

Zastosowanie rozmytego bezśladowego filtra Kalmana w adaptacyjnej strukturze sterowania układu dwumasowego

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienia związane z zastosowaniem rozmytego bezśladowego filtra Kalmana w adaptacyjnej strukturze sterowania układu napędowego z połączeniem sprężystym. Wybrana struktura regulacji zapewnia efektywne tłumienie drgań skrętnych pomimo występowania zmienności momentu bezwładności maszyny roboczej. W algorytmie UKF wprowadzono modyfikację w postaci systemów rozmytych, których zadaniem jest adaptacja wybranych wyrazów macierzy kowariancji Q . Rozwiązanie to zapewnia odporność obserwatora w przypadku zmian wartości parametru sterowanego obiektu. Po krótkim przeglądzie literatury omówiono modele matematyczne układu napędowego, bezśladowego filtra Kalmana i strukturę sterowania. Następnie zaprezentowano strukturę systemów rozmytych. Kolejno przedstawiono wybrane wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnej weryfikacji rozważań teoretycznych.

Abstract. In the paper issues related to an application of a fuzzy unscented Kalman filter in an adaptive control structure of the drive system with elastic joint are presented. The selected control structure ensures effective damping of torsional vibrations in spite of changes of inertia of the load machine. In the UKF algorithm a modification in the form of fuzzy systems is applied. Their task is an adaptation of the selected coefficients of the covariance matrix Q . The solution provides robustness to changes in the value of the controlled system parameter. After the short review of the literature, the mathematical models of the drive system, unscented Kalman filter and the control structure are discussed. Next, the fuzzy systems structures are shown. Subsequently, selected simulation results and experimental verification of theoretical considerations are presented. (**Application of a fuzzy unscented Kalman filter in an adaptive control structure of a two-mass system**).

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

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

Wstęp

Wśród nowoczesnych elektrycznych układów napędowych wykorzystywanych w zastosowaniach przemysłowych, wyróżnić można wiele napędów charakteryzujących się sprężystością połączenia mechanicznego pomiędzy silnikiem napędowym i maszyną roboczą. Głównym problemem występującym przy tego typu układach jest występowanie zjawiska drgań skrętnych [1]-[9]. Wymagania aktualnie stawiane układom napędowym dotyczą zapewnienia wysokiej precyzji sterowania położeniem i/lub prędkością, przy osiągnięciu jak najlepszych właściwości dynamicznych układu. Przykładami takich układów są między innymi: napędy włókiennicze, papiernicze, dźwignic, radioteleskopów, robotów, a nawet dysków twardych [7].

Jednym z najbardziej efektywnych podejść do tłumienia drgań skrętnych jest zastosowanie odpowiedniej struktury sterowania. Najprostsze rozwiązania wykorzystują regulatory PI/PID i podstawowe sprzężenie zwrotne od prędkości silnika napędowego, co nie zapewnia efektywnego tłumienia drgań skrętnych. W bardziej złożonych strukturach stosuje się dodatkowe sprzężenia zwrotne od trudno mierzalnych wielkości rozpatrywanego układu, takich jak moment skrętny, prędkość maszyny roboczej i moment obciążenia [5]-[10].

W przypadku przemysłowych aplikacji układów napędowych, znaczna ich część charakteryzuje się zmiennością parametrów w czasie pracy, co kwalifikuje je do układów niestacjonarnych. Parametrem, który najczęściej ulega zmianom jest moment bezwładności maszyny roboczej. W celu prawidłowej regulacji takich układów stosowane są metody sterowania adaptacyjnego lub odpornego, np. ślizgowego [6].

Zaawansowane struktury sterowania wymagają dostępności trudno mierzalnych zmiennych stanu. W celu ich uzyskania w obecności zakłóceń pomiarowych należy zastosować jedną z dostępnych metod estymacji zmiennych stanu i parametrów. Ich podział opisano w [10]. Jednym z najczęściej wykorzystywanych podejść jest wykorzystanie algorytmów opartych na teorii filtra Kalmana [9]-[11]. Algorytmy te zapewniają dokładne oszacowanie aktualnego stanu obiektu pomimo występowania zakłóceń

pomiarowych i parametrycznych. Wynika to z ich modeli matematycznych, które w swojej postaci uwzględniają wspomniane zakłócenia [11]. Algorytmy te wymagają doboru wyrazów macierzy kowariancji Q i R , który stanowi trudne zadanie.

W niniejszej pracy przedstawiono zagadnienia związane z zastosowaniem rozmytego bezśladowego filtra Kalmana (FUKF - *Fuzzy Unscented Kalman Filter*), pracującego w strukturze sterowania adaptacyjnego dwumasowego układu napędowego o zmiennym momencie bezwładności maszyny roboczej. W celu zminimalizowania wady podstawowej wersji algorytmu UKF, którą jest zmiana wartości błędów estymacji wszystkich wielkości wraz ze wzrostem wartości momentu bezwładności maszyny roboczej, zastosowano systemy rozmyte wprowadzające adaptację wybranych wyrazów macierzy kowariancji filtra Kalmana. Zaprojektowano systemy rozmyte wprowadzające dwa rodzaje adaptacji: statyczną i dynamiczną. Statyczna adaptacja bazuje jedynie na aktualnej estymowanej wartości omawianego parametru, natomiast dynamiczna rozszerzona jest o wykrycie aktualnego stanu obserwowanego obiektu (statycznego i dynamicznego). Zaprezentowane w pracy wyniki badań symulacyjnych zostały zweryfikowane poprzez badania eksperymentalne.

