

Adaptacyjne sterowanie układu dwumasowego z wykorzystaniem rozmytego filtra Kalmana

Streszczenie. W referacie przedstawiono zagadnienia związane z zastosowaniem logiki rozmytej w nieliniowym filtrze Kalmana. Po krótkim przeglądzie literatury przedstawiono model matematyczny układu napędowego. Następnie opisano strukturę sterowania i rozmyty rozszerzony filtr Kalmana. Zaproponowany estymator zapewnia odtwarzanie zmiennych stanu oraz parametrów układu dwumasowego. Współczynniki macierzy kowariancji filtra Kalmana były przestrajane w trybie online, na podstawie estymowanej wartości stałej czasowej maszyny roboczej. Badany estymator testowany był w otwartej oraz zamkniętej strukturze sterowania. Uzyskano znaczną poprawę jakości estymacji wszystkich zmiennych stanu w porównaniu do rozwiązania klasycznego.

Abstract. In the paper application of the fuzzy extended Kalman filter in the adaptive control structure for two-mass drive system is presented. After a short review of the literature the mathematical model of the two-mass drive system is presented. Next a control structure and the fuzzy extended Kalman filter are described. The proposed observer ensures the estimation of system states and parameters. The covariance matrix coefficients are online returned by the fuzzy system based on the estimated value of mechanical time constant of the load machine. The proposed control strategy is tested in the open and closed-loop control structure. The proposed fuzzy Kalman filter ensures the better estimation accuracy compared to classical Kalman filter. (**Application of a fuzzy Kalman filter in adaptive control structure of two-mass drive system**).

Słowa kluczowe: estymacja, filtr Kalmana, układ dwumasowy, tłumienie drgań.

Keywords: estimation, Kalman filter, two-mass system, vibrations damping.

doi:10.12915/pe.2014.06.08

Wstęp

Zagadnienia związane z tłumieniem drgań skrętnych pierwotnie rozpatrywano w ciężkich napędach przemysłowych, jak napędy walcownicze, górnicze czy cementowe [1]-[3]. W takich zastosowaniach układy napędowe charakteryzują się dużymi wartościami momentów bezwładności oraz długimi połączeniami mechanicznymi, co jest przyczyną powstawania trudno tłumionych drgań skrętnych. Wraz z rozwojem energoelektroniki oraz techniki mikroprocesorowej umożliwiającym efektywne sterowanie momentem silnika napędowego, efekt występowania drgań skrętnych zaczął być dostrzegany w innych grupach przemysłowych układów napędowych. Są to między innymi napędy papiernicze, włókiennicze, dźwignic, radioteleskopów oraz robotów [4]-[6].

Jednym z najefektywniejszych podejść do tłumienia drgań skrętnych jest zastosowanie odpowiedniej struktury sterowania [7]-[11]. W przypadku układów napędowych o zmiennych parametrach wykorzystuje się np. metody sterowania adaptacyjnego [2], [7], [12]. Większość z istniejących rozwiązań wymaga jednak dostępności do informacji o wektorze stanu układu, który zawiera dodatkowo wielkości, jak moment obciążenia czy stała czasowa maszyny roboczej [7]. Do estymacji zmiennych stanu wykorzystywane są metody algorytmiczne lub bazujące na sztucznej inteligencji [12], [13]. Przegląd struktur sterowania stosowanych w układach napędowych z połączeniem sprzężystym przedstawiono w [14].

W niniejszej pracy zaprezentowano zagadnienia dotyczące pośredniego sterowania adaptacyjnego. Celem niniejszego referatu jest przedstawienie zagadnień dotyczących opracowania rozmytego filtra Kalmana (RFK), pracującego w adaptacyjnej strukturze sterowania układu napędowego z połączeniem sprzężystym. W pracy zaprezentowano możliwości kształtowania dynamiki układu poprzez adaptację współczynników macierzy kowariancji zakłóceń zmiennych stanu \mathbf{Q} , nieliniowego rozszerzonego filtra Kalmana (NRFK). Adaptacja wspomnianych współczynników przeprowadzana była za pomocą zaprojektowanego systemu rozmytego.

