

estymacja, filtr Kalmana, układ dwumasowy, tłumienie drgań

Krzysztof DRÓŻDŹ*

PORÓWNANIE JAKOŚCI ESTYMACJI ZMIENNYCH STANU I PARAMETRU UKŁADU DWUMASOWEGO PRZEZ ROZMYTE FILTRY KALMANA O STATYCZNEJ I DYNAMICZNEJ ADAPTACJI WYBRANEGO WSPÓLCZYNNIKA

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z porównaniem jakości estymacji zmiennych stanu i parametru układu dwumasowego przez rozmyte filtry Kalmana o statycznej i dynamicznej adaptacji współczynnika q_{55} macierzy kowariancji zakłóceń zmiennych stanu \mathbf{Q} . W badaniach wykorzystano strukturę sterowania adaptacyjnego z dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi od momentu skrętnego i różnicy prędkości oraz pomocniczym sprzężeniem zwrotnym od momentu obciążenia. Obserwatory oparte na teorii filtru Kalmana testowano symulacyjnie w zamkniętej strukturze regulacji. W celu uzyskania statycznej i dynamicznej adaptacji zastosowano zaprojektowane systemy rozmyte. Proces statycznej adaptacji współczynnika q_{55} bazował na aktualnej estymowanej wartości stałej czasowej maszyny roboczej T_{2e} . W przypadku dynamicznej adaptacji rozszerzono wejścia systemu rozmytego o przetworzony sygnał modułu różnicy pomiędzy momentem elektromagnetycznym i estymowanym momentem skrętnym. Sygnał ten niesie informację o aktualnym stanie sterowanego obiektu (statyczny lub dynamiczny). Wyniki badań wskazują na prawidłową pracę struktury sterowania w przypadku zastosowania obu rodzajów adaptacji wybranego współczynnika.

1. WPROWADZENIE

Jednym z głównych kierunków badań związanych z napędami elektrycznymi jest estymacja ich trudnodostępnych zmiennych stanu i wartości parametrów [1]–[3], [6]–[9], [11], [12], [16]. W wielu przypadkach instalacja czujników pomiarowych jest niemożliwa lub trudna do wykonania ze względu na brak przestrzeni, zwiększenie kosztu, wyższe ryzyko wystąpienia uszkodzeń bardziej złożonego układu czy brak

* Instytut Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: krzysztof.drozdz@pwr.wroc.pl

praktycznej możliwości realizacji pomiaru, co występuje np. w przypadku momentu obciążenia [14]. W układach napędowych z połączeniem sprzężystym za trudnodostępne zmienne stanu uważa się następujące wielkości: prędkość maszyny roboczej, moment skrętny i moment obciążenia. Do precyzyjnego sterowania prędkością tego typu układów napędowych konieczna jest również znajomość wartości jego parametrów. W tym celu są one uprzednio identyfikowane. Parametry związane z momentem bezwładności silnika napędowego i sprężystością wału nie zmieniają swoich wartości w czasie pracy układu, jednak moment bezwładności maszyny roboczej bardzo często zmienia się w szerokich zakresach. Taki układ określa się niestacjonarnym. Zmiany tej wartości powinny być uwzględnione w sterowaniu rozpatrywanego napędu, ze względu na możliwość wzbudzania drgań skrętnych lub utraty stabilności struktury regulacji [14]. W takim przypadku stosuje się jedną z zaawansowanych struktur sterowania, bazującą na metodach sterowania odpornego, nieliniowego lub adaptacyjnego [10].

W niniejszym artykule wykorzystano metodę pośredniego sterowania adaptacyjnego realizowaną przez zastosowanie struktury regulacji o dwóch dodatkowych sprzężeniach zwrotnych: od momentu skrętnego i różnicy prędkości oraz pomocniczym sprzężeniu zwrotnym od momentu obciążenia. Pozostałe rodzaje sterowania adaptacyjnego omówiono w [14]. W celu uzyskania estymacji niedostępnych zmiennych stanu i wartości zmiennego w czasie parametru T_2 (stałej czasowej maszyny roboczej), w zastosowanej strukturze sterowania adaptacyjnego wykorzystano algorytm rozmytego filtru Kalmana (RFK) o dwóch sposobach adaptacji współczynnika q_{55} macierzy kowariancji zakłóceń zmiennych stanu \mathbf{Q} . Wspomniana adaptacja realizowana jest w trybie *on-line* dla obu algorytmów. W przypadku występowania zmienności momentu bezwładności maszyny roboczej w dużym zakresie i wykorzystania klasycznego algorytmu nieliniowego rozszerzonego filtru Kalmana (NRFK) pojawiają się znaczące wartości błędów estymacji, w szczególności parametru T_2 i momentu obciążenia, które mogą być powodem wzbudzania drgań skrętnych lub utraty stabilności. Badania porównawcze klasycznego algorytmu i rozmytego filtru Kalmana o statycznej adaptacji przedstawiono w [4]. Sposób adaptacji wybranych współczynników filtru Kalmana ma wpływ na uzyskaną jakość estymacji poszczególnych wielkości, co przedstawiono w niniejszej pracy. W przypadku zastosowania statycznej adaptacji wartość wybranych współczynników dobierana jest za pomocą zaprojektowanego systemu rozmytego na podstawie aktualnej estymowanej wartości parametru T_2 . Adaptacja dynamiczna charakteryzuje się rozszerzeniem wcześniejszego podejścia o zastosowanie sygnału modułu różnicy pomiędzy momentem elektromagnetycznym i estymowanym momentem skrętnym. Sygnał ten niesie informację o aktualnym stanie sterowanego obiektu. W przypadku występowania jego wartości niższej niż ustalony przez projektanta próg, rozpoznawany jest stan statyczny układu napędowego. W momencie przekroczenia wartości progowej identyfikowany jest stan

