

*silnik indukcyjny, napęd elektryczny,
fault tolerant, FTC, czujniki pomiarowe, detekcja uszkodzeń*

Kamil KLIMKOWSKI*

UKŁADY NAPĘDOWE ODPORNE NA USZKODZENIA – STAN ZAGADNIENIA

W niniejszej pracy opisano metody diagnostyczne wykorzystywane do detekcji uszkodzeń w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi. Przedstawiono techniki kompensacji wpływu awarii komponentów napędów elektrycznych, opisano ich wady oraz zalety. Zwrócono szczególną uwagę na systemy, które z powodzeniem mogą zostać wykorzystane w badaniach dotyczących uszkodzeń czujników pomiarowych prądu i prędkości kątowej.

1. WPROWADZENIE

Wraz z czasem wydajność maszyn i urządzeń elektrycznych ulega stopniowemu pogorszeniu w wyniku zużycia i zachodzących procesów starzeniowych, co zmniejsza niezawodność całego układu napędowego i technologicznego oraz zwiększa ryzyko wystąpienia awarii podstawowych komponentów systemu [12]. Przyrządy pomiarowe potrzebne są w prawie wszystkich procesach przemysłowych, niezależnie od ich złożoności, w celu zapewnienia bezpiecznego i sprawnego funkcjonowania procesu. Istnieje rosnące zapotrzebowanie na coraz bardziej niezawodne instalacje o większej wydajności, spowodowane zaostrzonymi przepisami bezpieczeństwa i bardziej konkurencyjnym rynkiem [12], [13], [18]. To z kolei wymaga wdrożenia bardziej rzetelnych metod wykrywania i identyfikacji awarii instrumentów (IFDI – *Instrument Fault Detection and Identification* [12]), systemów wykrywania awarii i diagnostyki (FDD – *Fault Detection and Diagnosis* [12]) oraz nowych metod sterowania odpornych na uszkodzenia [12], [13].

* Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław, e-mail: kamil.klimkowski@pwr.edu.pl

2. CHARAKTERYSTYKA I STAN ZAGADNIENIA

Układy diagnostyki i sterowania wymagają coraz większej liczby czujników i urządzeń pomiarowych, które dostarczają kluczowych informacji na temat warunków pracy systemu. Są one niezbędne do monitorowania stanu procesu i podejmowania w razie konieczności właściwego działania [12], [13], [16], [18]. Błędny pomiar może spowodować nieprawidłowe działanie systemu kontroli procesu i/lub nieprawidłową decyzję podjętą przez system FDD, co w konsekwencji prowadzi do obniżenia wydajności pracy lub całkowitego wyłączenia procesu [13].

Przyrząd pomiarowy składa się z urządzenia odczytowego, ustroju pomiarowego (przetworniki elektromechaniczne lub elektroniczne), procesora sygnału i interfejsu komunikacyjnego [12]. Każda z tych części może ulec uszkodzeniu, powodując, że czujnik generuje sygnał z odchyleniem w porównaniu do mierzonego sygnału. Czujnik uznaje się za uszkodzony, kiedy zwraca wartości o niedozwolonym odchyleniu od jego charakterystycznych właściwości [12], [13], [18]. To odchylenie może pojawić się w czterech formach, a mianowicie: offsetu, dryfu, całkowitej awarii lub degradacji [13], [18]. Stała różnica pomiędzy odczytem z czujnika a wartością rzeczywistą spowodowana jest offsetem, natomiast dryf dotyczy stanu gdy uchyb ten zmienia się liniowo wraz z upływem czasu. Jeśli odczyt czujnika pozostaje stały, niezależnie od zmian wartości rzeczywistej, to mówi się o całkowitej awarii. Stopniowa degradacja czujnika może być spowodowana długotrwałym działaniem dodatkowych czynników zakłócających (temperatura, naprężenia, drgania), naturalnym procesem starzenia, bądź na skutek odkładania się na powierzchni elementu pomiarowego zanieczyszczeń, czego efektem jest pogorszenie właściwości statycznych i dynamicznych przetwornika [12], [13], [18].

