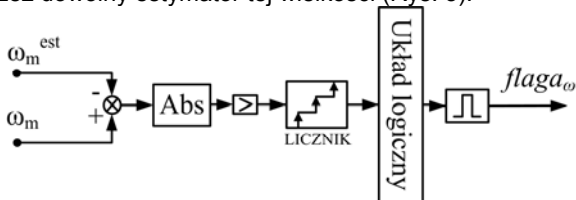
Zanik poszczególnych impulsów sygnału pomiarowego może wynikać między innymi z drgań związanych z pracą układu napędowego, awaria tego typu w konsekwencji może doprowadzić do uszkodzenia napędu.

Tabela 1. Podział uszkodzeń inkrementalnego czujnika prędkości (badania dla struktury DFOC)

Rodzaj uszkodzenia: Całkowite przerwanie pętli pomiarowej	Rodzaj uszkodzenia: Ograniczenie liczby impulsów	Rodzaj uszkodzenia: Cykliczne przerywany sygnał pomiarowy
$\omega_m^m = (1 - \gamma)\omega_m$		
$\gamma=0$	$-1 < \gamma < 1$	$\gamma \in [0, 1]$

### Detekcja uszkodzeń czujnika prędkości

Jednymi z podstawowych technik wykorzystywanych do diagnostyki stanu czujnika prędkości są metody techniczne (algorytmiczne), bazujące na wzajemnych relacjach pomiędzy sygnałami dostępnymi w wewnętrznej strukturze sterowania i/lub z czujników pomiarowych. Najprostszym i jednym z najczęściej opisywanych w literaturze [6], [9], [17], [20] sposobów detekcji awarii enkodera jest porównywanie przebiegów prędkości mechanicznej oraz estymowanej przez dowolny estymator tej wielkości (Rys. 3).



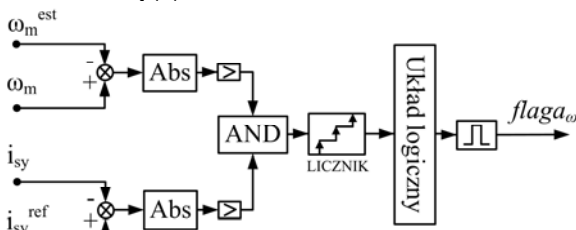
Rys.3. Schemat blokowy detektora uszkodzeń czujnika prędkości bazujący na prędkości mierzonej i estymowanej

$$(1) \quad IF \left| \omega_m - \omega_m^{est} \right| \geq \varepsilon_{1DFOC} \quad THEN \quad \omega_m^{est} \quad ELSE \quad \omega_m$$

gdzie:  $\varepsilon_{1DFOC} = 0,02 + 0,1 \cdot \omega_m^{ref}$ .

Skuteczność i niezawodność takiego algorytmu zależy od dwóch aspektów. Pierwszym z nich jest wybranie możliwie najmniej wrażliwego na zmiany parametrów silnika estymatora. Drugim utrudnieniem jest ustalenie progowej wartości błędu między wybranymi sygnałami diagnostycznymi, dla której detektor powinien zostać aktywowany. Zasada działania takiego detektora sprowadza się do zależności (1).

Innym rozwiązaniem, poprawiającym skuteczność detekcji układu z rysunku 3 jest mechanizm [9] również oparty o estymator prędkości (np. MRAS<sup>CC</sup>), który dodatkowo wykorzystuje w procesie diagnostyki składowe prądu stojana. Schemat blokowy takiego detektora przedstawiono na rysunku 4, a zasada działania wyrażona jest zależnością (2).



Rys.4. Schemat blokowy detektora uszkodzeń czujnika prędkości dla sterowania wektorowego DFOC

$$(2) \quad IF \begin{cases} \left| \omega_m - \omega_m^{est} \right| \geq \varepsilon_{1DFOC} \\ \left| i_{sy}^{ref} - i_{sy} \right| \geq \varepsilon_{2DFOC} \end{cases} \quad THEN \quad \omega_m^{est} \quad ELSE \quad \omega_m$$

