

Mateusz DYBKOWSKI*
Kamil KLIMKOWSKI*

UKŁAD NAPĘDOWY O ZWIĘKSZONYM STOPNIU BEZPIECZEŃSTWA Z KOMPENSATOREM NEURONOWO – ROZMYTYM

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania adaptacyjnego regulatora neuronowo rozmytego (ANFC – Adaptive Neuro-Fuzzy Controller) pracującego w charakterze kompensatora, w układzie bezpośredniego sterowania momentem elektromagnetycznym (DTC-SVM – Direct Torque Control) silnika indukcyjnego o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa. Wykonano badania ilustrujące wpływ połączenia układu adaptacyjnego z klasycznym regulatorem liniowym typu PI w torze regulacji prędkości kątowej na jakość pracy napędu podczas zmiany topologii sterowania, wywołanej uszkodzeniem czujnika prędkości kątowej. Badania wykonano w środowisku Sim Power System.

SŁOWA KLUCZOWE: DTC-SVM, silnik indukcyjny, kompensator, układ adaptacyjny, układ odporny na uszkodzenia, FTC

1. WPROWADZENIE

Układy napędowe z silnikami indukcyjnymi są układami o skomplikowanej wewnętrznej strukturze, które do prawidłowego działania potrzebują informacji o wielu zmiennych stanu [1]. Awaria czujników może w skrajnym wypadku doprowadzić do utraty stabilności lub uszkodzenia układu napędowego. W ostatnim czasie można zauważyć wzrost zainteresowania systemami o zwiększonym stopniu bezpieczeństwa – FTC (*ang. Fault Tolerant Control*) [6, 7, 10, 11].

Do podstawowych uszkodzeń napędów, występujących w przemyśle, zalicza się awarie silnika indukcyjnego, czujników pomiarowych oraz przemiennika częstotliwości. Awarie każdego z tych elementów prowadzą do powstania niekontrolowanych zjawisk w układzie napędowym. Konieczne jest więc wykrywanie uszkodzeń w możliwie wczesnej fazie ich występowania i przełączeniu systemu na układ redundantny (jeżeli istnieje taka możliwość) [6].

Jednym z najczęściej występujących uszkodzeń w układach napędowych z silnikami indukcyjnymi jest uszkodzenie czujnika prędkości kątowej (enkodera

* Politechnika Wroclawska.

inkrementalnego). Jego awaria, powoduje, że niemożliwa staje się praca napędu, który z samego założenia wymaga tej mechanicznej zmiennej stanu do prawidłowej pracy. W literaturze spotyka się różne podejścia do diagnostyki i kompensacji tego typu uszkodzeń [10]. Niezależnie jednak od rodzaju zastosowanej metody istotne jest aby w fazie zmiany topologii układu sterowania lub systemu pomiarowego przejście pomiędzy nimi było możliwie płynne i niezauważalne dla użytkownika [8, 10, 11].

W niniejszym artykule przedstawiono analizę układu napędowego sterowanego metodą wektorową DTC-SVM z kompensatorem neuronowo – rozmytym, podczas wystąpienia uszkodzenia inkrementalnego czujnika prędkości kątovej [8]. Skupiono się na zapewnieniu stabilnej pracy napędu w momencie zmiany topologii z układu „z pomiarem” na układ „bez pomiaru” prędkości kątovej (układ bezczujnikowy) [9]. Sprawdzono i porównano możliwości pracy takiego napędu z klasycznym regulatorem PI oraz z Adaptacyjnym Regulatorem Neuronowo – Rozmytym (*ang. Adaptive Neuro Fuzzy Controller – ANFC*) pełniącym rolę kompensatora w torze regulacji prędkości kątovej. Wykonano badania symulacyjne w środowisku Sim Power System.

2. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU NAPĘDOWEGO Z KOMPENSATOREM NEURONOWO - ROZMYTYM

Schemat ideowy struktury DTC-SVM, którą wykorzystano do badań w niniejszej pracy, przedstawiono na Rys. 1 [8]. Składowe strumienia stojana, niezbędne do prawidłowej pracy układu DTC-SVM można wyznaczyć z zależności:

$$\Psi_s^e = \frac{x_m}{x_r} \Psi_r^e + x_s \sigma \mathbf{i}_s \quad (1)$$

Do wyznaczenia składowych strumienia wirnika wykorzystano model prądowy silnika indukcyjnego:

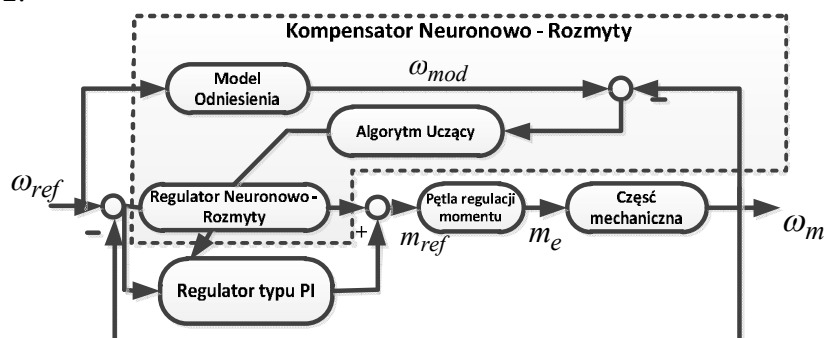
$$\frac{d}{dt} \Psi_r^i = \left[\frac{r_r}{x_r} (x_m \mathbf{i}_s - \Psi_r^i) + j \omega_m^e \Psi_r^i \right] \frac{1}{T_N} \quad (2)$$

Do pomiaru prędkości kątovej wykorzystano enkoder inkrementalny o rozdzielczości 5000 *imp./obr.*

W estymatorze prędkości MRAS^{CC}, który wykorzystano w układzie jako układ redundantny, wartości składowych wektora strumienia wirnika obliczane są na podstawie modelu prądowego (2) (stąd oznaczenie C – *ang. current*), natomiast równanie estymatora prądu stojana wynika z przekształcenia równań opisujących silnik indukcyjny [8]:

dodatkowo wstępnie nastrojonego regulatora PI uzyskuje się zapewnienie stabilnej pracy napędu w początkowej fazie jego pracy.

Schemat ideowy struktury sterowania kaskadowego z klasycznym regulatorem PI oraz z kompensatorem neuronowo – rozmytym przedstawiono na Rys. 2.

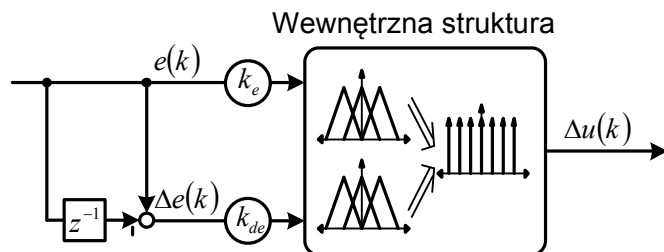


Rys. 2. Schemat ideowy układu napędowego z kompensatorem neuronowo – rozmytym

Wykorzystanie regulatora ANFC jako kompensatora neuronowo rozmytego nie zapewnia tak szybkiego procesu adaptacji jak ma to miejsce w przypadku wykorzystania go jako podstawowego układu [4], jednak zapewnienia stabilność napędu podczas różnych warunków pracy, w tym także przy rozruchu dla zerowych wag początkowych.

W niniejszej pracy założono, że dominującym układem jest regulator PI z ograniczeniami sygnałów wyjściowych o dobranych nastawach K_p i T_i . Regulator adaptacyjny zapewnia poprawę działania systemu w dłuższym przedziale czasowym.

Schemat ideowy zastosowanego Regulatora Neuronowo - Rozmytego przedstawiono na Rys. 3. Widoczne są relacje między błędem regulacji prędkości kątowej $e(k)$, jego zmianą $\Delta e(k)$ i sygnałem sterującym $\Delta u(k)$. Układ ten jest regulatorem typu PD, jeżeli integrator wyjściowy zostanie pominięty (Rys. 4) (taki układ poddany był analizie w niniejszej pracy) [2, 3, 4, 5].