Konserwacja zapobiegawcza, regularne sprawdzanie i kalibracja czujników są powszechnymi metodami IFDI [7], [8]. Uciążliwe procedury konserwacji komponentów pomiarowych systemu nie mogą zagwarantować bezawaryjnej pracy czujników systemu i tym samym nie mogą być traktowane jako wystarczająca alternatywa dla efektywnego systemu automatycznego IFDI. Wykrywanie uszkodzeń jest pierwszą fazą zautomatyzowanych technik IFDI. W celu skutecznego wykrywania awarii powinny być realizowane trzy następujące kroki [6], [12], [13]:

- monitorowanie procesu na podstawie badań,
- mierzenie błędów pomiarów parametrów lub zmiennych stanu,
- porównywanie ich z odpowiednio zdefiniowanymi progami granicznymi.

Detekcja i izolacja uszkodzonego komponentu nie jest łatwym problemem [9], [12]. Pomiar czujnika opisują cechy zarówno monitorowanego systemu jak i samego czujnika, zatem wszelkie nieprawidłowości i odchylenia mogą być spowodowane przez zmiany albo całego układu bądź wadliwego komponentu.

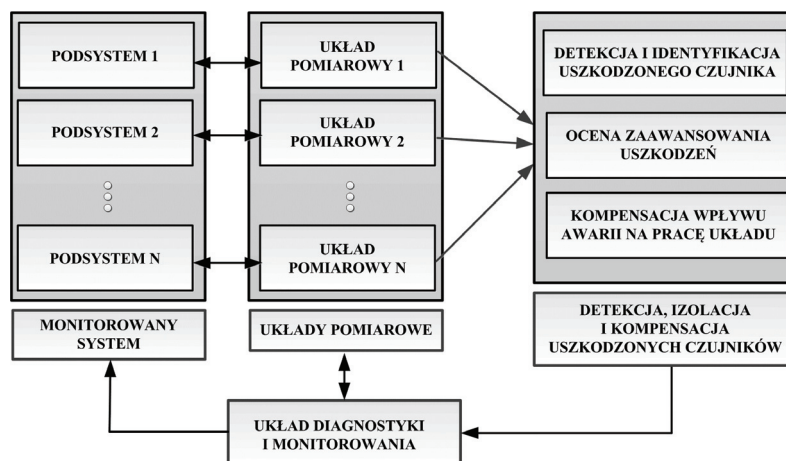
Nowoczesne systemy sterowania i regulacji są coraz bardziej złożone. Liczba podzespołów, układów oraz łączących je czujników także wzrasta, co zwiększa ryzyko wystąpienia awarii pojedynczych bądź kilku elementów jednocześnie.

Ponadto niedoskonałość wykonania czujnika, jak również zakłócenia towarzyszące danemu procesowi generują szum w przebiegach sygnałów pomiarowych. Wszystkie wyżej wymienione kwestie utrudniają wykrywanie i izolację uszkodzonego czujnika [12], [13], [18].

Metody wykrywania, identyfikacji i kompensacji uszkodzeń powinny być w stanie pracować w czasie rzeczywistym tak, aby pomiary mogły być zweryfikowane w możliwie krótkim okresie czasu w celu zdiagnozowania i podjęcia odpowiednich kroków [6], [16]. To nakłada dodatkowe trudności na rozwój wykonalnego rozwiązania ze względu na ograniczoną moc obliczeniową i dostępną pamięć procesorów używanych w systemach diagnostyki i sterowania [1].