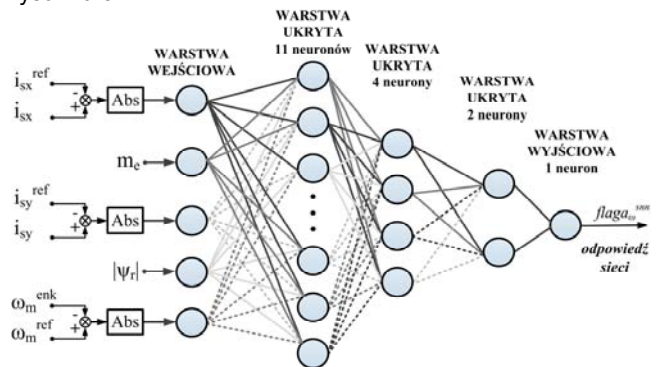
gdzie:  $\varepsilon_{1DFOC}$ ,  $\varepsilon_{2DFOC}$  - dopuszczalne progi graniczne uchybów prędkości i składowej  $i_{sy}$  dla analizowanego układu napędowego sterowanego metodą DFOC.

Detektor zostaje aktywowany jeśli wartości uchybów są większe niż dopuszczalne wartości graniczne i generuje wtedy impuls logiczny informujący o wystąpieniu uszkodzenia.

Innym sposobem wykrywania uszkodzeń czujnika prędkości kątowej jest wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych. Podstawową zaletą takiego podejścia jest fakt braku konieczności doboru współczynników granicznych, przy których detektor wystawia flagę

świadcząca o wystąpieniu awarii. Próg ten może być różny dla różnych układów napędowych.

Zaprojektowano detektor oparty na jednokierunkowej sieci neuronowej z trzema warstwami ukrytymi, złożonej z neuronów o nieliniowych funkcjach aktywacji w konfiguracji 11-4-2-1. Schemat ideowy detektora przedstawiono na rysunku 5.



Rys.5. Struktura sieci neuronowej służąca do detekcji uszkodzenia czujnika prędkości

Sieć neuronowa trenowana była sygnałem według algorytmu Levenberga-Marquardta. W procesie nauki zmianie ulegała wartość prędkości zadanej w układzie sterowania wektorowego. W pierwszej chwili napęd pracował z prędkością 100% wartości znamionowej, która w odpowiednich chwilach czasowych była zmniejszana. W czasie pracy napędu dokonywano uszkodzeń czujnika prędkości kątowej. Detektor uczony był awarii polegającej na całkowitym przerwaniu pętli pomiarowej z czujnika prędkości. Wartość prędkości estymowanej (przy wykorzystaniu estymatora MRAS<sup>CC</sup> opisanego szerzej w [1]) pokrywała się z wartością rzeczywistą silnika, która różniła się od mierzonej (przez uszkodzony czujnik inkrementalny).

Na podstawie procesu uczenia sieci neuronowej otrzymano detektor, który zweryfikowany został przy wymuszeniu innej wartości prędkości kątowej i innych typach awarii (takich, dla których sieć nie była trenowana) występujących ponadto w innych chwilach czasowych. Uzyskane wyniki badań potwierdziły, że możliwe jest wykorzystanie takiego detektora w układzie napędowym z silnikiem indukcyjnym odpornym na awarie czujnika prędkości.

### Wybrane wyniki badań

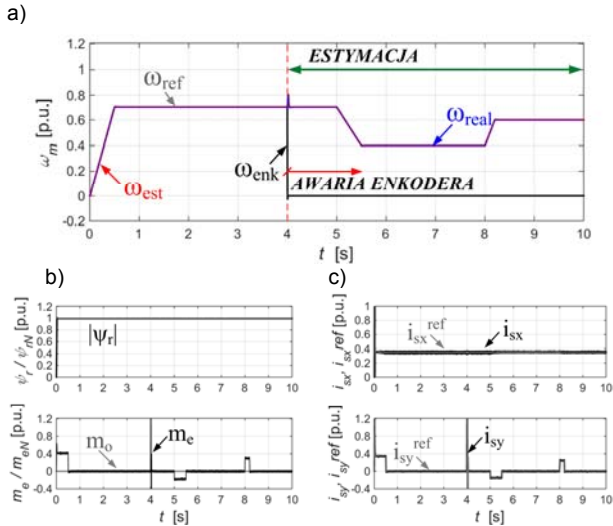
Zaprezentowano wyniki symulacyjne oraz eksperymentalne dotyczące pracy obu detektorów uszkodzenia czujnika prędkości (z Rys.4 i Rys.5). W pierwszej chwili napęd pracował z prędkością 70% wartości znamionowej, która w odpowiednich chwilach czasowych była zmieniana. Uszkodzenie enkodera zasymulowano w chwili  $t=4s$ .