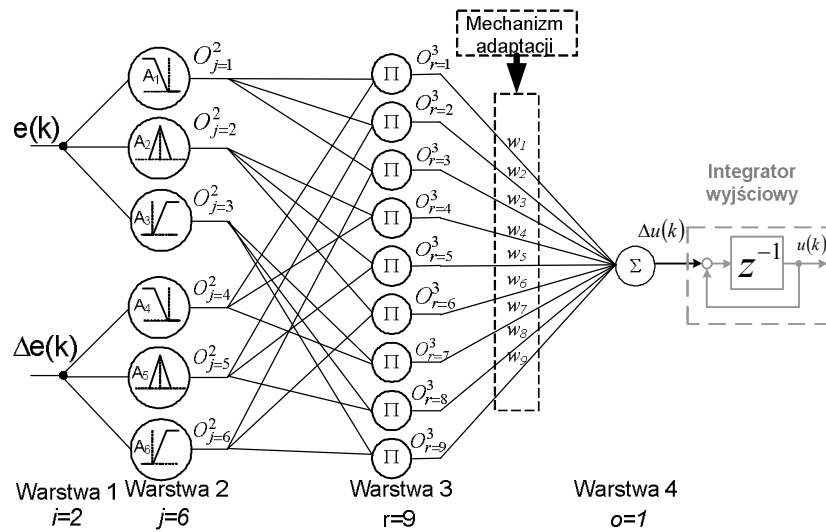
Rys. 3. Schemat regulatora typu PD lub ślizgowego regulatora rozmytego [4]

Powierzchnię przełączania w regulatorze ślizgowym można obliczyć na podstawie właściwości bazy reguł, które opisują związek między błędem (e) a jego zmianą. Podobnie jak dla klasycznego regulatora, powierzchnia przełączania może być opisana za pomocą zależności [2]:

$$s^* = \lambda^* e^* + \Delta e^* \tag{5}$$

gdzie λ przedstawia nachylenie funkcji przełączającej $\lambda^* e^* + \Delta e^* = 0$.

Adaptacyjny regulator rozmyty można przedstawić jak na Rys. 4.



Rys. 4. Struktura wewnętrzna regulatora rozmytego (PD, jeśli integrator wyjściowy jest pominięty, PI jeśli integrator jest wykorzystywany)

Baza reguł regulatora rozmytego opiera się na kilku zasadach opisanych warunkami IF-THEN:

$$R_j : \text{IF } x_1 \text{ is } A_r^j \text{ and } x_2 \text{ is } A_s^j \text{ THEN } y = w_i \tag{6}$$

gdzie x_i – zmienna wejściowa, A_r^j – wejściowa funkcja przynależności, w_i – waga wyjściowa [2].

Regulator startuje z wagami zerowymi i jest dostrajany na podstawie błędu odtworzenia prędkości kątowej [2], [8]. Model odniesienia wykorzystywany w analizowanej strukturze sterowania może być opisany zależnością:

$$G_m(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{7}$$

gdzie ζ – współczynnik tłumienia, ω_n – częstotliwość rezonansowa.

Mechanizm adaptacji poszczególnych wag Regulatora Neuronowo - Rozmytego w warstwie wyjściowej opisano w sposób szczegółowy w pracy [4].

3. ANALIZA PRACY UKŁADU NAPĘDOWEGO Z KOMPENSATOREM NEURONOWO – ROZMYTYM PODCZAS ZMIANY TOPOLOGII STEROWANIA

W przypadku inkrementalnego czujnika prędkości kątowej możliwe są do wystąpienia cztery typy uszkodzeń, przedstawione na Rys. 5 [10, 11].