3. METODY WYKRYWANIA I IZOLOWANIA AWARII INSTRUMENTÓW POMIAROWYCH

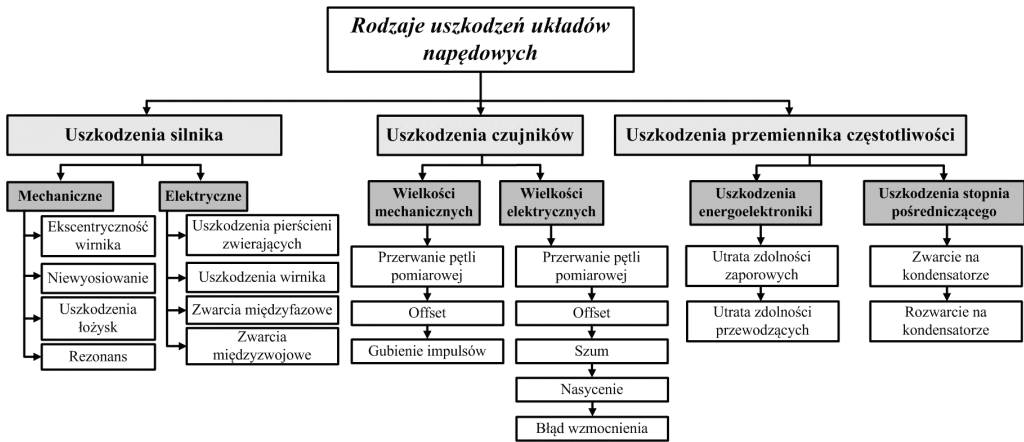
Jak pokazano na rys. 1, koncepcja układów odpornych ma na celu identyfikację oraz izolację awarii czujników w układzie dynamicznym, oceny jej zaawansowania i kompensację jej wpływu [9], [12], [13],[18], [19].



Rys. 1. Ogólny schemat układów odpornych przeznaczonych do identyfikacji oraz izolacji awarii czujników

Rozwój techniki mikroprocesorowej oraz pomiarowej, a także metod sterowania układów napędowych, umożliwił eliminację niektórych przetworników pomiarowych przy zachowaniu zadowalającej jakości regulacji, adekwatnej do przeznaczenia napędu. Projektowane i wdrażane są układy pozbawione wybranych sprzężeń zwrotnych, a brakujące sygnały są estymowane na podstawie sygnałów z istniejących sprzężeń

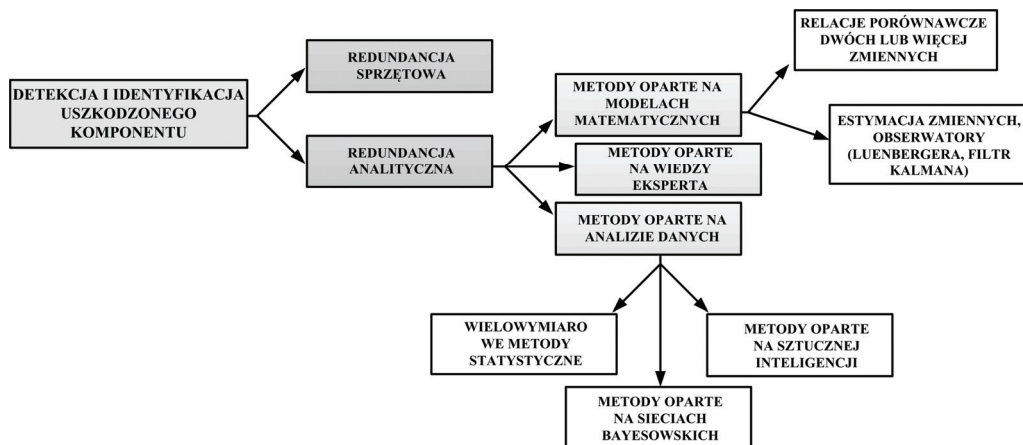
[9], [10], [12]. Zwiększone wymagania co do niezawodności napędów z silnikami indukcyjnymi wygenerowały wzrost zainteresowania układami napędowymi odpornymi na uszkodzenia (ang. FTCS – *Fault Tolerant Control Systems*) [10], [12]. Układy napędowe są narażone na występowanie awarii, których skutki zależą od ich lokalizacji [10], [12]. Na rysunku 2 przedstawiono podstawowe uszkodzenia układów napędowych [10], [12].