Na rysunkach 6 i 7 zaprezentowano wyniki kolejno symulacyjne oraz eksperymentalne dotyczące pracy układu napędowego bez obciążenia.

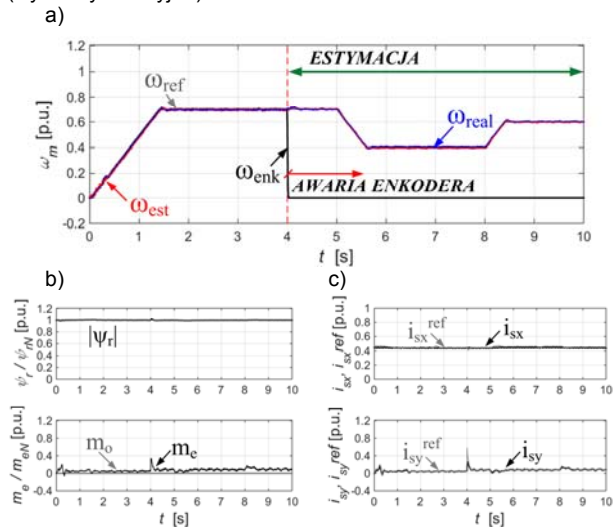
Rysunki 6-9 dotyczą układu odpornego wykorzystującego detektor algorytmiczny opisany zależnością (2). W przypadku badań symulacyjnych wyraźnie widoczny jest moment przejścia na sterowanie bez pomiaru prędkości, szczególnie na przebiegach składowej  $i_{sy}$  prądu stojana oraz momentu elektromagnetycznego. Im dłuższy czas detekcji awarii tym gorsze skutki mogą nastąpić w pracy napędu.

Kolejne przebiegi z rysunków 8 i 9 prezentują podobną sytuację, z tą różnicą, że silnik był obciążony momentem  $m_o=0,5m_{oN}$  w czasie  $t=2,5-7,0s$ .

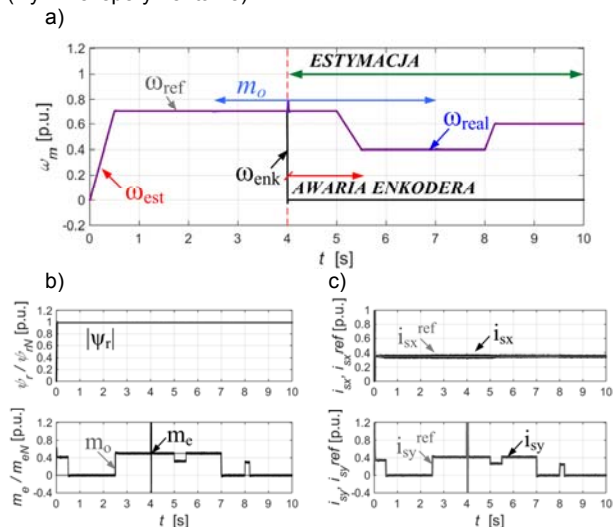




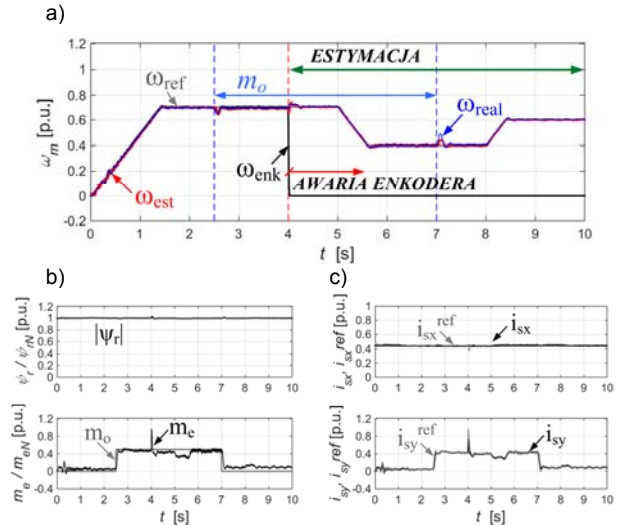
Rys.6. Przebiegi prędkości mierzonej, estymowanej i rzeczywistej silnika (a), modułu strumienia wirnika, momentu elektromagnetycznego (b) oraz składowych x-y prądu stojana (c) (wyniki symulacyjne)