dynamiczny. Odpowiednio do danego stanu dobierane są wartości wybranych współczynników filtru Kalmana.

Praca składa się z pięciu części. Po wprowadzeniu przedstawiono model matematyczny obiektu badań i wybraną strukturę sterowania adaptacyjnego. Następnie omówiono rozmyte filtry Kalmana o statycznej i dynamicznej adaptacji współczynnika q_{55} macierzy \mathbf{Q} , gdzie zaprezentowano struktury zaprojektowanych systemów rozmytych wprowadzających wspomnianą adaptację. W punkcie czwartym przedstawiono wybrane wyniki badań poszczególnych rozwiązań oraz przeprowadzono analizę porównawczą jakości estymacji obu algorytmów. Pracę zakończono podsumowaniem.

2. MODEL MATEMATYCZNY OBIEKTU BADAŃ I STRUKTURA STEROWANIA

W niniejszej pracy obiektem badań jest układ napędowy z połączeniem sprzężystym, który można opisać następującym równaniem stanu w jednostkach względnych [15]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ m_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{T_1} \\ 0 & 0 & \frac{-1}{T_2} \\ \frac{1}{T_c} & \frac{-1}{T_c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ m_s(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} [m_e] + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{-1}{T_2} \\ 0 \end{bmatrix} [m_L], \quad (1)$$

gdzie: ω_1 – prędkość silnika, ω_2 – prędkość maszyny roboczej, m_s – moment skrotny, m_L – moment obciążenia, T_1 – mechaniczna stała czasowa silnika, T_2 – mechaniczna stała czasowa maszyny roboczej, T_c – stała sprężystości. Znamionowe wartości parametrów rozważanego układu są następujące: $T_{1N} = T_{2N} = 203$ ms, $T_{cN} = 1,2$ ms.

Rysunek 1 przedstawia zastosowaną adaptacyjną strukturę sterowania z regulatorem PI, dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi od momentu skrotnego (k_1) i różnicy prędkości (k_2) oraz dodatkowym pomocniczym sprzężeniem zwrotnym od momentu obciążenia (k_{L1}). Współczynniki omawianej struktury sterowania przestrajane są w trybie *on-line* na podstawie aktualnej estymowanej wartości parametru T_2 według poniższych zależności [14],[13]:

$$K_I = \omega_r^4 T_1 T_2 T_c, \quad (2)$$

$$K_p = 4 \xi_z \omega_r^3 T_1 T_2 T_c, \quad (3)$$

$$k_2 = \frac{1}{\omega_r^3 T_2 T_c} - 1, \quad (4)$$

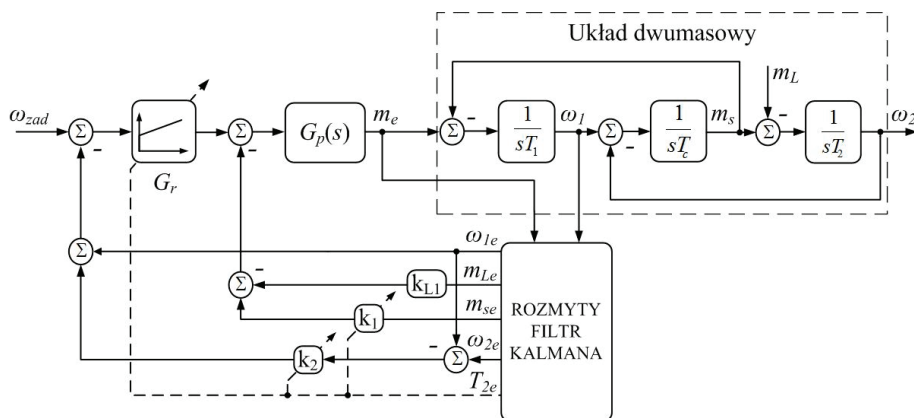
$$k_1 = \frac{T_1(4\xi_z^2 - k_2)}{T_2(1 + k_2)} - 1, \quad (5)$$

$$k_{L1} = T_c K_I(1 + k_2) + 1 + k_1, \quad (6)$$

gdzie: ω_r – zadana pulsacja rezonansowa, ξ_z – zadany współczynnik tłumienia. W badaniach założono następujące wartości pulsacji rezonansowej oraz współczynnika tłumienia: $\omega_r = 40 \text{ s}^{-1}$, $\xi_z = 0,7$. Przyjęto następującą transmitancję pętli wymuszenia momentu elektromagnetycznego:

$$G_p(s) = \frac{1}{0,002s + 1}. \quad (7)$$

Założono zmienność parametru T_2 w zakresie od T_{2N} do $4T_{2N}$.