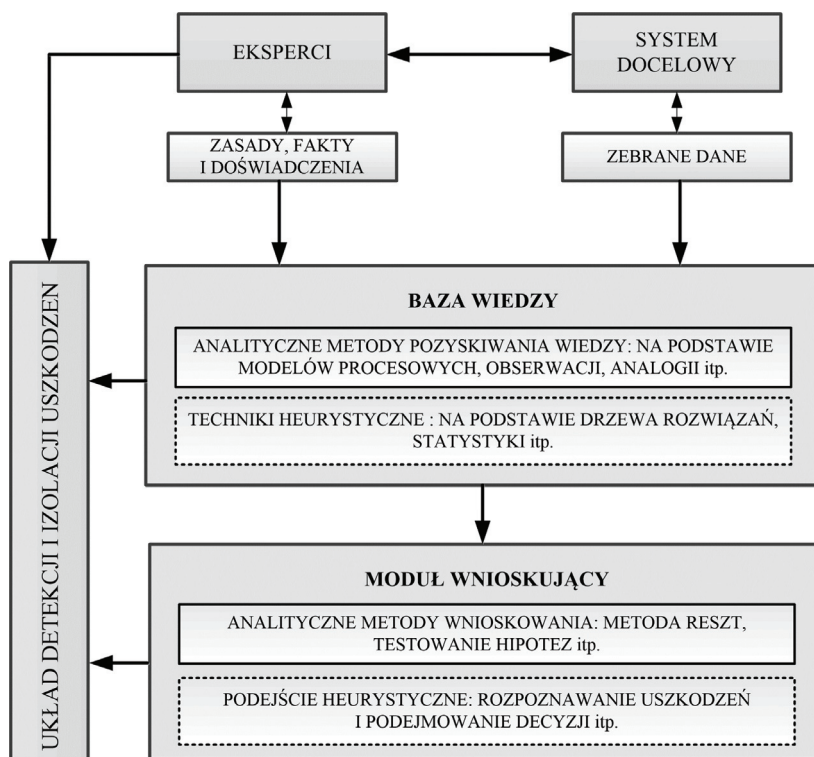
Rys. 2. Rodzaje uszkodzeń układów napędowych [10], [12]

Konwencjonalne techniki weryfikacji poprawnego działania czujników dotyczą ich okresowego sprawdzania i kalibrowania zgodnie z zestawem określonych procedur [12]. Pomimo, że metoda ta jest powszechnie stosowana w przemyśle do wykrywania uszkodzeń urządzeń pomiarowych, nie pozwala na identyfikację awarii w czasie rzeczywistym, zatem jest nieefektywna przy wczesnych oznakach uszkodzenia czujnika [12], [16]. Dlatego podjęte zostały starania rozwoju bardziej systematycznych technik, które 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 uszkodzenia poprzez porównanie z odczytami pozostałych czujników. Metody te, ze względu na swoją prostotę są najczęściej stosowane [12], [13], [18].

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 [13], [18]. Jak przedstawiono na rys. 3 metody redundancji analitycznej mogą być podzielone na kategorie w zależności od sposobu uzyskiwania informacji o danej zmiennej stanu: oparte na modelach matematycznych, wiedzy eksperta czy analizie danych [12], [18].



Rys. 3. Podział metod detekcji i identyfikacji awarii [12], [18]



Rys. 4. Ogólna architektura systemu opartego na wiedzy eksperckiej w celu wykrywania i izolacji awarii [7], [18]

Jak pokazano na rys. 4, system oparty na wiedzy eksperta jest na ogół złożony z modułów bazy wiedzy, wnioskowania i interpretacji [7], [18]. Baza wiedzy przechowuje dane historyczne, a także zgromadzone zasady, fakty i doświadczenia ekspertów [8]. Wykorzystując metody analityczne i/lub heurystyczne dane są pozyskiwane a następnie przekazywane do modułu wnioskowania. Dodatkowo za pośrednictwem interfejsu użytkownika, ekspert może nie tylko dostarczać dane i reguły na wejście układu, ale także nadzorować proces identyfikacji i izolacji awarii [7], [12], [18].

Wśród różnych technik redundancji analitycznej, metody oparte na modelu matematycznym wymagają dokładnego opisu matematycznego badanego systemu, który może być opisany za pomocą relacji parzystości, obserwatora Luenbergera, filtru Kalmana czy estymatorów zmiennych stanu [1], [7], [11], [18]. Systemy oparte na wiedzy eksperta opierają się na zestawie reguł nawiązujących do uprzednio zdefiniowanych i zaakceptowanych definicji [1], [8], [12], [18]. W przypadku bardzo skomplikowanych systemów można posłużyć się metodami wykorzystującymi odpowiednio dużą liczbę danych o danym procesie [1], [12], [18].

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 [1], [2] [3], [5], [17], [22], [23].