Rys. 7. Przebiegi prędkości mierzonej, estymowanej i rzeczywistej silnika (a), modułu strumienia wirnika, momentu elektromagnetycznego (b) oraz składowych x-y prądu stojana (c), (wyniki eksperymentalne)



Rys.8. Przebiegi prędkości mierzonej, estymowanej i rzeczywistej silnika (a), modułu strumienia wirnika oraz momentu elektromagnetycznego (b) oraz składowych x-y prądu stojana (c), obciążenie silnika momentem  $m_0=0,5m_{0N}$  (wyniki symulacyjne)



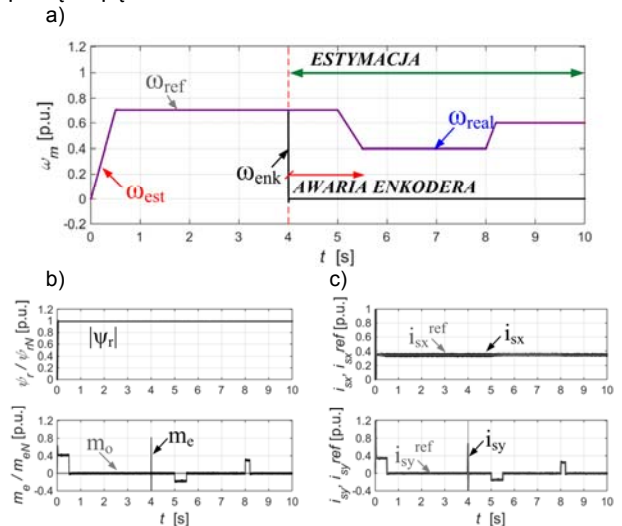
Rys.9. Przebiegi prędkości mierzonej, estymowanej i rzeczywistej silnika (a), modułu strumienia wirnika, momentu elektromagnetycznego (b) oraz składowych x-y prądu stojana (c), obciążenie silnika momentem  $m_0=0,5m_{0N}$  (wyniki eksperymentalne)

Po stwierdzeniu obecności awarii przez układ diagnostyczny, napęd został przełączony na sterowanie z estymatorem prędkości MRAS, co pozwoliło na dalszą stabilną pracę napędu wektorowego.

W chwilach pojawienia się i zaniku momentu obciążającego ( $t=2,5$ s oraz odpowiednio  $t=7$ s) oraz wystąpienia awarii enkodera ( $t=4$ s) widoczne są niewielkie przeregulowania prędkości estymowanej oraz rzeczywistej silnika, które w przypadku wyników symulacyjnych nie są zauważalne w takim stopniu.

Chwilowe zmiany amplitud momentu elektromagnetycznego oraz składowej  $i_{sy}$  prądu stojana wydają się być proporcjonalnie większe w porównaniu do pracy bez momentu obciążenia.

Prosty detektor algorytmiczny umożliwił wystarczająco szybkie wykrycie awarii, a estymator pozwolił na dalsze dokładne odwzorowanie prędkości i tym samym poprawną pracę napędu.