Model matematyczny obiektu badań oraz struktura sterowania

W niniejszej pracy przedmiotem badań jest układ napędowy z połączeniem sprzężystym. Do badań przyjęto powszechnie stosowany model układu dwumasowego z bezinercyjnym połączeniem sprzężystym [15], [16]. Badany obiekt opisać można, w jednostkach względnych, następującym równaniem stanu:

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

gdzie: ω_1 - prędkość silnika, ω_2 - prędkość maszyny roboczej, m_s - moment skrętny, m_L - moment obciążenia, T_1 - mechaniczna stała czasowa silnika, T_2 - mechaniczna stała czasowa maszyny roboczej, T_c - stała sprzężystości. Wartości parametrów analizowanego układu są następujące: $T_1 = T_2 = 203\text{ms}$, $T_c = 1,2\text{ms}$.

W badaniach wykorzystano strukturę sterowania z regulatorem PI i dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi, od momentu skrętnego (k_1) oraz różnicy prędkości (k_2). Schemat omawianej struktury sterowania przedstawiono na rysunku 1. Współczynniki układu regulacji dobierano na podstawie aktualnej wartości stałej czasowej maszyny roboczej T_2 , zgodnie z poniższymi zależnościami:

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

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

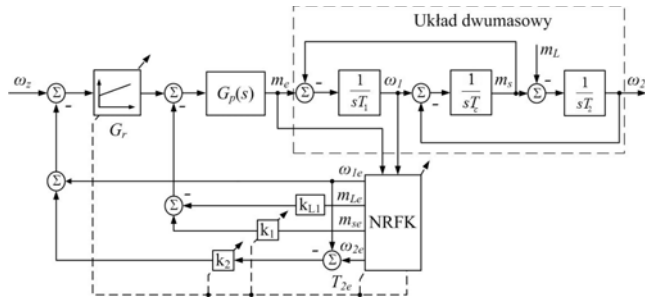
$$(4) \quad k_2 = \frac{1}{\omega_r^3 T_2 T_c} - 1$$

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

gdzie: ω_r - zadana pulsacja rezonansowa, ξ_z - zadany współczynnik tłumienia układu, K_I , K_p - wzmacnienia całkujące i proporcjonalne regulatora prędkości typu PI. Transmitancję regulatora prędkości przedstawiono poniżej:

$$(6) \quad G_r(s) = K_p + \frac{K_I}{s}$$

Badania przeprowadzono dla wartości pulsacji rezonansowej i współczynnika tłumienia $\omega_r = 40\text{s}^{-1}$, $\xi_z = 0,7$.



Rys.1. Schemat blokowy struktury sterowania

Przyjęto transmitancję pętli wymuszenia momentu elektromagnetycznego równą:

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

Podczas badań symulacyjnych założono dostępność wszystkich zmiennych stanu.

Model matematyczny nieliniowego rozszerzonego filtra Kalmana

W obecności zmieniającej się w szerokim zakresie stałej czasowej maszyny roboczej T_2 , istnieje konieczność rozszerzenia wektora stanu układu o odwrotność tego parametru oraz o moment obciążenia m_L . Odwrotność stałej czasowej $1/T_2$ przyjmuje się w celu uproszczenia obliczeń związanych z linearyzacją równania stanu. W pracy założono zmienność stałej czasowej T_2 w zakresie od $0,4T_{2N}$ do $4T_{2N}$. Wektor stanu, przy uwzględnieniu powyższych warunków, przyjmuje następującą postać:

$$(8) \quad \mathbf{x}_R(t) = \left[\omega_1(t) \quad \omega_2(t) \quad m_s(t) \quad m_L(t) \quad \frac{1}{T_2(t)} \right]^T$$