4. UKŁADY ODPORNE NA USZKODZENIA

Układy napędowe odporne na uszkodzenia (ang. FTCS – *Fault Tolerant Control Systems*) można podzielić na dwa główne typy: pasywne (PFTCS) oraz aktywne (AFTCS) [1], [12], [13], [18]. Pierwsze z nich projektowane są tak, aby zapewnić optymalną wydajność przy wystąpieniu określonej liczby uszkodzeń bez konieczności stwierdzania ich obecności [12], [18]. Pasywne układy odporne na uszkodzenia 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 [10], [12], [18]. Za takim podejściem przemawiają dwa argumenty. Po pierwsze, uzyskanie takiej kompensacji możliwe jest poprzez stosowanie prostszego oprogramowania i konfiguracji sprzętowej, a po drugie klasyczna teoria niezawodności stwierdza, że stabilność systemu gwałtownie spada wraz ze zwiększeniem skomplikowania układu [1], [9], [12], [13], [18]. Dlatego głównym celem pasywnych systemów odpornych jest osiągnięcie przewagi nad klasycznymi strukturami sterowania poprzez poprawę wydajności, wykonania i projektowania mniej złożonych układów. Dokładniej zagadnienie to zostało opisane i przedstawione w [24], [25], [26], [27], [29], [30].

Systemy AFTC w przeciwieństwie do pasywnych układów odpornych, zamiast polegać na stałej niewrażliwości systemu sterowania na każdą możliwą sytuację, reagują na awarię poprzez dostosowanie parametrów i warunków regulacji. W celu osiągnięcia pożądanej rekonfiguracji, system wymaga albo zestawu informacji dotyczących awarii albo odpowiedniego mechanizmu ich wykrywania i izolacji [1], [12], [20]. Skutkiem takiej rekonfiguracji jest uzyskanie prawidłowej i stabilnej pracy całego napędu. W niektórych przypadkach akceptowalne jest także obniżenie wydajności napędu przy zapewnieniu dalszej pracy układu [26], [31], [32]. Aktywne układy odporne są określane w literaturze jako samonaprawiające i rekonfigurowalne, natomiast z punktu widzenia funkcjonalności mówi się o nich jako systemach detekcji, identyfikacji i kompensacji awarii. Układy AFTC wykorzystują detektory i/lub obserwatory [12], [13], [19], [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 [12], [13].

Głównym celem projektowanych układów AFTCS jest zapewnienie stabilnej pracy napędu w trybie bezawaryjnej pracy oraz w przypadku wystąpienia uszkodzenia. Istotnym jest wskazanie priorytetów dla każdego ze stanów. W trakcie normalnej pracy systemu większy nacisk powinien być kładziony na uzyskanie jak najlepszej precyzji i dokładności, natomiast przy pojawieniu się awarii – na sposób w jaki układ jest w stanie zachować stabilność oraz akceptowalny poziom wydajności. Najogólniej aktywne systemy odporne na uszkodzenia można podzielić na cztery podsystemy: rekonfigurowalny kontroler, algorytm rekonfiguracji kontrolera, układ FDD oraz sterownik referencyjny.

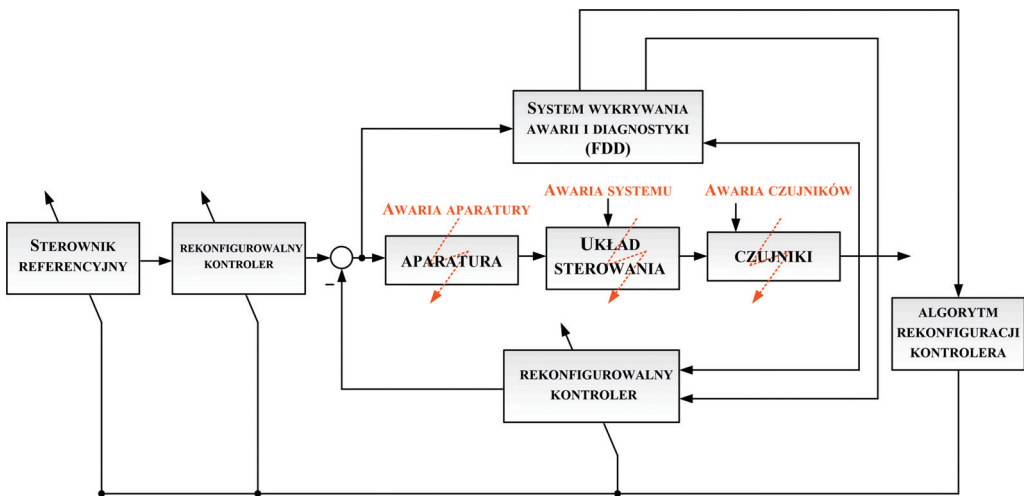
Wspólne funkcjonowanie układu FDD oraz rekonfigurowalnego kontrolera w strukturze sterowania jest główną cechą odróżniającą aktywne i pasywne systemy odporne. Najważniejszymi cechami poszczególnych podsystemów AFTCS, które w procesie projektowania powinny być uwzględnione, są [33]:

- 1) łatwość rekonfiguracji kontrolera,
- 2) wysoka czułość układu FDD na wszelkie uszkodzenia i jednoczesna niewrażliwość na zmiany modelu matematycznego procesu, trybu pracy napędu i zakłócenia zewnętrzne,
- 3) odpowiednio szybki czas reakcji kontrolera, umożliwiający odzyskanie wydajności systemu po wystąpieniu awarii
- 4) opóźnienia czasowe w układzie FDD w ramach ograniczeń wejść sterujących i stanów systemu.

Kluczową kwestią w każdym systemie AFTCS jest ograniczony czas dostępny dla układu detekcji i rekonfiguracji systemu sterowania. W związku z tym, w przypadku awarii, najważniejszymi aspektami, które należy wziąć pod uwagę jest efektywne wykorzystanie i zarządzanie redundancją (sprzętową, programową i komunikacyjną), stabilność, stopień zachowania wydajności w stanach statycznych i dynamicznych napędu.

Ogólną strukturę systemu AFTCS pokazano na rys. 5. W module detekcji FDD, każda awaria w systemie powinna być wykryta i izolowana, tak szybko, jak to możliwe, sygnały

wyjściowe, zmienne stanu systemu i modele matematyczne po stwierdzeniu wystąpienia awarii powinny być estymowane on-line w czasie rzeczywistym. Na podstawie informacji z modelu systemu po awarii, kontroler powinien być tak zaprojektowany, aby automatycznie uzyskać stabilność i pożądaną wydajność w stanie ustalonym i dynamicznym [31], [32], [33]. W celu pewniejszego śledzenia trajektorii referencyjnej dla systemu sterowanego w zamkniętej pętli sterowania w przypadku wystąpienia awarii, można wykorzystać regulatory ze sterowaniem wyprzedzającym (ang. *feedforward*). Aby uniknąć ewentualnego nasycenia regulatorów i pogorszenia wydajności po wystąpieniu uszkodzenia powinny być także automatycznie wprowadzane zmiany korygujące w sterowniku referencyjnym dotyczące zadawanej trajektorii [31], [32], [33].



Rys. 5. Ogólna struktura systemu AFTCS [31]–[33]

Na podstawie powyższej struktury i założeń projektowych można stwierdzić, że systemy AFTCS muszą posiadać taki układ FDD, który może zapewnić możliwie najdokładniejsze informacje o awarii (czas wystąpienia, typ itp.) oraz modelu matematycznym jaki należy użyć po stwierdzeniu wystąpienia uszkodzenia. Co więcej pozwoli na stworzenie nowego systemu sterowania poprzez rekonfigurację w celu skompensowania wpływu awarii w systemie, tak że możliwe będzie utrzymanie stabilności i akceptowalnej wydajności systemu w zamkniętej pętli sterowania. Ponadto należy podkreślić, że nie tylko parametry regulatorów muszą być przeliczone, ale również ich topologie.

W ostatnich 30 latach zostało opracowanych wiele metod FDD. Jednak większość badań w dziedzinie układów odpornych jest nadal poświęcona celom monitorowania i diagnostyki, a nie aplikacji sterujących. Stosunkowo nieznaczna część badań dotyczy tematyki FDD dla ogólnych zastosowań w AFTCS i metodologii projektowania systemów detekcji awarii w aktywnych układach odpornych na uszkodzenia.