Rys. 1. Adaptacyjna struktura sterowania

3. ROZMYTE FILTRY KALMANA

Podstawą do utworzenia rozmytych filtrów Kalmana jest algorytm nieliniowego rozszerzonego filtra Kalmana, opisany w [5]. Optymalizację współczynników macierzy \mathbf{Q} i \mathbf{R} tego algorytmu przeprowadzono za pomocą algorytmu genetycznego zgodnie z poniższą funkcją celu:

$$F_1 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n |\omega_{i1} - \omega_{i1e}| \right) + \left(\sum_{i=1}^n |\omega_{i2} - \omega_{i2e}| \right) + \left(\sum_{i=1}^n |m_{is} - m_{ise}| \right) + \left(\sum_{i=1}^n |m_{iL} - m_{iLe}| \right) + \left(\sum_{i=1}^n |T_{i2} - T_{i2e}| \right)}{n}, \quad (8)$$

gdzie: x_e – wielkości estymowane, n – liczba próbek. Otrzymane wartości współczynników zestawiono w tabeli 1. Macierze te zdefiniowano w następujący sposób:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{55} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = [r]. \quad (9)$$

Tabela 1. Zestawienie wartości elementów macierzy Q i R

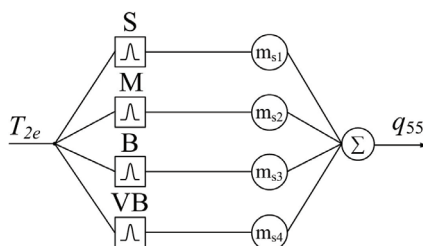
q_{11}	q_{22}	q_{33}	q_{44}	q_{55}	r
0,045	0,002	0,358	16,431	25,484	7,108

Rozmyte filtry Kalmana utworzone zostały poprzez wprowadzenie logiki rozmytej w celu uzyskania adaptacji wybranych współczynników nieliniowego rozszerzonego filtru Kalmana. Systemy rozmyte realizujące wspomnianą adaptację przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Rysunek 2 obrazuje strukturę systemu rozmytego wprowadzającego statyczną adaptację współczynnika q_{55} , natomiast rysunek 3 systemu wprowadzającego dynamiczną adaptację tego współczynnika. Statyczna adaptacja bazuje na sygnale aktualnej estymowanej wartości parametru T_2 . W przypadku dynamicznej adaptacji zastosowano rozszerzenie wektora wejściowego systemu rozmytego o moduł różnicy pomiędzy momentem elektromagnetycznym i estymowanym momentem skrętnym. Sygnał ten niesie informację o aktualnym stanie sterowanego obiektu. W przypadku wartości nieprzekraczającej ustalonego przez projektanta progu rozpoznawany jest stan statyczny. W przeciwnym przypadku system rozmyty rozpoznaje stan dynamiczny układu napędowego. Następnie zgodnie z wartością stałej czasowej maszyny roboczej i z danym stanem napędu przestrajany jest współczynnik q_{55} . Wartość wspomnianego progu determinowana jest występującymi w układzie zakłóceniami i pozwala na eliminację ich wpływu na rozpoznanie danego stanu napędu. Zastosowanie takiego rozwiązania pozwala na zwiększenie dynamiki obserwatora w stanach dynamicznych sterowanego obiektu, co umożliwi szybszą estymację wartości parametru T_2 oraz zmniejszenie błędów estymacji momentu obciążenia. Wartości singletonów obu systemów dobrano za pomocą algorytmu genetycznego minimalizującego poniższą funkcję celu:

$$F_2 = \frac{a + 1E - 3 \left(\sum_{i=1}^n \frac{|T_{i2e} - T_{(i-1)2e}|}{T_s} \right)}{n} \quad (10)$$

$$a = \left(\sum_{i=1}^n \omega_{i1} - \omega_{i1e} \right) + \left(\sum_{i=1}^n \omega_{i2} - \omega_{i2e} \right) + \left(\sum_{i=1}^n m_{is} - m_{ise} \right) + \left(\sum_{i=1}^n m_{iL} - m_{iLe} \right) + \left(\sum_{i=1}^n T_{i2} - T_{i2e} \right),$$

gdzie: $T_s = 0,0005$ s – okres próbkowania. Powyższa funkcja celu została rozszerzona o pochodną sygnału T_{2e} ze względu na konieczność ograniczenia dynamiki estymacji tego parametru przez rozmyte filtry Kalmana. Otrzymane wartości poszczególnych singletonów zestawiono kolejno w tabeli 2 – dla systemu rozmytego wprowadzającego statyczną adaptację i w tabeli 3 – dla systemu rozmytego wprowadzającego dynamiczną adaptację. Zastosowane funkcje przynależności zmiennych wejściowych zaprezentowano w analogicznej kolejności na rysunkach 4 i 5.