Model matematyczny obiektu badań i struktura sterowania

Przedmiotem badań jest układ napędowy z połączeniem sprężystym. W badaniach przyjęto powszechnie stosowany model układu dwumasowego z bezinercyjnym połączeniem sprężystym, z uwzględnieniem tarcia, sformułowany w jednostkach względnych i opisany poniższymi równaniami [10]:

$$(1) \quad \frac{d\omega_1(t)}{dt} = \frac{1}{T_1}(m_e(t) - m_s(t) - m_{f1}(t))$$

$$(2) \quad \frac{d\omega_2(t)}{dt} = \frac{1}{T_2}(m_s(t) - m_L(t) - m_{f2}(t))$$

$$(3) \quad \frac{dm_s(t)}{dt} = \frac{1}{T_c} (\omega_1(t) - \omega_2(t))$$

gdzie: ω_1 - prędkość silnika, ω_2 - prędkość maszyny roboczej, m_s - moment skrętny, m_L - moment obciążenia, m_{f1} - moment tarcia silnika napędowego, m_{f2} - moment tarcia maszyny roboczej, T_1 - mechaniczna stała czasowa silnika napędowego, T_2 - mechaniczna stała czasowa maszyny roboczej, T_c - stała sprężystości. Znamionowe wartości parametrów analizowanego układu są następujące: $T_1 = T_2 = 203$ ms, $T_c = 1,2$ ms. Zawarte w przedstawionym modelu momenty tarcia uwzględniają współczynniki tarcia Coulomba i tarcia wiskotycznego.

W badaniach wykorzystano strukturę sterowania adaptacyjnego z przyrostowym regulatorem IP, dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi: od momentu skrętnego (k_1) i różnicy prędkości (k_2) oraz pomocniczym sprzężeniu zwrotnym od momentu obciążenia (k_{L1}) [10]. Schemat omawianej struktury sterowania i zastosowanego regulatora prędkości przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Dobór wartości współczynników układu regulacji przeprowadzono na podstawie aktualnej estymowanej wartości stałej czasowej maszyny roboczej T_2 , zgodnie z poniższymi zależnościami [10]:

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

$$(5) \quad k_p = 4 \xi_z \omega_r^3 T_1 T_2 T_c$$

$$(6) \quad k_2 = \frac{1}{\omega_r^3 T_2 T_c} - 1$$

$$(7) \quad k_1 = \frac{T_1 (4 \xi_z^2 - k_2)}{T_2 (1 + k_2)} - 1$$

$$(8) \quad k_{L1} = T_c k_i (1 + k_2) + 1 + k_i$$

gdzie: ω_r - zadana pulsacja rezonansowa, ξ_z - zadany współczynnik tłumienia układu, k_i , k_p - wzmocnienia całkujące i proporcjonalne regulatora prędkości. Powyższe zależności można wyprowadzić za pomocą metody lokowania biegunów zamkniętego układu regulacji. Założono następujące wartości pulsacji rezonansowej i współczynnika tłumienia układu: $\omega_r = 40$ s⁻¹, $\xi_z = 0,7$. W modelu symulacyjnym uwzględniono również zoptymalizowaną pętlę wymuszenia momentu elektromagnetycznego, opisaną następującą transmitancją:

$$(9) \quad G_p(s) = \frac{1}{0,002s + 1}$$

Bezśladowy filtr Kalmana

Rozważanie niestacjonarnego układu dwumasowego o zmiennym momencie bezwładności maszyny roboczej, reprezentowanym przez parametr T_2 , wymaga rozszerzenia wektora stanu o odwrotność tego parametru i moment obciążenia m_L . Rozszerzony wektor stanu przyjmuje następującą postać:

$$(10) \quad \mathbf{x}_R(t) = \left[\omega_1(t) \quad \omega_2(t) \quad m_s(t) \quad m_L(t) \quad \frac{1}{T_2(t)} \right]^T$$

Rozszerzone równania stanu i wyjścia układu przedstawiono poniżej:

$$(11a) \quad \frac{d}{dt} \mathbf{x}_R(t) = \mathbf{A}_R \left(\frac{1}{T_2} \right) \mathbf{x}_R(t) + \mathbf{B}_R \mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t)$$

$$(11b) \quad \mathbf{y}_R(t) = \mathbf{C}_R \mathbf{x}_R(t) + \mathbf{v}(t)$$

gdzie: $\mathbf{w}(t)$, $\mathbf{v}(t)$ - szумы białe występujące w układzie. Z powodu występowania zależności macierzy \mathbf{A}_R od zmiennego w czasie parametru T_2 , wymagana jest jej aktualizacja w każdym kroku obliczeniowym. Aktualizacja ta przeprowadzana jest na podstawie estymowanej wartości wspomnianego parametru. Macierze stanu, sterowania i wyjścia rozpatrywanego układu są następującej postaci:

$$(12) \quad \mathbf{A}_R \left(\frac{1}{T_2} \right) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{T_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_2(t)} & \frac{-1}{T_2(t)} & 0 \\ \frac{1}{T_c} & \frac{-1}{T_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_R = \left[\frac{1}{T_1} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \right]^T, \quad \mathbf{C}_R = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