Rys. 5. Rodzaje uszkodzeń czujników prędkości

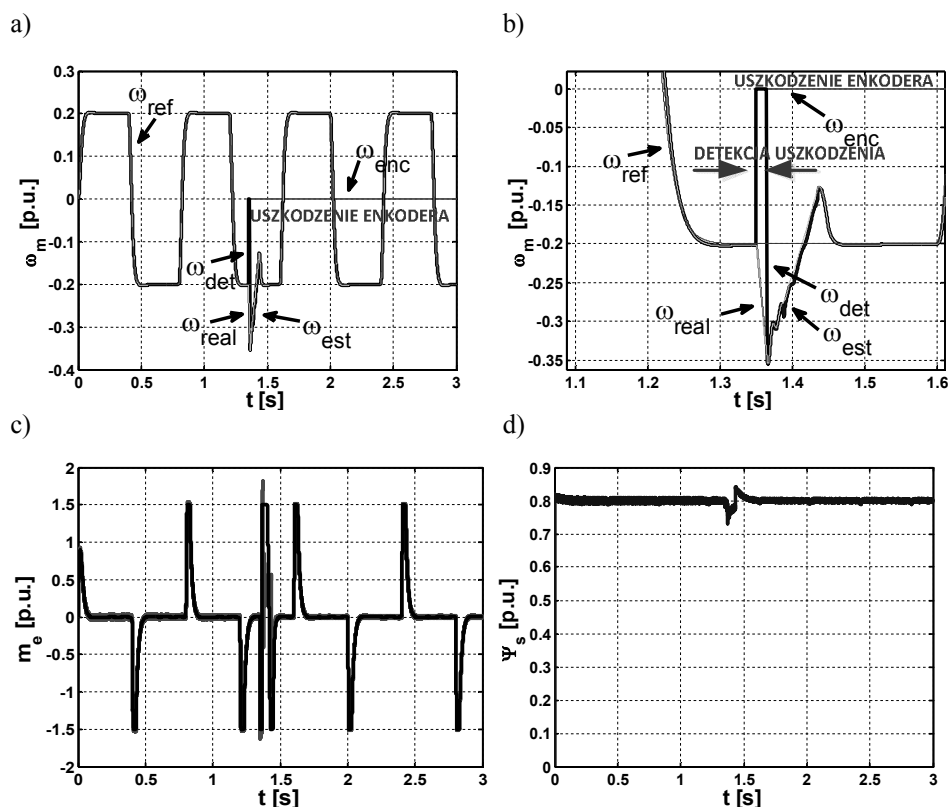
Najprostszym sposobem detekcji awarii w układach napędowych jest wykorzystanie zmiennych stanu z wewnętrznej pętli sterowania. W niniejszej pracy wykorzystano algorytm opisany w pracach [10, 11].

Analizie poddano zachowanie się układu sterowanego metodą DTC-SVM podczas zmiany topologii sterowania (z układu z pomiarem prędkości na system bezczujnikowy) wywołanej detekcją jednego z opisanych uszkodzeń czujnika prędkości kątowej. Sprawdzono działanie napędu z klasycznym regulatorem typu PI (w celach porównawczych) oraz z układem zawierającym kompensator neuronowo rozmyty ANFC.

W celu możliwości oceny jakości adaptacji kompensatora ANFC do zmiennych warunków pracy, w pierwszej kolejności sprawdzono odpowiedź klasycznego układu DTC-SVM (z regulatorem liniowym typu PI) na zmianę w nadrzędnym torze regulacji z sygnału mierzonego na sygnał estymowany za pomocą estymatora MRAS. Wyniki tej analizy przedstawiono na Rys. 6.

Na początku napęd pracuje w układzie sterowania z pomiarem prędkości kątowej. Wartość strumienia stojana wyznaczana jest na podstawie modelu prądowego silnika indukcyjnego (1), (2). Po chwili $t = 1,3$ s następuje awaria czujnika prędkości kątowej (całkowite przerwanie pętli sprzężenia od tej zmiennej stanu) oraz jego detekcja (po upływie $10ms$). Napęd przełączony zostaje w tryb pracy bezczujnikowej z estymatorem MRAS^{CC} [8]. W momencie przejścia na tryb pracy bezczujnikowej następuje stosunkowo duży uchyb pomiędzy prędkością rzeczywistą (w tym także estymowaną) a wartością

zadaną. Parametry regulatora PI dobrane były dla układu z pomiarem prędkości, które przy zmianie topologii układu sterowania nie pozwalają na szybszą reakcję napędu. W czasie pracy napędu błąd estymacji prędkości jest bliski zeru.