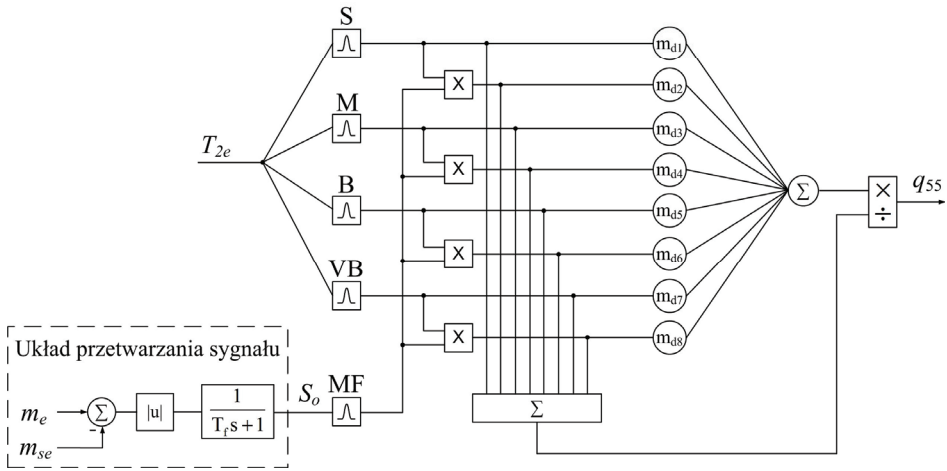
Rys. 2. Struktura systemu rozmytego wprowadzającego statyczną adaptację współczynnika q_{55}

Tabela 2. Zestawienie wartości singletonów systemu rozmytego wprowadzającego statyczną adaptację

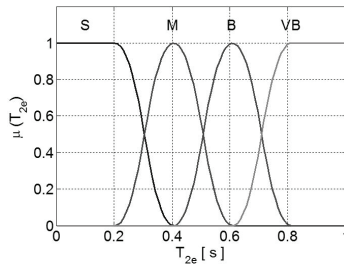
m_{s1}	m_{s2}	m_{s3}	m_{s4}
698,141	93,469	53,718	10,739

Tabela 3. Zestawienie wartości singletonów systemu rozmytego wprowadzającego dynamiczną adaptację

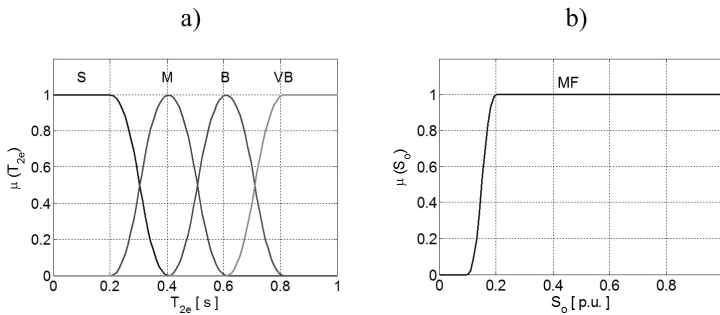
m_{d1}	m_{d2}	m_{d3}	m_{d4}
302,016	1526,484	415,984	1922,484
m_{d5}	m_{d6}	m_{d7}	m_{d8}
63,984	312,547	9,557	40,695



Rys. 3. Struktura systemu rozmytego wprowadzającego dynamiczną adaptację współczynnika q_{55}



Rys. 4. Funkcje przynależności zmiennej wejściowej T_{2e} systemu rozmytego wprowadzającego statyczną adaptację współczynnika q_{55}



Rys. 5. Funkcje przynależności zmiennych wejściowych T_{2e} (a) i S_0 (b) systemu rozmytego wprowadzającego dynamiczną adaptację współczynnika q_{55}

4. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

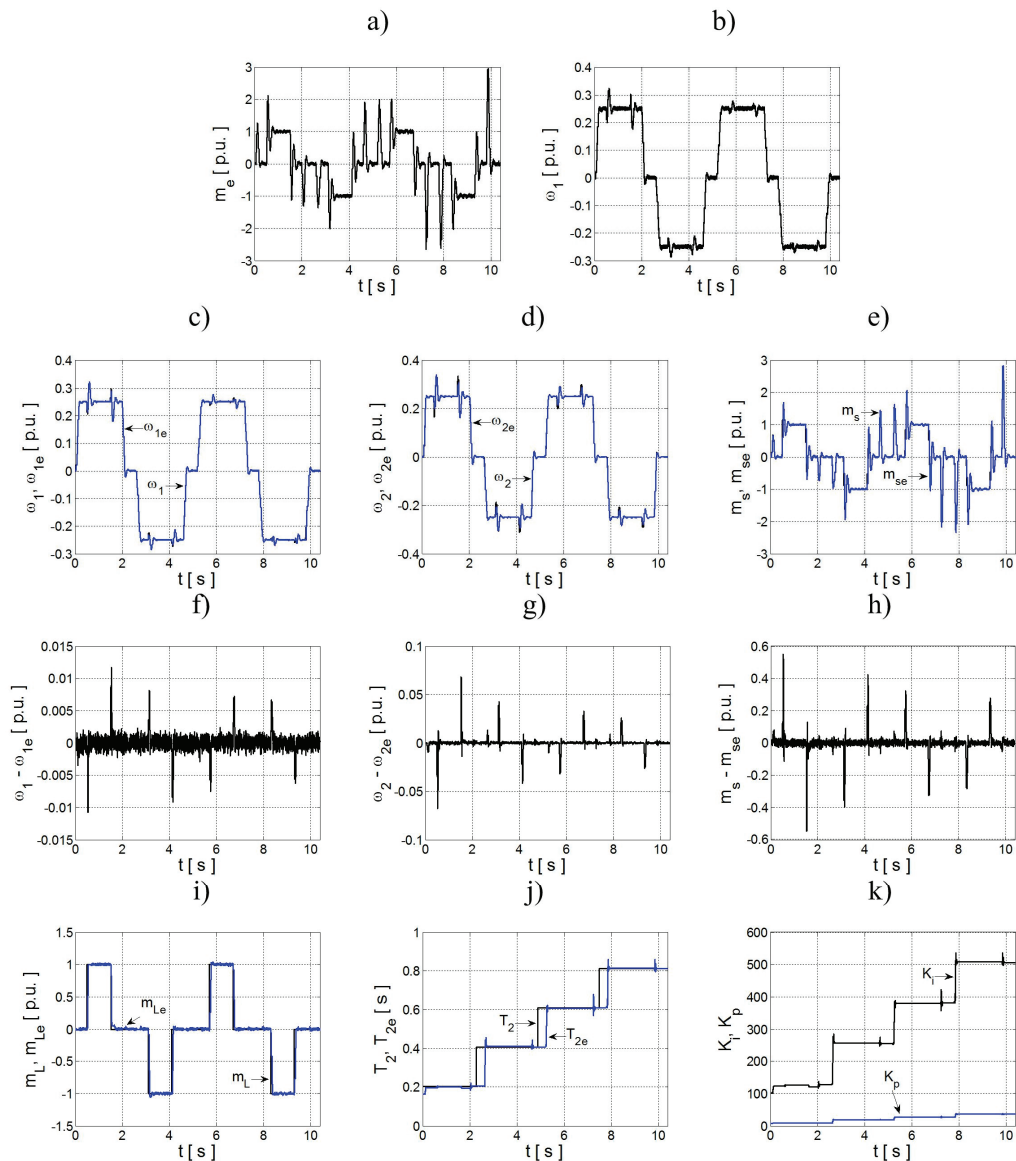
Badania symulacyjne klasycznego algorytmu nieliniowego rozszerzonego filtru Kalmana pracującego w zamkniętej strukturze sterowania adaptacyjnego układu dwumasowego wykazały duże wartości błędów estymacji, w szczególności w przypadku przebiegów estymat momentu obciążenia i stałej czasowej maszyny roboczej. Fakt ten może być przyczyną wzbudzenia drgań skrętnych lub utraty stabilności struktury regulacji. Wadę tą wyeliminowano poprzez zastosowanie adaptacji współczynnika q_{55} macierzy \mathbf{Q} filtru Kalmana. Algorytmy rozmytych filtrów Kalmana o statycznej i dynamicznej adaptacji tego współczynnika poddano analogicznym badaniom. Rezultaty tych badań przedstawiono kolejno na rysunkach 6 i 7 – dla rozmytego filtru Kalmana o statycznej adaptacji i na rysunkach 8 i 9 – dla rozmytego filtru Kalmana o dynamicznej adaptacji. Na ich podstawie przeprowadzono analizę porównawczą jakości estymacji wszystkich wielkości. Z przeprowadzonych badań wynika, że wprowadzenie obu rodzajów adaptacji w znaczący sposób poprawia jakość estymacji wszystkich wielkości, co pozytywnie wpływa na pracę struktury regulacji. W przypadku zastosowania dynamicznej adaptacji jakość estymacji prędkości silnika, prędkości maszyny roboczej i momentu skrętnego uległa niewielkiemu pogorszeniu w stosunku do rozmytego filtru Kalmana o statycznej adaptacji. Jakość estymacji momentu obciążenia i stałej czasowej maszyny roboczej uległa znaczącej poprawie. W celu porównania jakości estymacji wszystkich wielkości obliczono wartości błędów estymacji obu algorytmów według poniższej zależności:

$$\delta x = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_{ie}|}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (11)$$

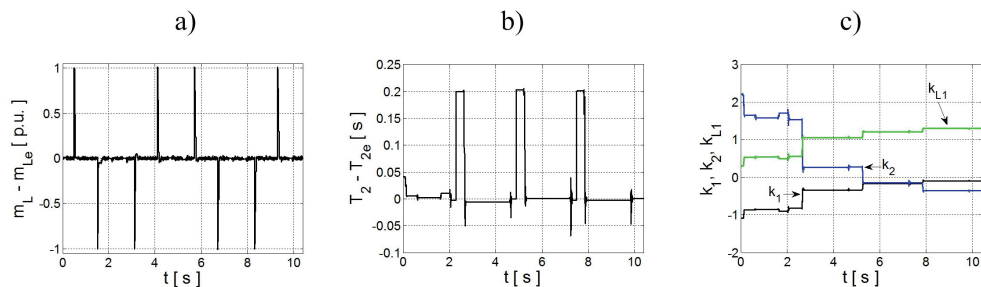
gdzie: x – wielkości rzeczywiste, x_e – wielkości estymowane, n – liczba próbek. W tabeli 4 zestawiono wyniki obliczeń. Na rysunku 10 zaprezentowano przebiegi porównawcze wartości rzeczywistych i estymowanych momentu obciążenia i parametru T_2 dla obu algorytmów.