Wektorami wejściowym i wyjściowym rozważanego układu i filtru Kalmana są moment elektromagnetyczny i prędkość silnika napędowego:

$$(13) \quad \mathbf{u} = m_e, \quad \mathbf{y} = \omega_1$$

Równania stanu i wyjścia układu podlegają dyskretyzacji z krokiem $T_s = 0,0005$ s. Następnie rozpoczyna się proces estymacji zmiennych stanu i parametru za pomocą bezśladowego filtru Kalmana. Algorytm ten opisano w [11]. Jego zastosowanie wymaga określenia wartości wyrazów macierzy kowariancji \mathbf{Q} i \mathbf{R} , które w przypadku rozpatrywanego układu mają poniżej przedstawioną postać:

$$(14) \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{55} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = [r]$$

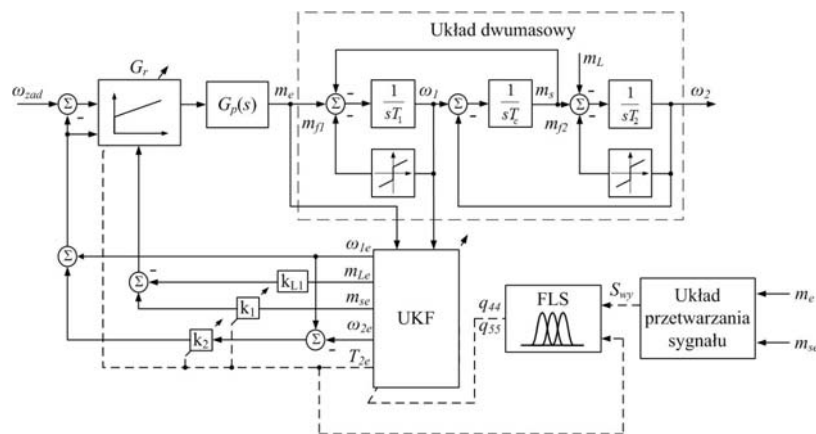
Ich wartości dobrano podczas badań symulacyjnych, za pomocą algorytmu hybrydowego, który stanowi połączenie algorytmów genetycznego i *Pattern Search*, minimalizując następującą funkcję celu:

$$(15) \quad F = \frac{1}{n} \left[\left(\delta \omega_1 \cdot \dot{\delta \omega}_1 \right)^2 + \left(\delta \omega_2 \cdot \dot{\delta \omega}_2 \right)^2 + \left(\delta m_s \cdot \dot{\delta m}_s \right)^2 + \left(\delta m_L \cdot \dot{\delta m}_L \right)^2 + \left(\delta T_2 \cdot \dot{\delta T}_2 \right)^2 \right]$$

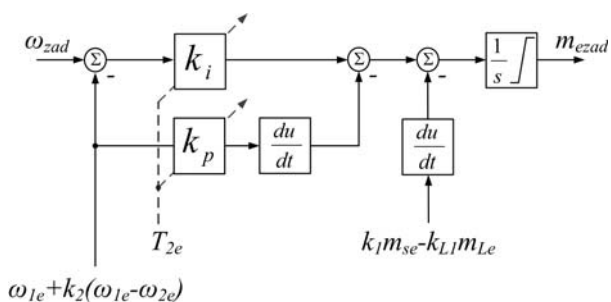
gdzie:

$$\hat{\delta x} = \sum_{i=1}^n |x_i - x_{ie}|, \quad \dot{\delta x} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| (x_{i+1} - x_{(i+1)e}) - (x_i - x_{ie}) \right|}{T_s}$$

x_i - wartości rzeczywiste poszczególnych wielkości, x_{ie} - wartości estymowane poszczególnych wielkości, n - liczba próbek.



Rys. 1. Schemat blokowy adaptacyjnej struktury sterowania



Rys. 2. Schemat blokowy regulatora przyrostowego IP

Powyższa funkcja celu składa się z sumy iloczynów dyskretnych błędów i pochodnych błędów wszystkich wielkości, znormalizowanej poprzez podzielenie jej przez liczbę próbek. Tak sformułowana postać funkcji celu umożliwia dostrojenie algorytmu obserwatora w sposób umożliwiający minimalizację błędów estymacji zarówno w stanach statycznych, jak i dynamicznych obserwowanego obiektu oraz wysokoczęstotliwościowych szumów wynikających z tego procesu. Ma to szczególne znaczenie dla pracy przy niskich prędkościach napędu oraz kształtowania momentu elektromagnetycznego w całym zakresie prędkości i obciążenia. Podniesienie poszczególnych składników funkcji celu do kwadratu przyspiesza zbieżność algorytmu optymalizacji oraz poprawia jakość estymacji. Przyjęcie współczynników wagowych poszczególnych składników funkcji celu równych 1 związane jest z zastosowaniem modelu układu w jednostkach względnych. Rozpatrywanie pracy przy niskich wartościach prędkości planowane jest w przyszłych pracach autora.