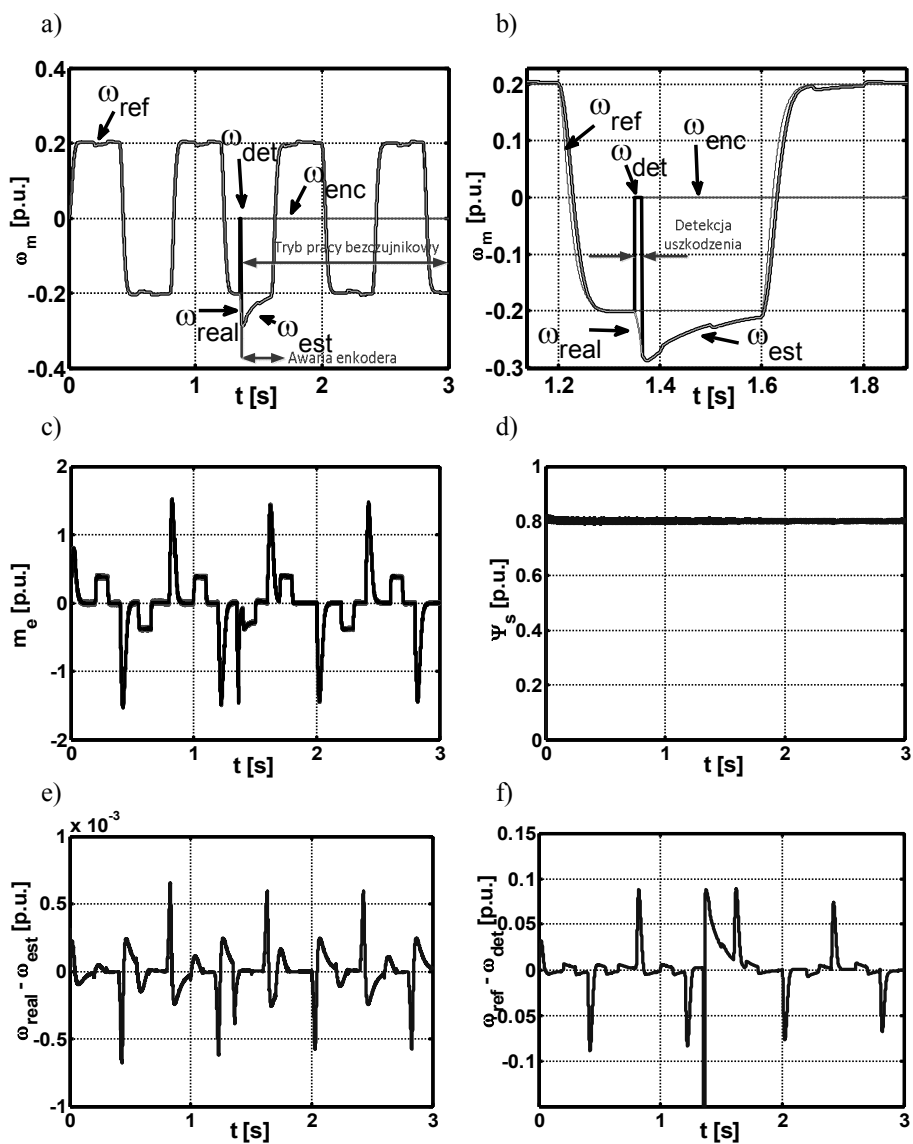


Rys. 6. Przebiegi prędkości (a, b), momentu elektromagnetycznego (c), modułu strumienia stojana (d) podczas zmiany struktury sterowania wywołanej uszkodzeniem czujnika prędkości kątowej ($t = 1,3$ s); układ z klasycznym regulatorem PI

W kolejnej części pracy przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych układu napędowego sterowanego metodą DTC-SVM odpornego na uszkodzenia czujnika prędkości kątowej z adaptacyjnym regulatorem neuronowo – rozmytym pracującym jako kompensator w torze regulacji prędkości kątowej. Na podstawie wcześniejszych badań zdecydowano się wykorzystać układ typu PD, zwany regulatorem ślizgowym [4, 5].

Na Rys. 7 przedstawiono wyniki badań dla trajektorii zmian prędkości kątowej jak dla struktury z regulatorem typu PI. Wagi początkowe regulatora (kompensatora) były ustawione na zero. Nastawy regulatora PI pozostały na niezmiennym poziomie.

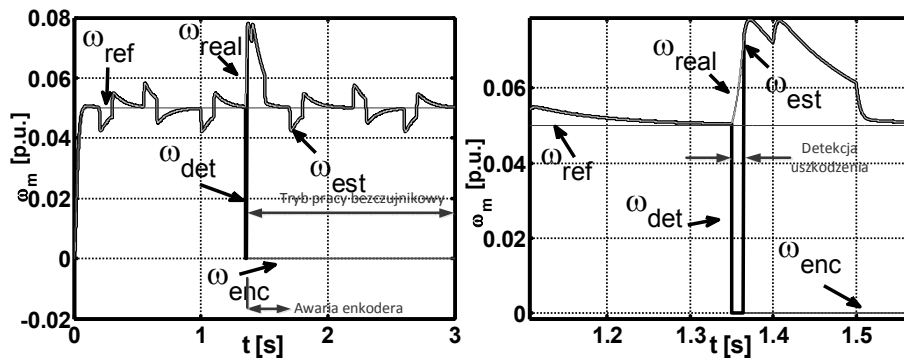
Przedstawiono przebiegi prędkości mierzonej, zadanej, estymowanej i rzeczywistej (z modelu silnika) oraz odpowiadające im przebiegi błędów.