Rozszerzone równania stanu i wyjścia układu można przedstawić w poniższej formie:

$$(9a) \quad \frac{d}{dt} \mathbf{x}_R(t) = \mathbf{A}_R \left(\frac{1}{T_2(t)} \right) \mathbf{x}_R(t) + \mathbf{B}_R \mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t) \\ = \mathbf{f}_R(\mathbf{x}_R(t), \mathbf{u}(t)) + \mathbf{w}(t)$$

$$(9b) \quad \mathbf{y}_R(t) = \mathbf{C}_R \mathbf{x}_R(t) + \mathbf{v}(t)$$

gdzie: $\mathbf{w}(t)$, $\mathbf{v}(t)$ - szumy białe występujące w układzie. Macierz \mathbf{A}_R zależna jest od zmiennej w czasie wartości parametru T_2 , w związku z czym wymaga aktualizacji w każdym kroku obliczeniowym, zgodnie z aktualną estymowaną wartością tej wielkości. Macierze stanu, sterowania oraz wyjścia określone są następująco:

$$\mathbf{A}_R \left(\frac{1}{T_2(t)} \right) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{T_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_2(t)} & \frac{-1}{T_2(t)} & 0 \\ \frac{1}{T_c} & \frac{-1}{T_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(10)

$$\mathbf{B}_R = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_R = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T$$

Wektorami wejściowymi i wyjściowymi układu napędowego oraz filtra Kalmana są moment elektromagnetyczny i prędkość silnika napędowego:

$$(11) \quad \mathbf{u} = m_e, \quad \mathbf{y} = \omega_1$$

Równanie stanu (9) dyskretyzowane jest z krokiem T_s . Następnie rozpoczyna się estymacja zmiennych stanu przy wykorzystaniu nieliniowego rozszerzonego filtra Kalmana. Algorytm ten można przedstawić następująco:

1. Predykcja wektora stanu:

$$(12) \quad \hat{\mathbf{x}}_R(k+1/k) = \mathbf{A}_R(k) \hat{\mathbf{x}}_R(k/k) + \mathbf{B}_R \mathbf{u}(k)$$

2. Predykcja macierzy kowariancji:

$$(13) \quad \mathbf{P}(k+1/k) = \mathbf{F}_R(k) \mathbf{P}(k) \mathbf{F}_R^T(k) + \mathbf{Q}(k)$$

gdzie:

$$(14) \quad \mathbf{F}_R(k) = \frac{\partial \mathbf{f}_R(\mathbf{x}_R(k/k) \mathbf{u}(k), k)}{\partial \mathbf{x}_R(k/k)} \Big|_{\mathbf{x}_R = \hat{\mathbf{x}}_R(k/k)}$$

(15)

$$\mathbf{F}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{-1}{T_1} T_s & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{1}{T_2(t)} T_s & \frac{-1}{T_2(t)} T_s & T_s(m_s(k) - m_L(k)) \\ \frac{1}{T_c} T_s & \frac{-1}{T_c} T_s & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Obliczenie wzmocnienia Kalmana:

$$(16) \quad \mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{C}_R^T(k+1) \times [\mathbf{C}_R(k+1)\mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{C}_R^T(k+1) + \mathbf{R}(k)]^{-1}$$

4. Korekcja wektora stanu:

$$(17) \quad \hat{\mathbf{x}}_R(k+1/k+1) = \hat{\mathbf{x}}_R(k/k) + \mathbf{K}(k+1) \times [\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{C}_R(k+1)\hat{\mathbf{x}}_R(k+1/k)]$$

5. Korekcja macierzy kowariancji:

$$(18) \quad \mathbf{P}(k+1/k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{C}_R(k+1)]\mathbf{P}(k+1/k)$$