Tabela 4. Zestawienie wartości błędów estymacji

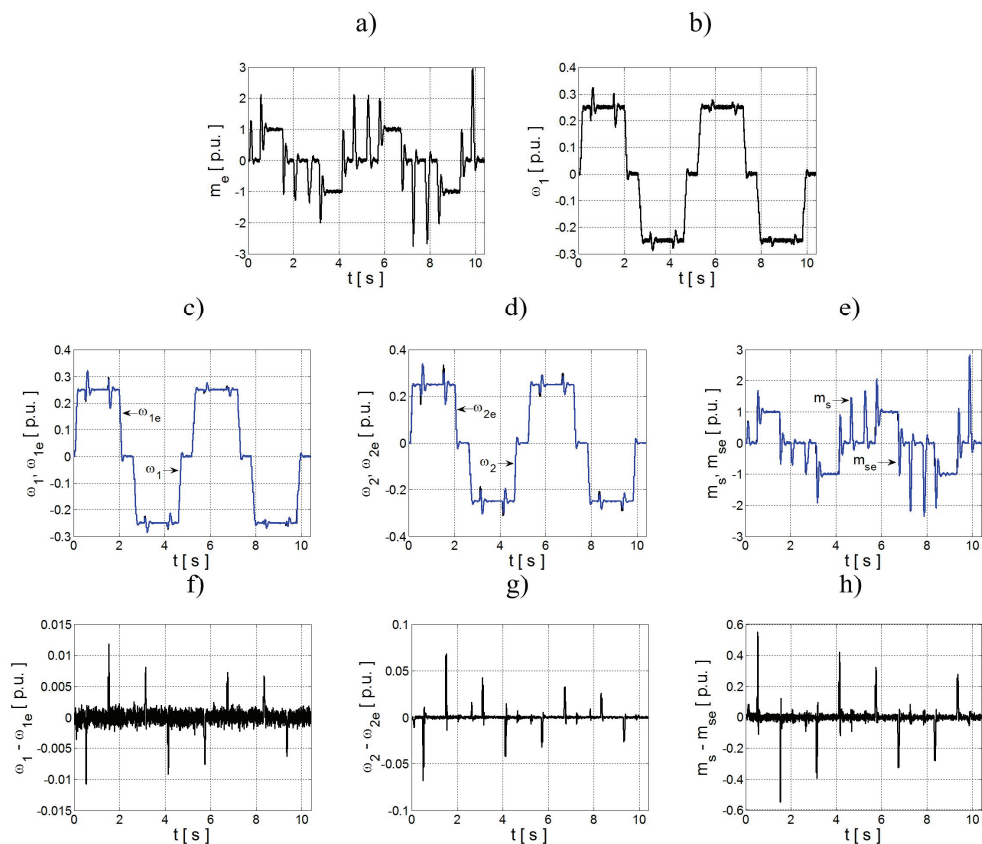
Metoda	$\delta\omega_1$	$\delta\omega_2$	δm_s	δm_L	δT_2
	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[s]
NRFK	7,63E-4	22,15E-4	229,83E-4	420,36E-4	309,32E-4
RFK – statyczna adaptacja	7,28, E-4	19,05E-4	207,07E-4	394,02E-4	242,69E-4
RFK – dynamiczna adaptacja	7,29E-4	19,17E-4	208,37E-4	384,53E-4	224,15E-4



Rys. 6. Przebiegi: sygnałów wejściowych rozmytego filtra Kalmana – momentu elektromagnetycznego (a) i prędkości silnika napędowego (b), rzeczywistych i estymowanych wielkości wraz z błędami estymacji: prędkości silnika napędowego (c, f), prędkości maszyny roboczej (d, g), momentu skrętnego (e, h), momentu obciążenia (i), stałej czasowej maszyny roboczej (j) i współczynników układu regulacji (k) dla rozmytego filtra Kalmana o statycznej adaptacji