Rys. 7. Przebiegi prędkości (a, b), momentu elektromagnetycznego (c), modułu strumienia stojana (d) oraz błędy prędkości (e, f) podczas zmiany struktury sterowania wywołanej uszkodzeniem czujnika prędkości kątowej ($t = 1, 3$ s); układ z kompensatorem ANFC

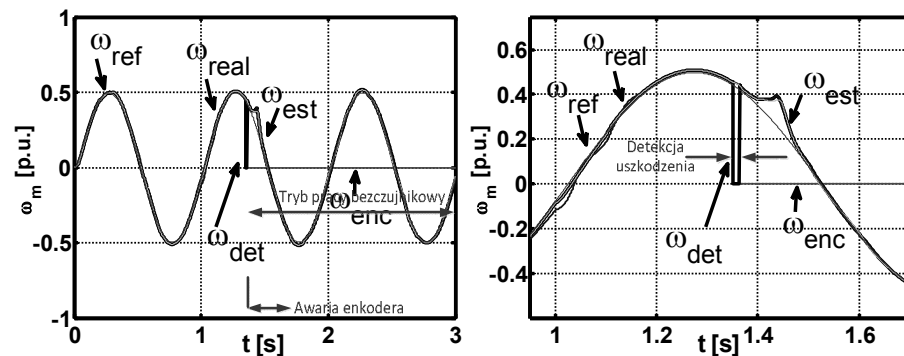
Widoczne jest, że spadek prędkości wywołany uszkodzeniem czujnika jest zdecydowanie mniejszy niż miało to miejsce w układzie z klasycznym liniowym regulatorem typu PI. Wykorzystanie układu adaptacyjnego powoduje lepsze dopasowanie się układu do aktualnych warunków pracy.

Na kolejnym przebiegu przedstawiono analizę układu pracującego w otoczeniu niskich prędkości kątowych (5% wartości znamionowej). W chwili uszkodzenia enkodera prędkość wzrasta, co spowodowane jest wystawieniem dużego momentu na wyjściu regulatora PI oraz kompensatora. Po krótkim czasie prędkość estymowana pokrywa się z wartością zadaną i rzeczywistą.



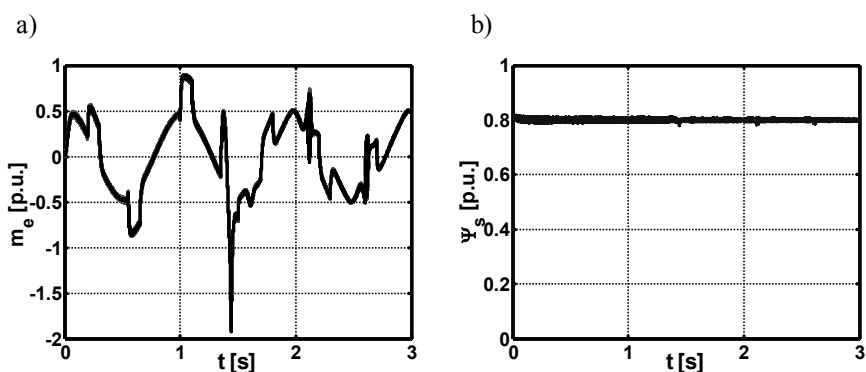
Rys. 8. Przebiegi prędkości podczas zmiany struktury sterowania wywołanej uszkodzeniem czujnika prędkości kątowej ($t = 1,3$ s), $\omega_m = 0,05\omega_{mN}$; układ z kompensatorem ANFC

Napęd pracuje stabilnie w szerokim zakresie zmian prędkości kątowej ze skokowo zmiennym momentem obciążenia. Na Rys. 9 przedstawiono pracę układu przy wymuszeniu sinusoidalnym o stosunkowo małej częstotliwości. Test ma celu zilustrowanie pracy napędu oraz jakości estymacji prędkości i strumienia podczas stosunkowo długiego przejścia przez wartość zero.



