

Zastosowanie bezśladowego filtra Kalmana w sterowaniu adaptacyjnym układu dwumasowego

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienia związane z zastosowaniem bezśladowego filtra Kalmana w sterowaniu adaptacyjnym elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym o zmiennym momencie bezwładności maszyny roboczej. W celu tłumienia drgań skrętnych wykorzystano strukturę sterowania adaptacyjnego z dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi: od momentu skrętnego, różnicy prędkości oraz z pomocniczym sprzężeniem zwrotnym od momentu obciążenia. Zastosowany obserwator zapewnia odtwarzanie zmiennych stanu i parametru rozpatrywanego układu napędowego, niezbędnych do praktycznej realizacji zastosowanej struktury sterowania. Po krótkim przeglądzie literatury przedstawiono model matematyczny układu dwumasowego, omówiono strukturę sterowania i algorytm bezśladowego filtra Kalmana. Następnie przedstawiono wyniki badań symulacyjnych. Rozważania teoretyczne i badania symulacyjne zostały zweryfikowane poprzez testy na stanowisku laboratoryjnym.

Abstract. In the paper issues related to an application of the unscented Kalman filter in an adaptive control structure of the electric drive systems with elastic joint and changeable inertia of the load machine are presented. In order to damping of the torsional vibrations an adaptive control structure with two additional feedbacks: from the shaft torque, speed difference and with an auxiliary feedback from the load torque is applied. The observer provides an estimation of the state variables and parameter of the considered drive system. These values are necessary to the practical implementation of the adaptive control structure. After short review of the literature, the mathematical model of the two-mass system, the control structure and the unscented Kalman filter are described. Next, the simulation results are presented. Theoretical considerations and simulation studies were verified by tests on a laboratory set-up. (**Application of the unscented Kalman filter in an adaptive control 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

Wiele nowoczesnych przemysłowych elektrycznych układów napędowych składa się z typowych elementów, którymi są: silnik napędowy, maszyna robocza, połączenie mechaniczne (np. wał napędowy), przekształtnik energoelektroniczny oraz układ sterowania. Często ich część mechaniczna jest pomijana podczas procesu projektowania struktury sterowania. Traktowane są jako układy jednomasowe. Nieuwzględnienie skończonej sztywności połączenia silnika napędowego z maszyną roboczą, przy jednoczesnym występowaniu zjawisk zachodzących podczas pracy prawidłowo wykonanego i niewyeksplotowanego układu napędowego może prowadzić do wzbudzenia drgań skrętnych. Omawiane zjawiska to: zmienność prędkości, momentu obciążenia, momentu bezwładności maszyny roboczej, tętnienia momentu elektromagnetycznego i jego ograniczenia [1]. Podczas wymuszania dynamicznych zmian pracy napędu do sprężystego elementu łączącego silnik z maszyną roboczą przykładane są znaczne wartości momentu napędowego, co jest przyczyną wzbudzenia drgań skrętnych. Ich występowanie prowadzi do nieefektywnej pracy układu oraz skrócenia żywotności jego części mechanicznych [2]-[6]. Dodatkowe zjawiska będące przyczyną wzbudzenia omawianych drgań podczas dynamicznych zmian pracy napędu, występujące w źle wykonanych lub wyeksplotowanych układach to: występowanie luzów i niedokładności połączeń mechanicznych, zmienność momentów tarcia, niewspółosiowość połączenia silnika z maszyną roboczą, niewyważenie wału i stany awaryjne napędu [1].

W literaturze opisanych jest wiele struktur sterowania omawianych układów napędowych. Najprostszym i efektywnym rozwiązaniem jest zastosowanie kaskadowej struktury regulacji z regulatorem PI i dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi [1]. Istnieje możliwość wykorzystania bardziej innowacyjnych podejść, mających podstawy w zaawansowanej teorii sterowania, takich jak: struktura sterowania z regulatorem stanu, sterowanie ślizgowe, predykcyjne i inne [1], [6]-[9].

Jednym z najbardziej efektywnych podejść projektowych dla układów napędowych o zmiennych parametrach w czasie pracy jest zastosowanie sterowania adaptacyjnego. Z tego powodu w niniejszej pracy wykorzystano adaptacyjną strukturę sterowania z dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi: od momentu skrętnego oraz różnicy pomiędzy prędkościami silnika napędowego i maszyny roboczej. W celu poprawienia przebiegów prędkości, podczas pojawienia się zewnętrznego obciążenia układu, zastosowano również pomocnicze sprzężenie zwrotne od momentu obciążenia. Praktyczna realizacja omawianej adaptacyjnej struktury regulacji wymaga dostępności informacji o niemierzalnych zmiennych stanu oraz, co ważne, o zmiennej w czasie wartości parametru układu. W tym celu zaimplementowano obserwator w postaci bezśladowego filtra Kalmana.