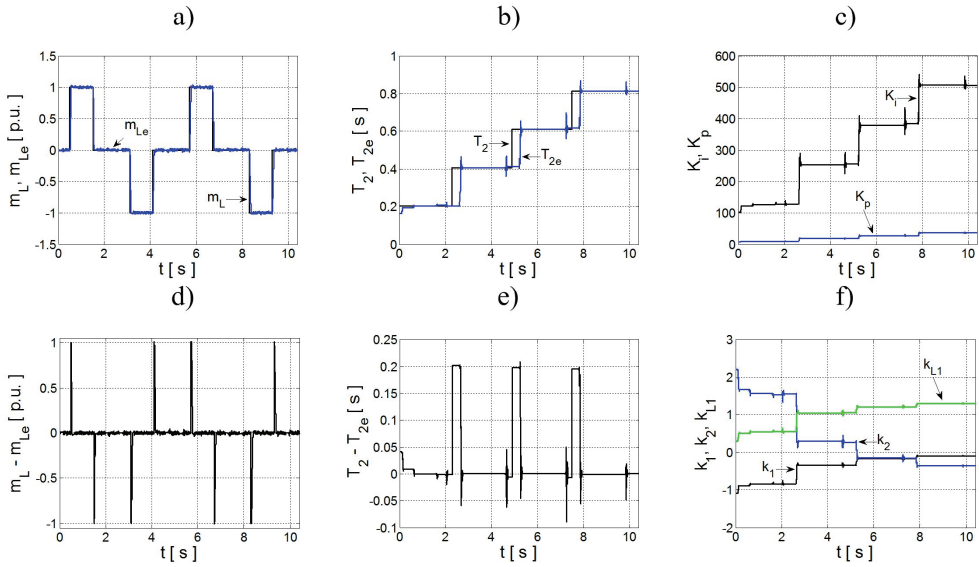


Rys. 7. Przebiegi: błędów estymacji momentu obciążenia (a) i stałej czasowej maszyny roboczej (b), współczynników układu regulacji (c) dla rozmytego filtra Kalmana o statycznej adaptacji

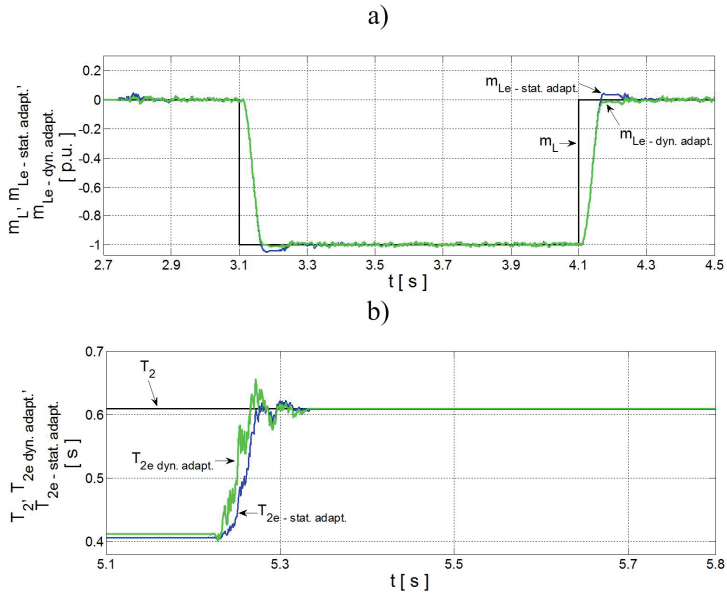


Rys. 8. Przebiegi: sygnałów wejściowych rozmytego filtra Kalmana

– momentu elektromagnetycznego (a) i prędkości silnika napędowego (b), rzeczywistych i estymowanych wielkości wraz z błędami estymacji: prędkości silnika napędowego (c, f), prędkości maszyny roboczej (d, g), momentu skrętnego (e, h) dla rozmytego filtra Kalmana o dynamicznej adaptacji



Rys. 9. Przebiegi: rzeczywistych i estymowanych wielkości wraz z błędami estymacji: momentu obciążenia (a, d), stałej czasowej maszyny roboczej (b, e) i współczynników układu regulacji (c, f) dla rozmytego filtra Kalmana o dynamicznej adaptacji



Rys. 10. Przebiegi porównawcze rzeczywistych i estymowanych wielkości: momentu obciążenia (a) i stałej czasowej maszyny roboczej (b) dla rozmytych filtrów Kalmana o statycznej i dynamicznej adaptacji

5. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia związane z zastosowaniem rozmytych filtrów Kalmana, o statycznej i dynamicznej adaptacji współczynnika q_{55} macierzy kowariancji \mathbf{Q} , w strukturze sterowania adaptacyjnego układu dwumasowego. W celu uzyskania adaptacji zastosowano zaprojektowane systemy rozmyte. Dobór wartości współczynników macierzy \mathbf{Q} , \mathbf{R} oraz singletonów systemów rozmytych zrealizowano za pomocą algorytmów genetycznych. Przeprowadzono badania symulacyjne w zamkniętej strukturze regulacji dla obu algorytmów. Na ich podstawie obliczono wartości błędów estymacji i porównano jakość estymacji. Wyniki te odniesiono do błędów estymacji klasycznego algorytmu nieliniowego rozszerzonego filtru Kalmana. Na podstawie wykonanych badań można sformułować następujące wnioski:

- dzięki zastosowaniu logiki rozmytej możliwe jest uzyskanie adaptacji wybranych współczynników filtrów Kalmana,
- dobór wartości współczynników macierzy \mathbf{Q} , \mathbf{R} oraz singletonów systemów rozmytych za pomocą algorytmów genetycznych pozwala uzyskać zadowalającą jakość estymacji wszystkich wielkości,
- podczas strojenia systemów rozmytych należy zwrócić szczególną uwagę na odpowiednie sformułowanie postaci funkcji celu,
- zastosowanie obu rodzajów adaptacji współczynnika q_{55} filtru Kalmana w znaczący sposób poprawia jakość estymacji wszystkich wielkości w odniesieniu do klasycznego algorytmu nieliniowego rozszerzonego filtru Kalmana,
- wykorzystanie dynamicznej adaptacji wybranego współczynnika znacząco poprawia jakość estymacji momentu obciążenia i stałej czasowej maszyny roboczej w porównaniu do statycznej adaptacji, w przypadku pozostałych wielkości nieznacznie ją pogarsza.