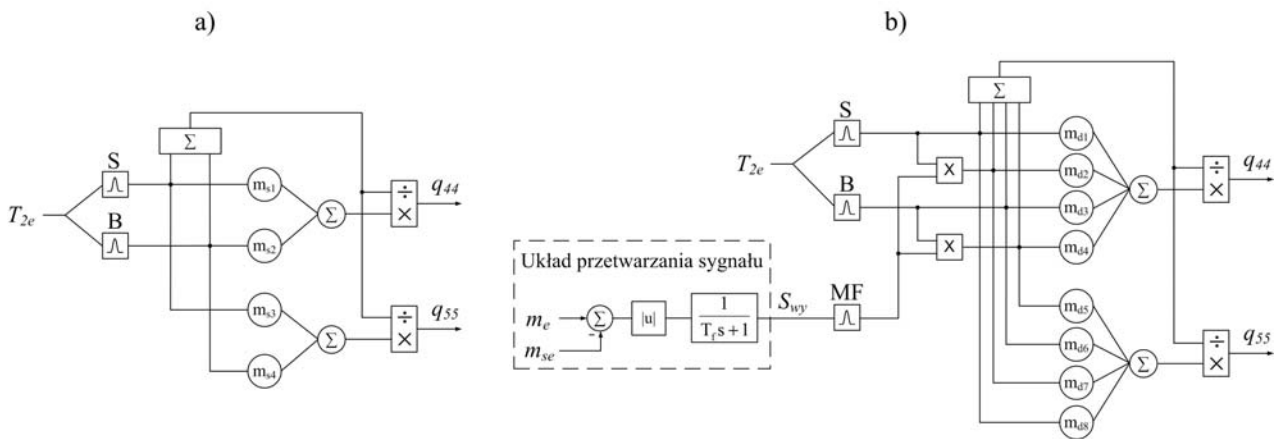
Rozmyty bezśladowy filtr Kalmana

Klasyczny algorytm bezśladowego filtra Kalmana w rozpatrywanym zastosowaniu cechuje się pewną wadą. Wraz ze wzrostem wartości parametru T_2 wzrastają wartości błędów jego estymacji, co ze względu na właściwości filtra Kalmana przekłada się na jednoczesną zmianę wartości błędów estymacji wszystkich wielkości. W celu wyeliminowania omówionej wady należy wprowadzić adaptację wybranych wyrazów macierzy kowariancji algorytmu UKF. W niniejszej pracy zastosowano zaprojektowane systemy rozmyte realizujące wspomnianą adaptację. Ze względu na największą trudność poprawnej estymacji momentu obciążenia, który stanowi zmienną niezależną, i parametru T_2 , do wprowadzenia adaptacji wybrano wyrazy q_{44} i q_{55} , które mają największy wpływ na jakość estymacji tych wielkości. Zastosowano dwa

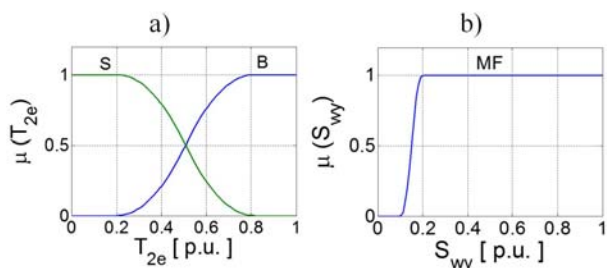
rodzaje adaptacji: statyczną i dynamiczną. Statyczna adaptacja bazuje wyłącznie na aktualnej estymowanej wartości parametru T_2 , natomiast dynamiczna adaptacja rozszerzona jest o detekcję aktualnego stanu układu napędowego (statycznego lub dynamicznego). Detekcja stanu napędu przeprowadzana jest na podstawie wartości różnicy pomiędzy momentem elektromagnetycznym i estymowanym momentem skrotnym. W przypadku przekroczenia ustalonej granicy tej różnicy, wykrywany jest stan dynamiczny układu i odpowiednio dla niego następuje przestrojenie filtra Kalmana. Po przejściu napędu do stanu statycznego wartość różnicy momentów maleje poniżej ustalonej granicy i następuje analogiczne przestrojenie obserwatora. Struktury zaprojektowanych systemów rozmytych przedstawiono na rysunku 3. Ich funkcje przynależności zmiennych wejściowych, zastosowane na podstawie wiedzy eksperckiej, zaprezentowano na rysunku 4. Wartości singletonów m_i dobrano analogicznie do wartości wyrazów macierzy kowariancji \mathbf{Q} i \mathbf{R} klasycznego algorytmu UKF.