Metody estymacji można podzielić na dwie główne grupy [9]-[12]. Do pierwszej z nich zalicza się metody oparte na modelu matematycznym rozpatrywanego układu, który zawarty jest w algorytmie obserwatora. Najpopularniejszym przykładem takiego rozwiązania jest obserwator Luenbergera, który cechuje się relatywnie prostą strukturą i jasną metodą projektowania. Do bardziej skomplikowanych algorytmów zalicza się filtry Kalmana, jednak ich zastosowanie może zapewnić znacznie dokładniejsze oszacowanie aktualnego stanu układu. Do prawidłowego działania takich obserwatorów wymagany jest właściwy dobór wyrazów macierzy kowariancji Q i R , co nie jest prostym zadaniem. Kolejną techniką zaliczaną do omawianej grupy jest stosowanie obserwatorów o przesuwym oknie (*Moving Horizon Observer*). Wymaga ona jednak rozwiązywania problemów optymalizacji w trybie *on-line*. Drugą grupą są metody oparte na sztucznej inteligencji. Klasycznymi przykładami są sztuczne sieci neuronowe, systemy rozmyte i neuronowo-rozmyte. Ich zastosowanie wymaga zebrania danych w postaci próbek uczących pochodzących z pomiarów działającego systemu w różnych warunkach pracy i przeprowadzenia procesu uczenia. Z tych powodów nie są to popularne metody w aplikacjach przemysłowych [10].

Celem niniejszej pracy jest opracowanie algorytmu obserwatora w postaci bezśladowego filtra Kalmana (ang. *Unscented Kalman Filter*) dla adaptacyjnej struktury sterowania układu dwumasowego oraz przeprowadzenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych, dotyczących jego praktycznego zastosowania. Ze względu na obecność zmiennej wartości parametru rozpatrywanego układu napędowego w czasie pracy, w celu zapewnienia estymacji jego zmiennych stanu i wspomnianego parametru można wykorzystać dwa rodzaje filtra Kalmana: rozszerzony filtr Kalmana (ang. *Extended Kalman Filter*) i zastosowany w pracy bezśladowy filtr Kalmana. Algorytm UKF stanowi nowatorskie podejście do klasycznej teorii filtra Kalmana. Charakteryzuje się ono sposobem obliczeń bazującym na zależnościach statystycznych dotyczących zmiennych stanu układów dynamicznych, co pozwoliło na uproszczenie algorytmu estymacji w porównaniu do rozszerzonego filtra Kalmana (ang. *Extended Kalman Filter*) [13]. Głównym przeznaczeniem algorytmu EKF jest estymacja zmiennych stanu i parametrów systemów o słabszych nieliniowościach i nie sprawdza się on w systemach silnie nieliniowych. Zastosowanie przekształcenia bezśladowego w algorytmie UKF pozwoliło wyeliminować ten problem. W algorytmie tym przyjmuje się założenie, że łatwiej estymować rozkład prawdopodobieństwa niż funkcję nieliniową, jak w przypadku algorytmu EKF. Rozkład ten w dalszym ciągu opisuje gaussowska zmienna losowa reprezentowana przez deterministycznie wyznaczone ważne punkty sigma. Punkty te podlegają transformacjom nieliniowym bazującym na modelu dynamiki i obserwacji rozważanego obiektu. Liczba punktów sigma w najprostszej wersji tego algorytmu wynosi $n+1$, a w typowo spotykanych rozwiązaniach jest równa $2n+1$ [14]. W przedstawionym w niniejszej pracy przypadku w rzeczywistym układzie laboratoryjnym występują nieliniowości związane z tarciami, zachodzącym po stronie silnika napędowego i maszyny obciążającej. Fakt ten wraz z wcześniej wspomnianym uproszczeniem algorytmu estymacji są powodami zastosowania bezśladowego filtra Kalmana.

Model matematyczny obiektu badań i struktura sterowania

Przedmiotem badań rozpatrywanym w niniejszej pracy jest elektryczny układ napędowy z połączeniem sprzężystym. W badaniach przyjęto powszechnie stosowany model układu dwumasowego z bezinercyjnym połączeniem sprzężystym [1]. Model ten sformułowano w jednostkach względnych, w poniżej przedstawionej postaci:

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

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

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

gdzie: ω_1 - prędkość silnika, ω_2 - prędkość maszyny roboczej, m_e - moment elektromagnetyczny, m_s - moment skrzętny, m_L - moment obciążenia, T_1 - mechaniczna stała czasowa silnika, T_2 - mechaniczna stała czasowa maszyny roboczej, T_c - stała sprzężystości. Znamionowe wartości parametrów analizowanego układu są następujące: $T_1 = T_2 = 203$ ms, $T_c = 1,2$ ms.