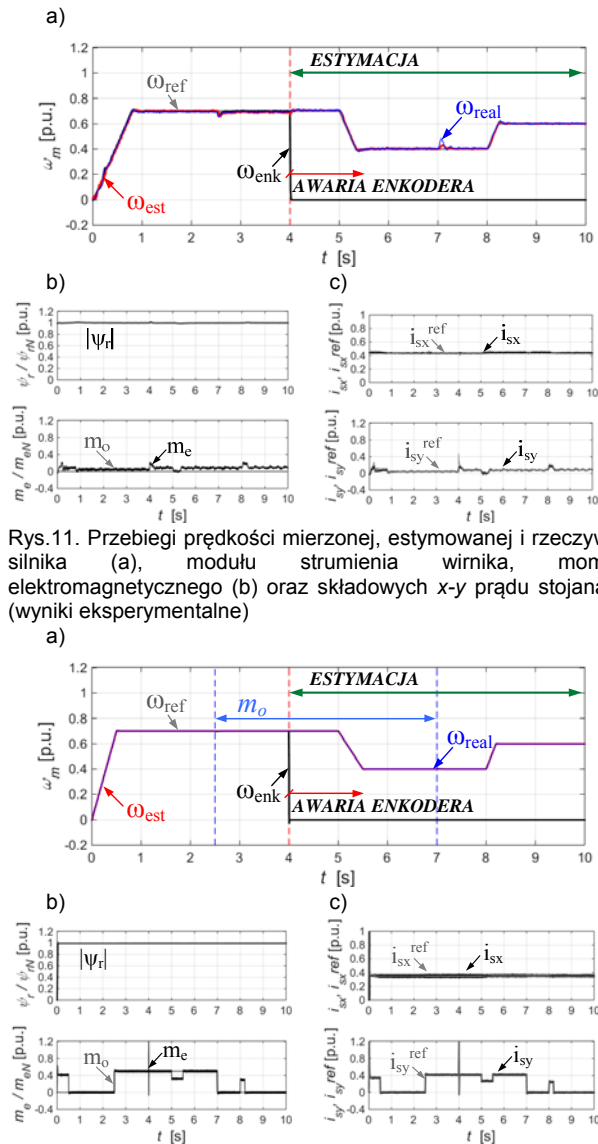


Rys.10. Przebiegi prędkości mierzonej, estymowanej i rzeczywistej silnika (a), modułu strumienia wirnika oraz momentu elektromagnetycznego (b) oraz składowych x-y prądu stojana (c), (wyniki symulacyjne)

Kolejne badania (od Rys. 10) zostały przeprowadzone z wykorzystaniem detektora opartego na sztucznej sieci neuronowej. Badania przeprowadzono w warunkach identycznych jak w przypadku detektora algorytmicznego.

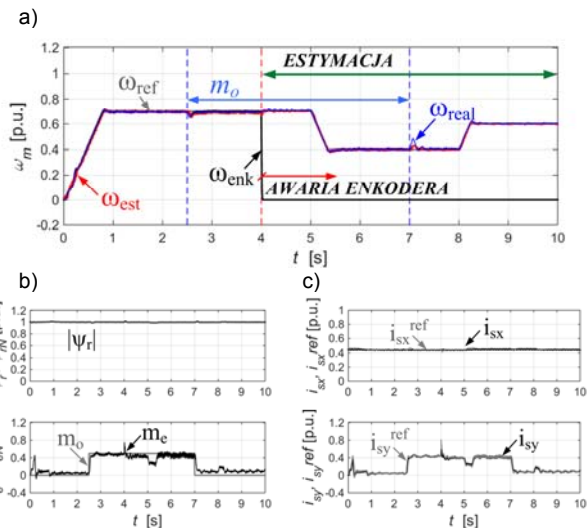
Rysunki 10-11 dotyczą pracy jałowej silnika, natomiast rysunki 12-13 pracy z obciążeniem. W obu trybach pracy napędu uzyskane wyniki symulacyjne wskazują, że prędkość silnika nie zostaje zakłócona, nawet w chwili wystąpienia awarii czujnika prędkości. Impulsy widoczne na momencie i składowej  $i_{sy}$  prądu stojana są mniejsze i krótsze niż te uzyskane w poprzednich badaniach.

Podobne przebiegi uzyskano dla badań eksperymentalnych, gdzie w chwili uszkodzenia symptomy zauważalne są gołym okiem jedynie na przebiegu referencyjnej wartości składowej  $i_{sy}$  prądu, ale w dopuszczalnych dla tego sygnału granicach.



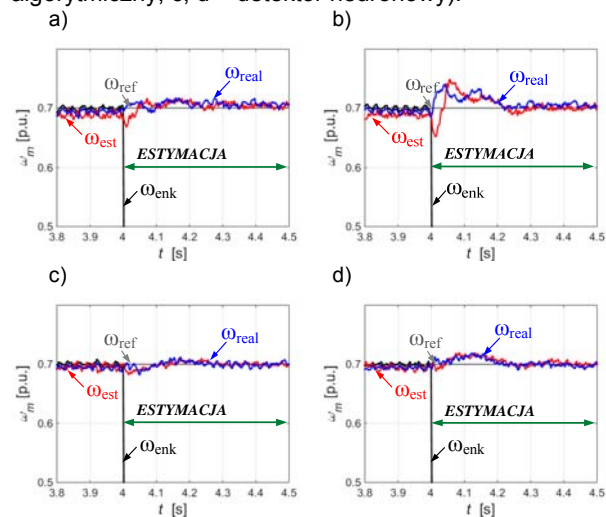
Rys. 11. Przebiegi prędkości mierzonej, estymowanej i rzeczywistej silnika (a), modułu strumienia wirnika oraz momentu elektromagnetycznego (b) oraz składowych x-y prądu stojana (c) obciążenie silnika momentem  $m_o=0,5m_{oN}$  (wyniki symulacyjne)

Widoczne różnice w przebiegach podstawowych zmiennych stanu, w chwili pojawienia się awarii wynikają jedynie z różnych czasów detekcji oraz kompensacji uszkodzenia przez układy diagnostyczne. Dlatego bardzo istotnym aspektem w układach odpornych na uszkodzenia jest skrócenie tego czasu do minimum.