LITERATURA

- [1] BROCK S., DESKUR J., JANISZEWSKI D., MUSZYŃSKI R., *Active damping of torsional vibrations in servodrives*, Power Electronics and Electrical Drives. Selected Problems, Polish Academy of Sciences Electrical Engineering Committee, Ed. by Teresa Orłowska-Kowalska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007, 271–290.
- [2] CARRIERE S., CAUX S., FADEL M., *Velocity sensorless control of a PMSM actuator directly driven an uncertain two-mass system using RKF tuned with an evolutionary algorithm*, 14th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010, T5-213–T5-220.
- [3] DE LUCA A., SCHRODER D., THUMMEL M., *An Acceleration-based State Observer for Robot Manipulators with Elastic Joints*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007, 3817–3823.

- [4] DROZDZ K., JANISZEWSKI D., SZABAT K., *Application of fuzzy Kalman filter in adaptive control structure of two-mass system*, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014, 575–578.
- [5] DRÓZDŹ K., SZABAT K., *Adaptacyjne sterowanie układu dwumasowego z wykorzystaniem rozmytego filtru Kalmana*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 6, 2014, 40–44.
- [6] JANISZEWSKI D., *Sensorless control of Permanent Magnet Synchronous Motor based on Unscented Kalman Filter*, International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011, 1–6.
- [7] KAMIŃSKI M., *Adaptacyjny-neuronowy obserwator Luenbergera zastosowany w estymacji zmiennych stanu układu dwumasowego*, Przegląd Elektrotechniczny, nr 6, 2010, 79–82.
- [8] KAMIŃSKI M., *Estymacja zmiennych stanu układu dwumasowego za pomocą modeli neuronowych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 69, Seria: Studia i Materiały, Nr 33, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2013, 222–238.
- [9] KAMIŃSKI M., TRAN VAN T., SZABAT K., *Rozmyte estymatory mechanicznych zmiennych stanu układu napędowego z połączeniem sprężystym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 65, Seria: Studia i Materiały, Nr 25, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2011, 211–221.
- [10] KNYCHAS S., *Adaptacyjne sterowanie układu dwumasowego z połączeniem sprężystym z wykorzystaniem regulatorów neuronowo-rozmytych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 65, Seria: Studia i Materiały, Nr 31, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2011, 282–293.
- [11] ORLOWSKA-KOWALSKA T., KAMINSKI M., *FPGA implementation of the multilayer neural network for the speed estimation of the two-mass drive system*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 7, Iss. 3, 2011, 436–445.
- [12] SERKIES P., SZABAT K., *Estimation of the state variables of the two-mass system using fuzzy Kalman filter*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2013, 1–6.
- [13] SZABAT K., *Direct and indirect adaptive control of a two-mass drive system – a comparison*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2008), 2008, 564–569.
- [14] SZABAT K., *Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 61, Seria: Monografie, Nr 19, Oficyna Wydawnicza PWr., Wrocław 2008.
- [15] SZABAT K., ORLOWSKA-KOWALSKA T., *Performance improvement of industrial drives with mechanical elasticity using nonlinear adaptive Kalman filter*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, Iss. 3, 2008, 1075–1084.
- [16] ZOUBEK H., PACAS M., *Two steps towards speed estimation and encoderless identification of two-mass-systems with extended speed adaptive observer structure*, IECON 2011 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2011, 2072–2077.

COMPARISON OF AN ESTIMATION QUALITY OF STATE VARIABLES
AND A PARAMETER OF THE TWO-MASS SYSTEM BY FUZZY KALMAN FILTERS
WITH A STATIC AND DYNAMIC ADAPTATION OF A SELECTED COEFFICIENT

In this paper issues related to a comparison of an estimation quality of state variables and a parameter of the two-mass system by fuzzy Kalman filters with static and dynamic adaptation of the q_{55} coefficient of the covariance matrix Q are presented. In the research an adaptive control structure with two additional feedbacks from a shaft torque, a speed difference and an auxiliary feedback from a load torque has been used. The observers based on Kalman filter theory have been tested by

simulations in the closed-loop control structure. In order to obtain the static and dynamic adaptation designed fuzzy systems have been used. The static adaptation process of the q_{55} coefficient is based on a current value of a mechanical time constant of a load machine T_{2e} . In case of dynamic adaptation an input vector of the fuzzy system has been extended by processed signal which is calculated as an absolute value of a difference between an electromagnetic torque and estimated shaft torque. This signal contains an information about a current state of the controlled object (static or dynamic). Presented results have proved correct operation of the drive control structure in the both adaptation cases.