6. Powrót do pierwszego kroku [15].

Opisany algorytm filtra Kalmana wymaga określenia wartości elementów macierzy kowariancji zakłóceń zmiennych stanu \mathbf{Q} oraz sygnałów wyjściowych \mathbf{R} . Wartości te dobrano za pomocą algorytmu genetycznego, zgodnie z przyjętą funkcją celu:

$$(19) \quad F_1 = \min \left\{ \sum_1^n (|\omega_1 - \omega_{1e}|) * \sum_1^n (|\omega_2 - \omega_{2e}|) * \sum_1^n (|m_s - m_{se}|) * \sum_1^n (|m_L - m_{Le}|) * \sum_1^n (|T_2 - T_{2e}|) \right\}$$

Powyższa funkcja celu uwzględnia wszystkie estymowane wielkości, występujące w wektorze stanu badanego układu napędowego. Optymalizację przeprowadzono przy kolejno omówionych warunkach. Sygnałem wymuszającym układu był sygnał prostokątny o amplitudzie równej 1 i częstotliwości 0,5 Hz. Przyjęto wartość ograniczenia momentu elektromagnetycznego wynoszącą $3m_{eN}$. Sygnały wejściowe filtra Kalmana zakłócono szumami białymi o wartościach średnich wynoszących 1% dla momentu elektromagnetycznego i 0,25% dla prędkości silnika napędowego. Założono zmienność stałej czasowej maszyny roboczej T_2 w zakresie od $0,4T_{2N}$ do $4T_{2N}$. W tabeli 1 zestawiono uzyskane wartości elementów macierzy NRFK.

Tabela 1. Zestawienie wartości elementów macierzy NRFK

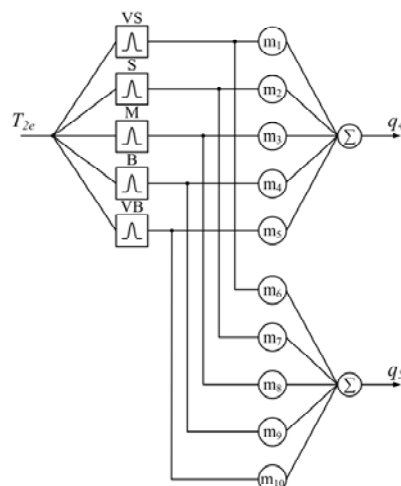
q_{11}	q_{22}	q_{33}	q_{44}	q_{55}	r
0,037	0,020	2e-5	99,18	61,63	41,84

Zastosowany system rozmyty

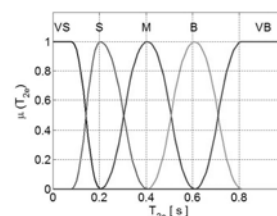
W celu wprowadzenia adaptacji elementów macierzy kowariancji zakłóceń zmiennych stanu \mathbf{Q} zastosowano system rozmyty, którego strukturę przedstawiono na rysunku 2. Przy użyciu omawianego układu, na podstawie aktualnej wartości estymowanej stałej czasowej maszyny roboczej T_{2e} , wyznaczone są elementy q_{44} i q_{55} macierzy \mathbf{Q} . Poprzez odpowiedni dobór współczynników m_i , kształtowana jest charakterystyka zmian współczynników q_{44} i q_{55} macierzy \mathbf{Q} , w zależności od aktualnej wartości T_{2e} . Wartości współczynników m_i dobrano za pomocą algorytmu genetycznego według następującej funkcji celu:

$$(20) \quad F_2 = \min \left\{ \sum_1^n (|m_L - m_{Le}|) * \sum_1^n (|T_2 - T_{2e}|) \right\}$$

Otrzymane wartości parametrów m_i zestawiono w tabeli 2. W zaprezentowanym systemie wykorzystano funkcje przynależności zmiennej wejściowej, które przedstawiono na rysunku 3.