Rys. 13. Przebiegi prędkości mierzonej, estymowanej i rzeczywistej silnika (a), modułu strumienia wirnika oraz momentu elektromagnetycznego (b) oraz składowych x-y prądu stojana (c) obciążenie silnika momentem  $m_o=0,5m_{oN}$  (wyniki eksperymentalne)

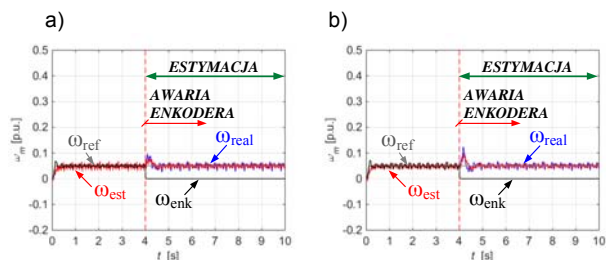
Poniżej na rysunku 14 przedstawiono w powiększeniu przebiegi prędkości estymowanej, mierzonej oraz rzeczywistej silnika w chwili przejścia na sterowanie bezczujnikowe dla obu rodzajów detektorów (a, b – detektor algorytmiczny, c, d – detektor neuronowy).



Rys. 14. Przebiegi prędkości mierzonej, estymowanej i rzeczywistej silnika podczas przejścia ze struktury czujnikowej na bezczujnikową: dla silnika nieobciążonego (a, c), oraz dla silnika obciążonego (b, d) (wyniki eksperymentalne)

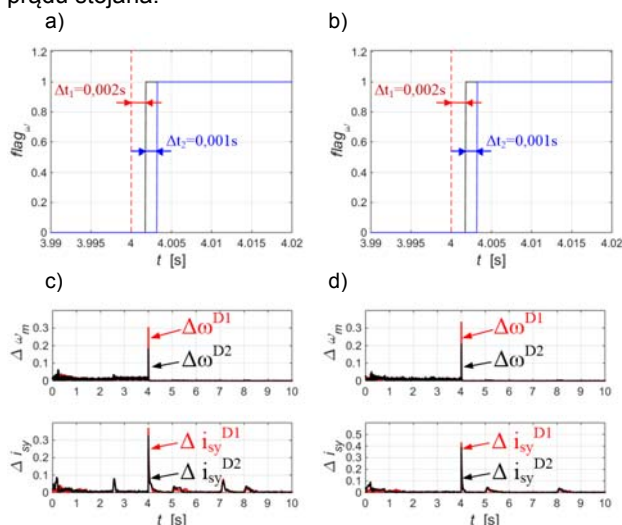
W przypadku pierwszego detektora można zauważyć, że przy obciążeniu silnika połową znamionowej wartości momentu mechanicznego przeregulowanie prędkości jest znacznie większe w porównaniu do detektora neuronowego. Można zatem stwierdzić, że przy pełnym obciążeniu skutki będą jeszcze poważniejsze, tak samo jeśli uszkodzenie wystąpiłoby w znacznie mniej korzystnym momencie (np. w chwili załączenia obciążenia).

Dodatkowo sprawdzono działanie detektorów dla 5% wartości prędkości znamionowej (Rys. 15). Dla mniejszych wartości prędkości skutki awarii są w pierwszych chwilach mniej szkodliwe dla pracy napędu zatem czas detekcji również ulega wydłużeniu. Nie mniej jednak także w takich przypadkach czas zadziałania detektora neuronowego jest krótszy w porównaniu do systemu algorytmicznego.



Rys. 15. Przebiegi prędkości mierzonej, estymowanej i rzeczywistej silnika przy wystąpieniu całkowitego uszkodzenia enkodera w chwili  $t=4$ s dla: detektora neuronowego (a) i algorytmicznego (b) (wyniki eksperymentalne)

Poniżej zaprezentowano porównanie odpowiedzi obu detektorów przy pracy napędu z obciążeniem (przypadki z rysunków 9 i 12) oraz wartości bezwzględne błędów prędkości rzeczywistej i estymowanej oraz składowej  $i_{sy}$  prądu stojana.