Wyniki badań

Badania symulacyjne rozpoczęto od testowania klasycznego algorytmu UKF pracującego w zamkniętej strukturze sterowania. Kolejnym krokiem były analogiczne badania algorytmu FUKF z zastosowaniem obu rodzajów adaptacji. Ze względu na brak możliwości jednoczesnej obserwacji momentu obciążenia i parametru T_2 zastosowano układ uniemożliwiający takie działanie. Założono zakres zmian stałej czasowej maszyny roboczej w granicach od T_{2N} do $4T_{2N}$. W przypadku występowania znamionowej wartości tego parametru pracę obserwatora można było uznać za zadowalającą, jednak wraz ze zmianami jego wartości zaobserwować można jednoczesne zmiany wartości błędów estymacji wszystkich wielkości. Błędy estymacji obu prędkości i momentu skrotnego maleją, a momentu obciążenia i parametru T_2 rosną. W celu minimalizacji tej wady zastosowano omówione wcześniej dwa rodzaje adaptacji (statyczną i dynamiczną) wybranych wyrazów q_{44} i q_{55} macierzy kowariancji \mathbf{Q} . Wyniki badań z zastosowaniem rozmytego bezśladowego filtra Kalmana (FUKF) przedstawiono kolejno na rysunkach 5, 6, i 7. Rysunek 5 obrazuje sygnały wejściowe algorytmu, a rysunki 6 i 7 pozostałe wyniki pracy układu. W celu przeprowadzenia porównania pracy obu algorytmów w tabeli 1 zestawiono obliczone wartości znormalizowanych pierwiastków kwadratowych poszczególnych składników funkcji celu (15). W tabeli przyjęto następujące oznaczenia: FUKF_S - rozmyty bezśladowy filtr Kalmana ze statyczną adaptacją, FUKF_D - rozmyty bezśladowy filtr Kalmana z dynamiczną adaptacją.



Rys.3. Struktury systemów rozmytych wprowadzających statyczną (a) i dynamiczną (b) adaptację wybranych wyrazów q_{44} i q_{55}



Rys. 4. Zastosowane funkcje przynależności zmiennych wejściowych - dla statycznej (a) i dynamicznej adaptacji (a, b)

Przedstawione zestawienie wskazuje na poprawę wszystkich wartości poza iloczynem błędu estymacji prędkości silnika i jego pochodnej. Świadczy to o dalszych możliwościach wprowadzania adaptacji pozostałych wyrazów macierzy kowariancji filtra Kalmana, prowadzących do poprawy jakości estymacji wszystkich wielkości. Przedstawienie tego typu badań planowane jest w przyszłych pracach autora. W niniejszej pracy przedstawiono przebiegi związane z pracą algorytmu FUKF z dynamiczną adaptacją. Ze względu na zbliżone właściwości algorytmu ze statyczną i dynamiczną adaptacją wybrano wersję cechującą się mniejszymi wartościami poszczególnych składników funkcji celu. Wprowadzenie adaptacji spowodowało uzyskanie poprawy jakości estymacji wszystkich wielkości w stanach statycznych układu napędowego. W stanach dynamicznych pogorszeniu uległa jakość estymacji prędkości silnika i maszyny roboczej oraz momentu skrętnego, natomiast poprawie momentu obciążenia i parametru T_2 . Zwiększone wartości błędów estymacji momentu skrętnego i momentu obciążenia, szczególnie widoczne w stanach statycznych związane są z występowaniem momentów tarcia, które nie zostały uwzględnione w rozszerzonym wektorze stanu układu (10), stosowanym w badanych algorytmach. Momenty tarcia występowały w modelu symulacyjnym obiektu oraz w rzeczywistym układzie laboratoryjnym.

W celu weryfikacji badań symulacyjnych i rozważań teoretycznych przeprowadzono testy eksperymentalne zaproponowanego rozwiązania. Badania te zostały zrealizowane na stanowisku składającym się z dwóch maszyn prądu stałego o mocy 500 W, połączonych sprężystym wałem o długości 600 mm i średnicy 6 mm. Silnik napędowy zasilany był za pomocą przekształtnika energoelektronicznego w układzie mostka H. Obciążenie układu zrealizowano poprzez zastosowanie układu