Wstępne badania wykazały, że systemy oparte na estymatorach i obserwatorach stanu wykazują najlepsze właściwości przy wykrywaniu awarii, ponieważ są szybkie i w porównaniu do innych metod posiadają bardzo krótki czas opóźnienia w procesie podejmowania decyzji w czasie rzeczywistym [26], [28], [33]. Jednakże informacje z algorytmów opartych na estymatorach stanu mogą nie być wystarczająco dokładne do przeprowadzenia procesu rekonfiguracji systemu sterowania ze względu na drastyczne zmiany parametrów układu lub nawet modelu matematycznego procesu spowodowane wystąpieniem awarii. Dlatego pod tym względem bardziej pożądane mogą być systemy oparte na estymacji parametrów bądź połączeniu obu metod [26], [33].

Obecnie istnieją dwa ogólne podejścia brane pod uwagę przy projektowaniu systemów AFTC [1], [9], [12], [14], [16]. Pierwszym z nich jest stworzenie układu sterującego działającego w trybie off-line i posiadającego bank danych, a na podstawie decyzji diagnostycznych zostaje wybrany odpowiedni sposób rekonfiguracji systemu [1], [12], [16]. Drugim podejściem jest synteza nowego układu regulacji działającego w czasie rzeczywistym on-line [1], [9], [14], [16], [17], [18]. W uogólnieniu aktywne układy odporne:

- są w stanie prawidłowo zadziałać w wielu awaryjnych sytuacjach,
- mogą poradzić sobie w przypadkach nieprzewidzianych na etapie projektowania,
- są bardziej złożone i skomplikowane,
- stanowią problem w przypadku pracy w czasie rzeczywistym, ze względu na ograniczenia sprzętowe.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono charakterystykę metod stosowanych do wykrywania i izolacji uszkodzeń aparatury w układach sterowania. Zawarto analizę porównawczą pasywnych oraz aktywnych systemów odpornych na awarię. Rosnące zapotrzebowanie na poprawę wydajności i niezawodności spowodowało, że układy odporne na uszkodzenia stały się niezwykle ważne w nowoczesnych systemach sterowania. Aktywne układy FTC wykazują się większą elastycznością w sytuacjach awaryjnych, ale wymagają zwiększonej złożoności obliczeniowej. Konieczne są badania istniejących systemów diagnostycznych opartych na modelach matematycznych lub wiedzy ekspertów.

Wraz z postępem technologii pomiarowych i obliczeniowych, metody oparte na danych wykazują obiecujące wyniki w modelowaniu, optymalizacji, kontroli i diagnostyki. Jednakże największym problemem jest zmniejszenie złożoności obliczeniowej potrzebnej do uzyskania odpowiedniej niezawodności systemów sterowania.

LITERATURA

- [1] AFEF FEKIH, *Fault Diagnosis and Fault Tolerant Control Design for Aerospace Systems: A Bibliographical Review*, American Control Conference, 4–6.06.2014.
- [2] 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), 307–320.
- [3] 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.
- [4] BENITEZ-PEREZ H., GARCIA-NO CETTI F., THOMPSON H., *Fault classification SOM and PCA for inertial sensor drift*, IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing (IEEE Cat. No. 05EX1039), IEEE, Faro, Portugal, 2005, 177–182.
- [5] BERNIERI A., BETTA G., PIETROSANTO A., SANSONE C., *A neural network approach to instrument fault detection and isolation*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2005, 44(3), 747–750.
- [6] BETTA G., PIETROSANTO A., *Instrument fault detection and isolation: state of the art and new research trends*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2000, 49(1), 100–107.
- [7] BETTA G., D'APUZZO M., PIETROSANTA A., *A knowledge-based approach to instrument fault detection and isolation*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1995, 44(6), 1009–1016.
- [8] BETTA G., DELL'ISOLA M., LIGUORI C., PIETROSANTA 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.
- [9] BLANKE M., KINNAERT M., LUNZE J. et al., *Diagnosis and fault-tolerant control*, Springer-Verlag, 2003.
- [10] DYBKOWSKI M. *Estymacja prędkości kątowej w układach napędowych o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 67, Seria: Monografie Nr 20, Wrocław 2013.
- [11] 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), Vol. 7, IEEE, Portland, OR, USA, 2005, 5009–5014.
- [12] ISERMANN R., *Fault Diagnosis Systems*, An Introduction from Fault Detection to 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, 2012, Vol. 36, Iss. 1, 60–72.
- [14] KLIMKOWSKI K., DYBKOWSKI M., *Analiza wektorowego układu napędowego z silnikiem indukcyjnym odpornego na uszkodzenia wybranych czujników pomiarowych*, Poznań University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering, 2014, No. 77, 193–200.
- [15] KLIMKOWSKI K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M., *Speed Fault Tolerant Direct Torque Control of Induction Motor Drive*, Proc. of the 16th Int. Conf. Power Electronics and Motion Control PEMC 2014, Antalya, Turkey, 21–24.09.2014.
- [16] KOWALSKI C.T., *Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013.
- [17] KOWALSKI C.T., *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 57, Seria: Monografie, Nr 18, Wrocław 2005.
- [18] LI JIANG, *Sensor fault detection and isolation using system dynamics identification techniques*, PhD thesis, The University of Michigan, 2011.