Rys.2. Struktura zastosowanego systemu rozmytego



Rys.3. Zastosowane funkcje przynależności

Tabela 2. Zestawienie wartości parametrów m_i

m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
91,90	64,51	101,18	82,43	87,37
m_6	m_7	m_8	m_9	m_{10}
273,13	19064,0	192,99	160,83	1,93

Wybrane wyniki badań

Badania symulacyjne rozpoczęto od testowania nieliniowego rozszerzonego filtra Kalmana, o stałych wartościach elementów macierzy \mathbf{Q} i \mathbf{R} , pracującego poza strukturą sterowania. Założono odmienne przebiegi wartości zadanych układu napędowego niż w procesie optymalizacji NRFK. Zastosowano układ przełączania estymat momentu obciążenia oraz stałej czasowej maszyny roboczej, uniemożliwiający jednoczesną estymację tych wielkości. Uwzględniono zakres zmian stałej czasowej maszyny roboczej od $0,4T_{2N}$ do $4T_{2N}$. Analiza uzyskanych wyników badań wskazywała na prawidłową pracę układu. Uzyskaną jakość estymacji prędkości silnika, maszyny roboczej oraz momentu skrętnego można było uznać za zadowalającą. W przypadku przebiegów estymat momentu obciążenia i stałej czasowej maszyny roboczej występowały duże wartości błędów estymacji oraz niepożądane impulsowe zmiany ich wartości. Wady te należało wyeliminować ze względu na możliwość wzbudzenia drgań skrętnych w przypadku pracy NRFK w zamkniętej strukturze sterowania. W celu eliminacji wymienionych wad zastosowano adaptację elementów q_{44} i q_{55} macierzy \mathbf{Q} , za pomocą opisanego systemu rozmytego. Przykładowe przebiegi zmiennych stanu układu z rozmytym filtrem Kalmana przedstawiono na rysunkach 4 i 5. Występujące skokowe zmiany prędkości napędu między 7.,

a 8. sekundą pracy, związane są ze skokową zmianą stałej czasowej maszyny roboczej. Uzyskano znaczną poprawę jakości estymacji wszystkich zmiennych stanu i parametru T_2 rozpatrywanego układu napędowego. Kolejnym etapem badań było testowanie rozmytego filtra Kalmana pracującego w zamkniętej strukturze sterowania. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunkach 6 i 7. Analiza otrzymanych wyników wskazuje na prawidłową pracę układu napędowego. Jakość estymacji zmiennych stanu należy uznać za zadowalającą. W porównaniu do pracy rozmytego filtra Kalmana poza strukturą sterowania, pogorszeniu uległa jakość estymacji stałej czasowej maszyny roboczej. W przyszłych pracach planuje się weryfikację eksperymentalną proponowanego rozwiązania. Celem porównania obu metod obliczono błędy estymacji zmiennych stanu i parametru T_2 według poniższej zależności:

$$(21) \quad \delta x = \frac{1}{n} \sum |x_i - x_{ie}|, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

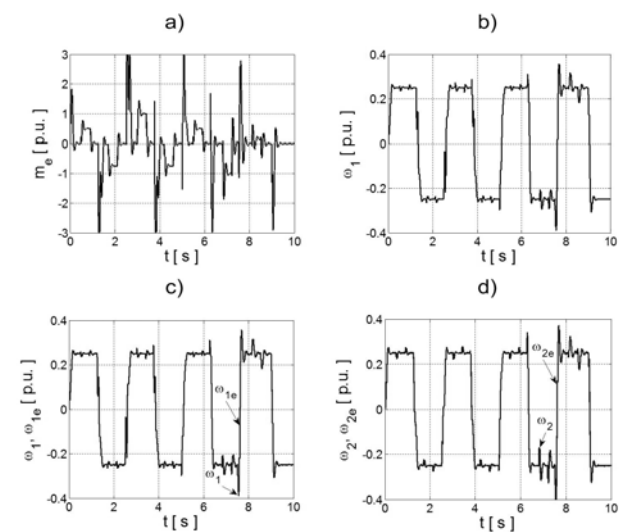
gdzie: x - poszczególne rzeczywiste zmienne stanu układu, x_e - estymowane zmienne stanu, n - liczba próbek. Zestawienie obliczonych błędów estymacji przedstawiono w tabelach 3 i 4.