Rys. 9. Przebiegi prędkości podczas zmiany struktury sterowania wywołanej uszkodzeniem czujnika prędkości kątowej ($t = 1,3$ s), $\omega_m = 0,5\omega_{mN}$; układ z kompensatorem ANFC

Widoczne jest, że układ pracuje w sposób prawidłowy. Zmiana topologii sterowania, występująca podczas procesu hamowania, nie powoduje pogorszenia pracy napędu. W chwili zmiany struktury sterowania widoczny jest impuls momentu elektromagnetycznego (Rys. 10) o stosunkowo dużej amplitudzie. Wynika on z faktu, że uszkodzenie występuje w fazie hamowania. Strumień stojana utrzymywany jest na stałej (znamionowej) wartości.



Rys. 10. Przebiegi momentu elektromagnetycznego (a), modułu strumienia stojana (b) podczas zmiany struktury sterowania wywołanej uszkodzeniem czujnika prędkości kątowej ($t = 1, 3$ s), $\omega_m = 0.5\omega_{mN}$; układ z kompensatorem ANFC

4. WNIOSKI

Celem pracy było opracowanie układu wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym z adaptacyjnym kompensatorem neuronowo – rozmytym (ANFC) w torze regulacji prędkości kątowej, odpornego na uszkodzenia czujnika prędkości kątowej. Wykazano, że zastosowanie tego typu rozwiązania poprawia pracę napędu podczas zmiany jego topologii na bezczujnikową wywołaną uszkodzeniem czujnika prędkości.

Stwierdzono, że czas detekcji ma istotny wpływ na wartość przeregulowania prędkości kątowej. W pracy zdecydowano się wykorzystać detektor o stosunkowo długim czasie działania (10ms) jednak możliwe jest opracowanie detektora, cechującego się zdecydowanie krótszym czasem działania, a tym samym zmniejszenie skutków zmiany topologii struktury sterowania.

LITERATURA

- [1] Szabat K., Orłowska-Kowalska T., "Vibration Suppression in Two-Mass Drive System using PI Speed Controller and Additional Feedbacks – Comparative Study", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 54, no. 2, pp. 1193-1206, 2007.

- [2] Orłowska-Kowalska T., Szabat K., “Control of the Drive System with Stiff and Elastic Couplings Using Adaptive Neuro-Fuzzy Approach“, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 54, no.1, pp. 228-240, 2007.
- [3] Yager R. R., Filev D. P., “Essentials of Fuzzy Modeling and Control“, Wiley, 1994.
- [4] Orłowska-Kowalska T., Dybkowski M., Szabat K., “Adaptive neuro-fuzzy control of the sensorless induction motor drive system“, 12th International Power Electronics and Motion Control Conference. EPE-PEMC 2006 pp. 1836-1841.
- [5] Orłowska-Kowalska T., Szabat K., Dybkowski M., “Neuro-Fuzzy Adaptive Control of the IM Drive with Elastic Coupling“, EPE – PEMC 2008, Poznań, Poland, on CD.
- [6] Benbouzid M.E.H., Diallod D., Zeraouia M., “Advanced fault-tolerant control of induction motor drives for EV/HEV traction applications, from conventional to modern and intelligent techniques“, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56, 519–528.
- [7] Campos-Delgado D.U., Espinoza-Trejo D.R., Palacios E., “Fault-tolerant control in variable speed drives, a survey“, Electric Power Applications IET, 2008, 2 (2), 121–134.
- [8] 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.
- [9] Orłowska-Kowalska T., “Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi“, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [10] Klimkowski K., Dybkowski M., “An influence of the chosen sensors faults to the performance of induction motor drive system working in vector control method“, Poznań University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering No. 77, pp 185-192, 2014 (in Polish).
- [11] Klimkowski K., Dybkowski M., “An analysis of the chosen sensors fault tolerant induction motor drive“, Poznań University of Technology, Academic Journals, Electrical Engineering No. 77, pp 193-200, 2014 (in Polish).

FAULT TOLERANT DRIVE SYSTEM WITH ADAPTIVE NEURO – FUZZY COMPENSATOR

In the paper the fault tolerant drive system with adaptive neuro – fuzzy compensator (ANFC) is presented. The Direct Torque Control algorithm was applied and tested during the faulted conditions. Simulation results of the vector controlled induction motor drive with PI controller and ANFC during the topology changing is presented. To the flux and rotor speed reconstruction MRAS type estimator is used. Simulation results are performed in Sim Power System.