- [19] ROMERO M.E., SERON M.M., De Dona, J.A. *Sensor fault-tolerant vector control of induction motors*, IET Control Theory Applications, 2010, Vol. 4, No. 9, 1707–1724.
- [20] MEHRANBOD N., SOROUSH M., PANJAPORNPNON C., *A method of sensor fault detection and identification*, Journal of Process Control, 2005, 15(3), 321–339.
- [21] MEHRANBOD N., SOROUSH M., PIOVOSO M., OGUNNAIKE B.A., *Probabilistic model for sensor fault detection and identification*, AIChE Journal, 2003, 49(7), 1787–1802.
- [22] 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.
- [23] ZHANG Y.X., *Artificial neural networks based on principal component analysis input selection for clinical pattern recognition analysis*, Talanta, 2007, 73(1), 68–75.
- [24] HSIEH C.-S., *Performance gain margins of the two-stage LQ reliable control*, Automatica, 2002, 38(11), 1985–1990.
- [25] JIANG J., ZHAO Q., *Design of reliable control systems possessing actuator redundancies*, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2000, 23(4), 709–718.
- [26] LIANG Y.-W., LIAW D.-C., LEE T.-C., *Reliable control of nonlinear systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(4), 706–710.
- [27] LIAO F., WANG J.L., YANG G.-H., *Reliable robust flight tracking control: An LMI approach*, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(1), 76–89.
- [28] YANG G.-H., ZHANG S.-Y., LAM J., WANG J. L., *Reliable control using redundant controllers*. IEEE Transactions on Automatic Control, 1998, 43(11), 1588–1593.
- [29] YANG G.-H., WANG J.L., SOH Y.C., *Reliable LQG control with sensor failures*, IEE Proceedings – Control Theory and Applications, 2000, 147(4), 433–439.
- [30] YANG Y., YANG G.-H., SOH Y.C., *Reliable control of discrete-time systems with actuator failure*, IEE Proceedings – Control Theory and Applications, 2001, 147(4), 428–432.
- [31] BLANKE M., IZADI-ZAMANABADI R., BOGH R., LUNAU Z.P., *Fault tolerant control systems – A holistic view*, Control Engineering Practice, 1997, 5(5), 693–702.
- [32] BLANKE M., FREI C., KRAUS F., PATTON R.J., STAROSWIECKI M., *What is fault-tolerant control?*, Proceedings of the 4th IFAC symposium on fault detection, supervision and safety for technical process, 2000, 40–51.
- [33] BLANKE M., KINNAERT M., LUNZE J., STAROSWIECKI M., *Diagnosis and fault-tolerant control*, 2nd ed., Springer, Berlin, Germany, 2006.
- [34] ZHANG Y., JIANG J., *Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems*, Annual Reviews in Control, 2008, 32, 229–252.

FAULT TOLERANT MOTOR DRIVES – REVIEW OF METHODS

In this paper the diagnostic methods used to detect failures in the drive systems with induction motors are described. Compensation techniques of electric motor drives components failures are presented. Advantages and disadvantages of commonly used methods are described. Additionally, diagnostic systems that can be successfully used in the studies of failures to the current and angular velocity sensors are described.