Rys. 16. Przebiegi czasów detekcji poszczególnych detektorów (a, b) oraz uchybów prędkości oraz składowej  $i_{sy}$  prądu stojana (c, d)

Detektor neuronowy stwierdził wystąpienie awarii czujnika prędkości po czasie  $\Delta t_1=2$ ms natomiast detektor algorytmiczny  $\Delta t_2=1$ ms później. Mimo tak nieznaczającej różnicy czasów widoczne są dwukrotnie większe amplitudy uchybów prędkości silnika.

### Podsumowanie

W artykule przedstawiono modele oraz analizę wybranych detektorów uszkodzeń czujnika prędkości obrotowej silnika indukcyjnego dla napędu sterowanego metodą wektorową. Analiza dotyczyła pracy układu ze zmienną prędkością kątową w stanie jałowym oraz z obciążeniem. Badania eksperymentalne potwierdziły założenia teoretyczne oraz uzyskane wyniki symulacyjne.

Detektor algorytmiczny charakteryzujący się znaczną prostotą i wykorzystujący informację o estymowanej prędkości kątowej silnika oraz składowej  $i_{sy}$  umożliwił detekcję awarii enkodera w całym zakresie prędkości oraz obciążenia silnika indukcyjnego. Nie mniej jednak konieczny jest odpowiedni dobór progów granicznych. Im bardziej precyzyjnie zostaną wyznaczone wartości tych progów tym szybsza będzie odpowiedź detektora, ale tym samym zostanie zwiększona podatność detektora na błędną identyfikację awarii. Ponadto im bardziej wrażliwy detektor, tym większe prawdopodobieństwo nieprawidłowego działania pozostałych układów diagnostycznych innych czujników pomiarowych (np. czujników prądu stojana). Zatem przy projektowaniu detektora tego typu należy wziąć pod uwagę wiele

czynników, co znacznie utrudnia proces doboru optymalnych współczynników.

Wad tych pozbawiony jest detektor oparty o sztuczną sieć neuronową, która uczona jest sygnałami związanymi pośrednio bądź bezpośrednio z zakłóconą przez awarię zmienną stanu. Taki układ diagnostyczny może być zastosowany dla każdego silnika i nie ma potrzeby doboru dodatkowych parametrów. Co więcej zaprezentowana sieć neuronowa wykazała się lepszymi właściwościami i możliwościami detekcji awarii w odpowiednio szybkim i bezpiecznym dla napędu czasie.

Należy zaznaczyć, że oba zaproponowane detektory są w stanie wykryć awarię czujnika prędkości polegającą nie tylko na całkowitym jego uszkodzeniu, ale także na zaburzeniu wyznaczania odpowiednich zbroczy impulsów enkodera. Zatem każde zakłócenie odczytu informacji o prędkości silnika z czujnika zostanie zarejestrowane jako awaria i możliwe jest zastosowanie odpowiedniej do rodzaju uszkodzenia metody kompensacji.

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

**Autorzy:** Dr hab. inż. Mateusz Dybkowski, mgr inż. Kamil Klimkowski, Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, E-mail: [mateusz.dybkowski@pwr.edu.pl](mailto:mateusz.dybkowski@pwr.edu.pl), [kamil.klimkowski@pwr.edu.pl](mailto:kamil.klimkowski@pwr.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Dybkowski M., Estymacja prędkości kątowej w złożonych układach napędowych – zagadnienia wybrane, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wroclawskiej*, nr 67 seria Monografie nr 20, 2013
- [2] Orłowska-Kowalska T., Bezczylnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi., Oficyna wydawnicza Politechniki Wroclawskiej, 2003
- [3] Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M., Stator Current-based MRAS Estimator for a Wide Range Speed-Sensorless Induction Motor Drive, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, 57 (2010), n.4, 1296-1308
- [4] Shicai Fan, Zou J., Sensor Fault detection and fault tolerant control of induction motor drivers for electric vehicles, *IEEE 7th Int. Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE Asia, China 2012*, 1306-1309
- [5] Khalaf Salloum Gaeid, Hew Wooi Ping, Fault Tolerant Control of Induction Motor, *Modern Applied Science*, 5 (2011), n.4, 83-94
- [6] Li Jiang, Sensor fault detection and isolation using system dynamics identification techniques, PhD thesis, The University of Michigan, 2011
- [7] Lee K.S., Ryu J.-S., Instrument fault detection and compensation scheme for direct torque controlled induction motor drivers, *IEE Control Theory Appl.*, 150 (2003), n.4
- [8] Klimkowski K., Dybkowski M., *Wpływ uszkodzenia wybranych czujników pomiarowych na pracę napędu sterowanego metodą wektorową*, ZKwE 2014, Poznań University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering nr 77, 185-192
- [9] Klimkowski K., Dybkowski M., Analiza wektorowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym odpornego na uszkodzenia wybranych czujników pomiarowych, ZKwE 2014, Poznań University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering (2014), nr 77, 193-200
- [10] Boldea I., Lascu C., Blaabjerg F., A Class of Speed-Sensorless Sliding-Mode Observers for High-Performance Induction Motor Drives, *IEEE Trans. Industrial Electronics*, 56 (2009), n.9
- [11] Romero M.E., Seron M.M., De Dona J.A., Sensor fault-tolerant vector control of induction motors, *IET Control Theory Applications*, 4 (2010), n.9, 1707-1724
- [12] Isermann R., *Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection Fault Tolerance*, Springer, New York, 2006
- [13] Jin Jiang, Xiang Yu, Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and passive approaches, *Annual Reviews in Control*, 36 (2012), n.1, 60-72