Tabela 3. Zestawienie wartości błędów estymacji z filtrami Kalmana pracującymi poza strukturą sterowania

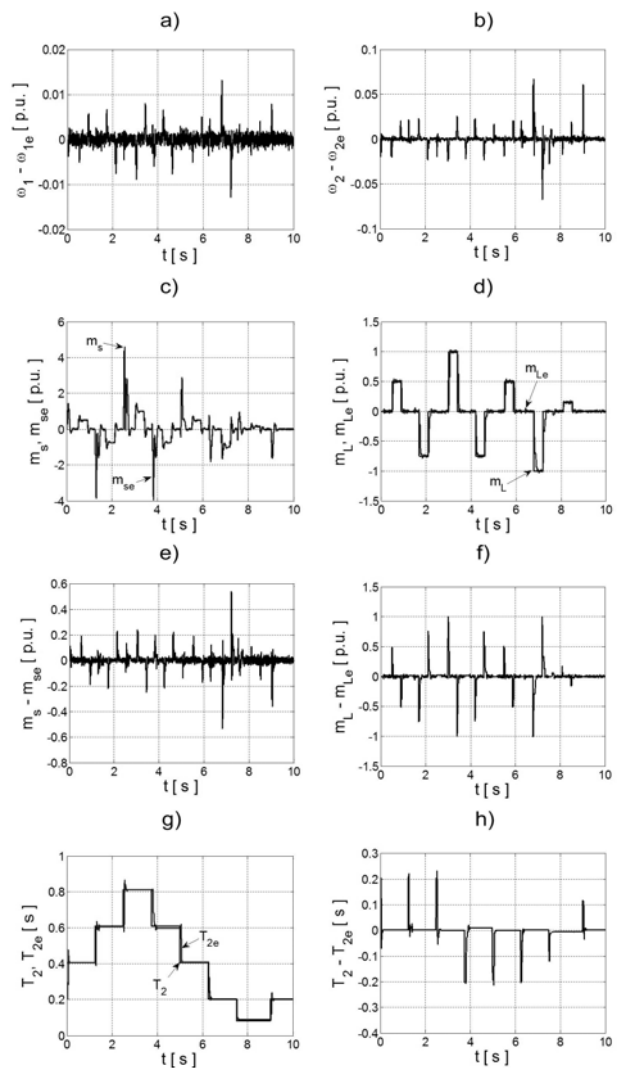
Metoda	$\delta\omega_1$	$\delta\omega_2$	δm_s	δm_L	δT_2
	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[s]
NRFK	0,0011	0,0039	0,0350	0,0558	0,0490
RFK	0,0009	0,0028	0,0264	0,0498	0,0108

Tabela 4. Zestawienie wartości błędów estymacji z RFK pracującym w zamkniętej strukturze sterowania

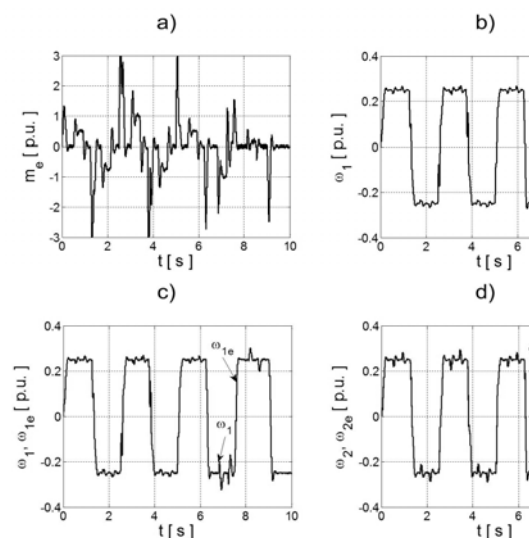
Metoda	$\delta\omega_1$	$\delta\omega_2$	δm_s	δm_L	δT_2
	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[s]
RFK	0,0009	0,0027	0,0257	0,0457	0,0142