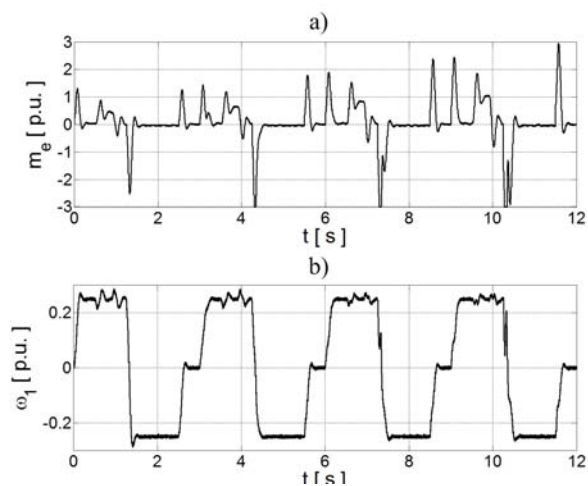
modulatora rezystancji. Algorytm sterowania układu napędowego wraz z badanymi obserwatorami, zapewniającymi estymację jego zmiennych stanu i parametru T_2 , zaimplementowano na platformie sprzętowej z procesorem sygnałowym dSpace DS 1103. Do pomiarów obu prędkości wykorzystano enkodery o rozdzielczości 36000 impulsów na obrót. Parametry pętli regulacji momentu elektromagnetycznego dobrano w sposób umożliwiający szybką kontrolę tej wielkości. Strukturę sterowania testowano w trybie nawrotnym układu napędowego. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 8. Podczas rozruchu i nawrotu widoczny jest wpływ układu uniemożliwiającego jednoczesną estymację momentu obciążenia i parametru T_2 . Maszyna obciążająca została wyposażona w dodatkową tarczę zwiększającą jej moment bezwładności. Praca struktury regulacji wraz z algorytmem FUKF z dynamiczną adaptacją rozpoczyna się od błędnej wartości parametru T_2 równej jego wartości znamionowej ($T_{2N} = 0,203$ s), co skutkowało błędnemu doborowi jej współczynników k_i , k_p , k_1 , k_2 , k_{L1} . Kolejną następuje estymacja zmiennych stanu, parametru T_2 i przestrojenie struktury regulacji. Analiza wyników badań eksperymentalnych wskazuje na prawidłową pracę układu.

Tabela 1. Zestawienie znormalizowanych wartości pierwiastków kwadratowych poszczególnych składników funkcji celu

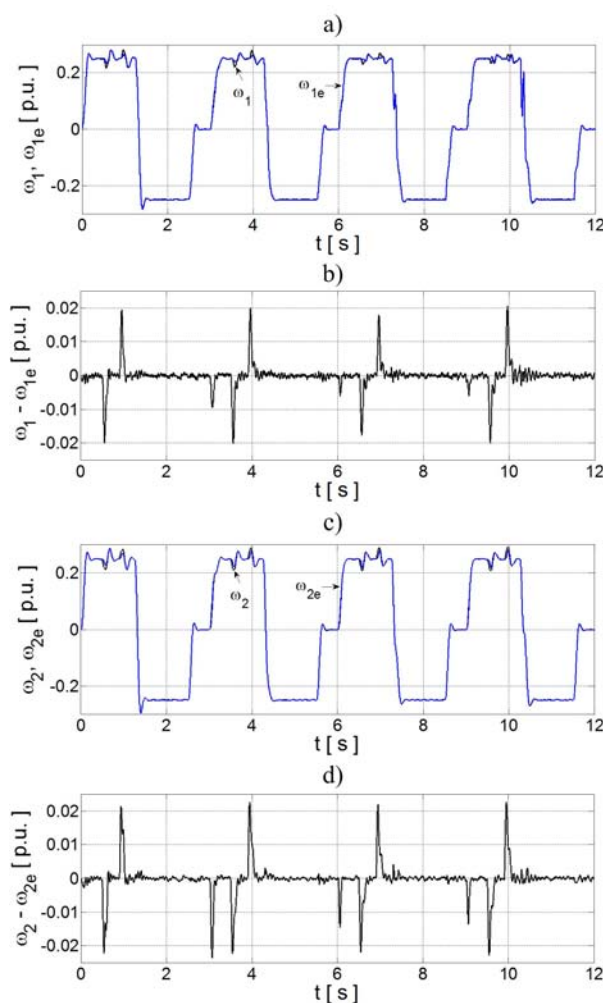
Metoda	$\frac{\delta\omega_1 \cdot \delta\dot{\omega}_1}{n}$	$\frac{\delta\omega_2 \cdot \delta\dot{\omega}_2}{n}$	$\frac{\delta m_s \cdot \delta \dot{m}_s}{n}$	$\frac{\delta m_L \cdot \delta \dot{m}_L}{n}$	$\frac{\delta T_2 \cdot \delta \dot{T}_2}{n}$
	[p.u]	[p.u]	[p.u]	[p.u]	[s]
UKF	9,65	13,53	1985,89	4922,67	477,96
FUKF _s	12,19	11,49	1660,17	3694,77	209,89
FUKF _D	11,76	11,31	1531,96	3658,83	186,49

Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z zastosowaniem rozmytego bezśladowego filtra Kalmana w adaptacyjnej strukturze sterowania układu dwumasowego o zmiennym momencie bezwładności maszyny roboczej. Opisano modele matematyczne rozważanego układu, filtra Kalmana i strukturę sterowania. Omówiono sposób doboru wartości wyrazów macierzy Q i R klasycznego algorytmu UKF i wartości singletonów zaprojektowanych systemów rozmytych, wprowadzających statyczną i dynamiczną adaptację wybranych wyrazów q_{44} i q_{55} macierzy kowariancji Q . Zaprezentowano struktury tych systemów.