- [14] Kowalski C.T., Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013
- [15] Betta, G., D'apuzzo, M., And Pietrosanta, A., A knowledge-based approach to instrument fault detection and isolation, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, (1995).
- [16] Betta G., Dell'isola M., Liguori C., Pietrosant, A., Expert systems for the detection and isolation of faults on low-accuracy sensor systems, IEEE Workshop ET&VS-IM/97, Niagara Falls, Ontario, Canada, 1997
- [17] Betta G., Pietrosanto A., Instrument fault detection and isolation: state of the art and new research trends, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 49 (2000) (1):100-7, 2000
- [18] Fekih A., Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control Design for Aerospace Systems: A Bibliographical Review, American Control Conference, 4-6.06.2014.
- [19] Alag S., Agogino A., Morjaria M., A methodology for intelligent sensor measurement, validation, fusion, and fault detection for equipment monitoring and diagnostics, (AI EDAM) Artificial Intelligence for Engineering Design, *Analysis and Manufacturing*, (2001), 15(4):307-20
- [20] Aradhye H., Sensor fault detection, isolation, and accommodation using neural networks, fuzzy logic and bayesian belief networks. Master's thesis, University of New Mexico, (2002).
- [21] Benitez-Perez, H., Garcia-Nocetti, F., Thompson, H., *Fault classification som and pca for inertial sensor drift*, 2005 IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing, pp. 177-182, Portugal. IEEE, (2005).
- [22] Bernieri A., Betta G., Pietrosant A., Sansone, C., A neural network approach to instrument fault detection and isolation, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 44 (1005), (3):747-50
- [23] Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Diagnosis and fault-tolerant control, Springer-Verlag, 2003
- [24] Hsiao T., Tomizuka M., Sensor fault detection in vehicle lateral control systems via switching Kalman filtering, Proceedings of the 2005 American Control Conference (IEEE Cat. No. 05CH37668), volume vol. 7, pages 5009-14, Portland, OR, USA. IEEE, (2005).
- [25] Klimkowski K., Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M., Speed Fault Tolerant Direct Torque Control of Induction Motor Drive, Proc. of the 16th Intern. Conf. Power Electronics and Motion Control PEMC'2014, Antalya, Turkey, 21-24.09.2014.
- [26] M.E. Romero, M.M. Seron, J.A. De Dona', Sensor fault-tolerant vector control of induction motors, *IET Control Theory Applications*, 4 (2010), n.9, 1707-1724
- [27] Mehranbod, N., Soroush, M., And Panjapornpon, C., *A method of sensor fault detection and identification*, *Journal of Process Control*, 15 (2005),(3):321-339
- [28] Mehranbod N., Soroush M., Piovosio M., Ogunnaike B. A., Probabilistic model for sensor fault detection and identification, *AIChE Journal*, 49 (2003), (7):1787-1802
- [29] Mengshoel O., Darwiche A., Uckun S., Sensor validation using Bayesian networks, 9th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space, Los Angeles, CA (2008).
- [30] Zhang Y. X., Artificial neural networks based on principal component analysis input selection for clinical pattern recognition analysis. *Talanta*, 73 (2007),(1), 68-75