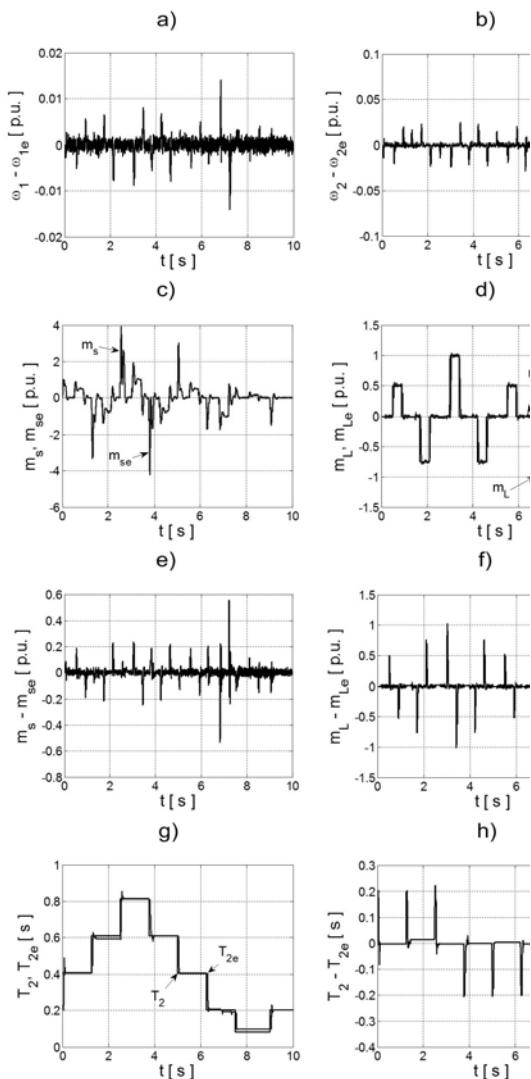
Rys.4. Przebiegi sygnałów wejściowych RFK: momentu elektromagnetycznego (a), prędkości silnika (b), rzeczywistych i estymowanych zmiennych stanu: prędkości silnika (c), prędkości maszyny roboczej (d), w przypadku pracy RFK poza strukturą sterowania



Rys.5. Przebiegi rzeczywistych i estymowanych zmiennych stanu oraz błędów estymacji: prędkości silnika (a), prędkości maszyny roboczej (b), momentu skrętnego (c, e), momentu obciążenia (d, f), stałej czasowej maszyny roboczej (g, h) w przypadku pracy RFK poza strukturą sterowania



Rys.6. Przebiegi sygnałów wejściowych RFK: momentu elektromagnetycznego (a), prędkości silnika (b), rzeczywistych i estymowanych zmiennych stanu: prędkości silnika (c), prędkości maszyny roboczej (d), w przypadku pracy RFK w zamkniętej strukturze sterowania



Rys.7. Przebiegi rzeczywistych i estymowanych zmiennych stanu oraz błędów estymacji: prędkości silnika (a), prędkości maszyny roboczej (b), momentu skrętnego (c, e), momentu obciążenia (d, f), stałej czasowej maszyny roboczej (g, h) w przypadku pracy RFK poza strukturą sterowania

Podsumowanie

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z zastosowaniem rozmytego filtra Kalmana pracującego w adaptacyjnej strukturze sterowania układu dwumasowego. Omówiono modele matematyczne układu napędowego, zastosowanego obserwatora zmiennych stanu oraz strukturę sterowania. Opisano zastosowany system rozmyty, którego zadaniem było wprowadzenie adaptacji współczynników q_{44} i q_{55} macierzy kowariancji zakłóceń zmiennych stanu Q filtra Kalmana oraz omówiono sposób doboru jego współczynników. Badania proponowanego rozwiązania przeprowadzono w strukturze sterowania z nieliniowym rozszerzonym filtrem Kalmana pracującym poza strukturą sterowania oraz w zamkniętej strukturze sterowania. Przeprowadzono badania porównawcze zaproponowanego rozwiązania z klasycznym algorytmem nieliniowego rozszerzonego filtra Kalmana o stałych współczynnikach macierzy Q . Uzyskano znaczną poprawę jakości estymacji zmiennych stanu i parametru badanego układu napędowego z połączeniem sprężystym.