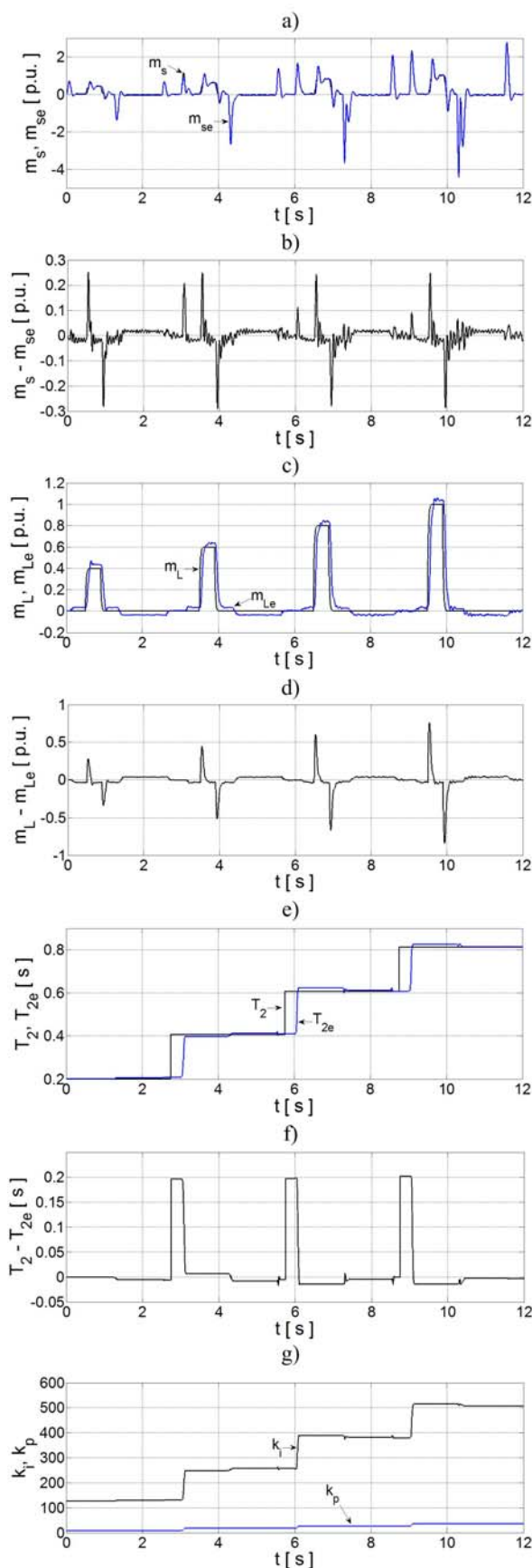


Rys.5. Sygnały wejściowe algorytmu FUKF_D: momentu elektromagnetycznego (a) i prędkości silnika napędowego (b)