Praca finansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu: 'Odporne estymatory zmiennych stanu i parametrów układu napędowego z połączeniem sprężystym', UMO-2011/01/B/ST7/03500. 2011-2014.

LITERATURA

- [1] Mayer Ch. B., Torsional vibration problems and analyses of cement industry drives, *IEEE Transaction on Industry Applications*, IA-17 (1981), n.1, 81-89
- [2] Szabat K., Orłowska-Kowalska T., Adaptive Control of Two-Mass System using Nonlinear Extended Kalman Filter, *IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on*, (2006), 1539 - 1544
- [3] 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, *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2010 14th International*, (2010), T5-213-T5-220
- [4] Szabat K., Serkies P.J., Zastosowanie sterowania predykcynego w układzie napędowym z połączeniem sprężystym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2 (2010), nr 2, 380-383
- [5] De Luca A., Schroder D., Thummel M., An Acceleration-based State Observer for Robot Manipulators with Elastic Joints, *Robotics and Automation, 2007 IEEE International Conference on*, (2007), 3817-3823,
- [6] Valenzuela M.A., Bentley J.M., Lorenz R.D., Computer-Aided Controller Setting Procedure for Paper Machine Drive Systems, *Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2007. Conference Record of Annual*, (2007), 197-208,
- [7] Szabat K., Serkies P. J., Adaptacyjny filtr Kalmana dla układu napędowego z połączeniem sprężystym, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 66*, Wrocław 2012, 118-124
- [8] Deskur J., Muszynski R, The problems of high dynamic drive control under circumstances of elastic transmission, *Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2008 13th*, (2008), 2227 - 2234
- [9] Muszynski R, Deskur J., Damping of Torsional Vibrations in High-Dynamic Industrial Drives, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 57 (2010), n.2, 544-552
- [10] Scholing I., Orlik B., Control of a nonlinear two-mass system with uncertain parameters and unknown states, *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*, (2000), 1096-1103
- [11] Gierlotka K., Michalak J., Zastosowanie logiki rozmytej w układach napędowych z połączeniami sprężystymi, *Materiały konferencji PPEE'2000*, 361-366, Wisła 2000
- [12] Szabat K., Orłowska-Kowalska T., Performance Improvement of Industrial Drives With Mechanical Elasticity Using Nonlinear Adaptive Kalman Filter, *Transaction on Industrial Electronics*, 55 (2008), n.3, 1075-1084
- [13] Orłowska-Kowalska T., Kamiński M., Application of OBD method for optimization of neural state variable estimators of the two-mass drive system, *Neurocomputing*, 72 (2009), Iss. 13-15, 3034-3045
- [14] Szabat K., Orłowska-Kowalska T., Vibration Suppression in Two-Mass Drive System using PI Speed Controller and Additional Feedbacks - Comparative Study, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 54 (2007), n.2, 1193-1206
- [15] Szabat K., Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, nr 61, Wrocław 2008
- [16] Gierlotka K., Układy sterowania napędów elektrycznych z elementami sprężystymi, *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej*, nr 1181, Gliwice, 1992

Autorzy: mgr inż. Krzysztof Drózdź, E-mail: krzysztof.drozd@pwr.wroc.pl; dr hab. inż. Krzysztof Szabat, E-mail: krzysztof.szabat@pwr.wroc.pl, Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, 50-370 Wrocław, ul. Smoluchowskiego 19