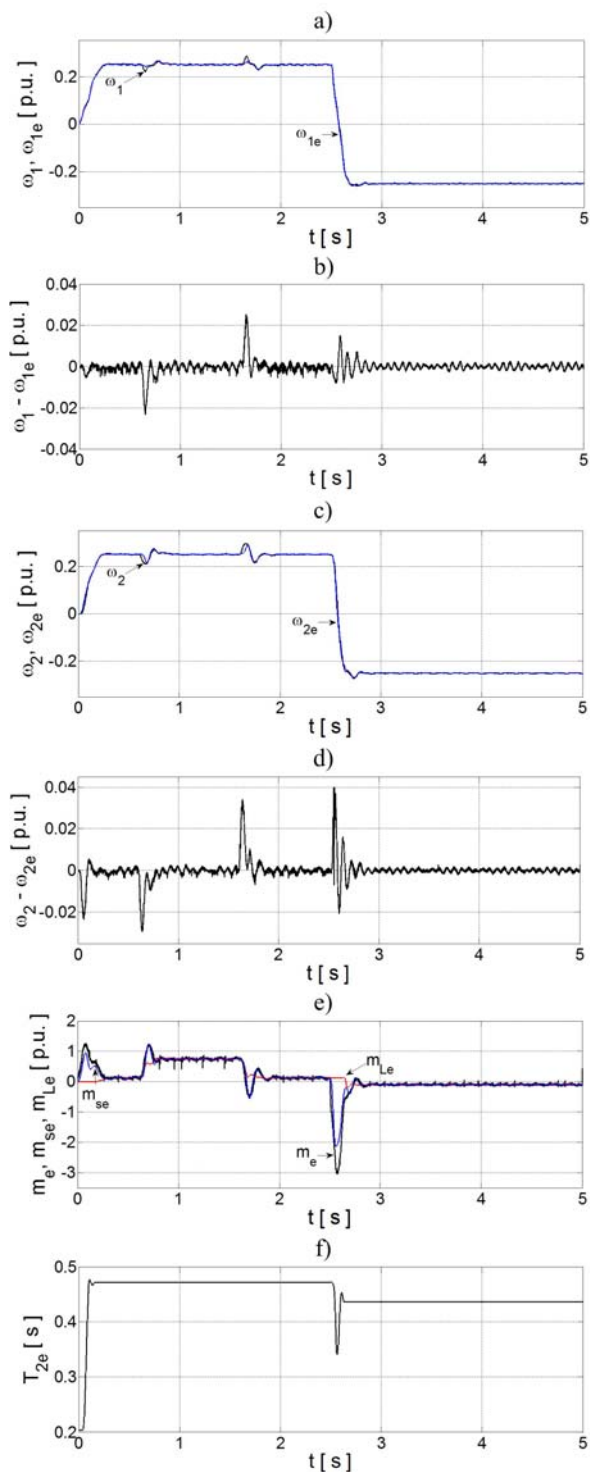


Rys.6. Przebiegi rzeczywistych i estymowanych zmiennych stanu oraz błędów estymacji: prędkości silnika (a, b) i prędkości maszyny roboczej (c, d) w przypadku wykorzystania algorytmu FUKF_D

Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych układu wykorzystującego algorytm rozmytego bezśladowego filtra Kalmana z dynamiczną adaptacją. Przeprowadzono porównanie badanych metod. Badania symulacyjne i rozważania teoretyczne zostały zweryfikowane poprzez testy eksperymentalne. Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:



Rys.7. Przebiegi rzeczywistych i estymowanych wielkości oraz błędów estymacji: momentu skrętnego (a, b), momentu obciążenia (c, d), stałej czasowej maszyny roboczej (e, f) i wzmocnień regulatora prędkości (g) w przypadku wykorzystania algorytmu FUKF_D



Rys.8. Przebiegi eksperymentalne rzeczywistych i estymowanych wielkości oraz błędów estymacji: prędkości silnika (a, b) i maszyny roboczej (c, d), momentów: elektromagnetycznego, skrętnego i obciążenia (e), stałej czasowej maszyny roboczej (f)

- zastosowanie adaptacyjnej struktury sterowania, z dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi od momentu skrętnego i różnicy prędkości oraz jednym pomocniczym sprzężeniem zwrotnym od momentu obciążenia, zapewnia efektywne tłumienie drgań skrętnych badanego układu, pomimo zmiennej wartości momentu bezwładności maszyny roboczej,

- algorytm bezśladowego filtra Kalmana zapewnia zadowalającą jakość estymacji wszystkich rozpatrywanych wielkości w przypadku nieziennej wartości momentu bezwładności maszyny roboczej. W układzie o jego zmiennej wartości występują zmiany błędów estymacji wszystkich wielkości,
- zastosowanie zaprojektowanych systemów rozmytych wprowadzających statyczną i dynamiczną adaptację wybranych wyrazów q_{44} i q_{55} umożliwia minimalizację wyżej wymienionej wady, co pozytywnie wpływa na pracę struktury regulacji,
- wykorzystanie algorytmu hybrydowego w procesie optymalizacji filtrów Kalmana pozwala na uzyskanie zadowalających wyników pracy obserwatora, pod warunkiem prawidłowego sformułowania postaci funkcji celu.

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

Autor: mgr inż. Krzysztof Drózdź; krzysztof.drozd@pwr.edu.pl; Politechnika Wroclawska; Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych; 50-370 Wrocław, ul. Smoluchowskiego 19

LITERATURA

- [1] Wang C., Yang M., Zheng W., Long J., Xu D., Vibration Suppression with Shaft Torque Limitation Using Explicit MPC-PI Switching Control in elastic drive systems, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, PP (2015), n.99, 1-12
- [2] Khan I.U., Dhaouadi R., Robust Control of Elastic Drives Through Immersion and Invariance, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 62 (2015), n.3, 1572-1580
- [3] Ran C., Shuanghong W., Jianbo S., Speed control with vibration suppression of two-inertia servo system based on resonance ratio control, 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), (2015), 2227-2231
- [4] White W.N., Zhichao Y., Lucero C., Active damping of torsional resonance in wind turbine drivetrains, 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), (2014), 1957-1963
- [5] Muszynski R., Deskur J., Damping of Torsional Vibrations in High-Dynamic Industrial Drives, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 57 (2010), n.2, 544-552
- [6] Szabat K., Serkies P. J., Zastosowanie sterowania predykcyjnego w układzie napędowym z połączeniem sprzężystym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 2, 380-383
- [7] Paul P., Muszyński R., Wpływ dodatkowych sprzężeń zwrotnych na tłumienie drgań skrętnych w układzie napędowym z połączeniem sprzężystym o dużej dynamice, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 4, 53-58
- [8] Sieklucki G., Tondos M., Pracownik A., Metoda regulacji o zmiennej strukturze dla dwumasowego układu napędowego, *Elektrotechnika i Elektronika*, (2007), nr 2, 225-230
- [9] Szabat K., Orłowska-Kowalska T., Extended Kalman filters in the control structure of two-mass drive system, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 54 (2006), n.3, 315-325
- [10] Szabat K., Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprzężystym, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*, 61 (2008), nr 19
- [11] Zawirski K., Janiszewski D., Muszyński R., Unscented and extended Kalman filters study for sensorless control of PM synchronous motors with load torque estimation, *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, 61 (2013), n.4, 793-801