W przeprowadzonych badaniach zastosowano strukturę sterowania adaptacyjnego z regulatorem PI, dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi: od momentu

skrzętnego (k_i) oraz różnicy prędkości (k_2) i pomocniczym sprzężeniem zwrotnym od momentu obciążenia (k_{L1}). Schemat blokowy omawianej struktury regulacji przedstawiono na rysunku 1. Wzmocnienia regulatora oraz poszczególnych sprzężeń zwrotnych dobierane są w trybie *on-line*, na podstawie wyprowadzonych zależności za pomocą metody lokowania biegunów zamkniętego układu regulacji, które przedstawiono poniżej [1]:

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

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

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

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

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

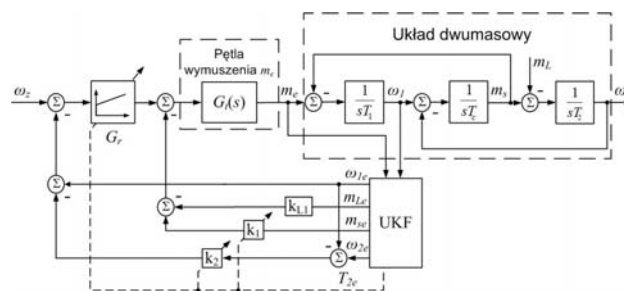
gdzie: ω_r - zadana pulsacja rezonansowa, ξ_z - zadany współczynnik tłumienia układu, k_i , k_p - wzmocnienia całkujące i proporcjonalne regulatora prędkości. Badania przeprowadzono zakładając następujące wartości pulsacji rezonansowej oraz współczynnika tłumienia układu: $\omega_r = 40$ s⁻¹, $\xi_z = 0,7$. Transmitancję zastosowanego regulatora prędkości przedstawiono poniżej:

$$(9) \quad G_r(s) = k_p + \frac{k_i}{s}$$

W zaprezentowanej strukturze sterowania założono występowanie zoptymalizowanej pętli wymuszenia momentu elektromagnetycznego, która opisana jest poniższą przedstawioną transmitancją:

$$(10) \quad G_t(s) = \frac{1}{0,002s + 1}$$

Takie podejście pozwala na uwzględnienie opóźnień i inercji obwodu regulacji tej wielkości w syntezie bezśladowego filtra Kalmana.



Rys. 1. Schemat blokowy adaptacyjnej struktury sterowania

Bezśladowy filtr Kalmana

W przypadku występowania zmiennej w czasie wartości parametru T_2 , konieczne jest rozszerzenie wektora stanu rozpatrywanego układu o odwrotność tego parametru i o niemierzalny moment obciążenia m_L . Po uwzględnieniu tych warunków rozszerzony wektor stanu przyjmuje następującą postać:

$$(11) \quad \mathbf{x}_R(t) = \left[\omega_1(t) \quad \omega_2(t) \quad m_s(t) \quad m_L(t) \quad \frac{1}{T_2(t)} \right]^T$$

Równania stanu i wyjścia układu można przedstawić w poniższej formie:

$$(12a) \quad \frac{d}{dt} \mathbf{x}_R(t) = \mathbf{A}_R \left(\frac{1}{T_2}(t) \right) \mathbf{x}_R(t) + \mathbf{B}_R \mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t)$$

$$(12b) \quad \mathbf{y}_R(t) = \mathbf{C}_R \mathbf{x}_R(t) + \mathbf{v}(t)$$

gdzie: $\mathbf{w}(t)$, $\mathbf{v}(t)$ - szumy białe występujące w układzie. Macierz \mathbf{A}_R wymaga aktualizacji w każdym kroku obliczeniowym, ze względu na jej zależność od zmiennej w czasie wartości parametru T_2 . Aktualizacja przeprowadzana jest na podstawie estymowanej wartości tego parametru. Macierze stanu, sterowania oraz wyjścia przedstawiono poniżej:

$$(13) \quad \mathbf{A}_R \left(\frac{1}{T_2}(t) \right) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{-1}{T_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_2(t)} & \frac{-1}{T_2(t)} & 0 \\ \frac{1}{T_c} & \frac{-1}{T_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

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

Wektory wejściowe i wyjściowe rozpatrywanego układu oraz bezśladowego filtru Kalmana to:

$$(14) \quad \mathbf{u} = m_e, \quad \mathbf{y} = \omega_1$$

Równania (11a) i (11b) podlegają dyskretyzacji z krokiem $T_s = 500 \mu s$, po czym rozpoczyna się proces estymacji za pomocą zaimplementowanego algorytmu bezśladowego filtru Kalmana, który można przedstawić w następujących krokach:

1. Inicjalizacja:

$$(16) \quad \hat{\mathbf{x}}_R(0|0) = E[\mathbf{x}(0)]$$

$$(17) \quad \mathbf{P}(0|0) = \mathbf{P}(0)$$

2. Generacja $2n+1$ punktów sigma i ich wag:

$$(18) \quad \begin{aligned} \chi_0(k|k) &= \hat{\mathbf{x}}_R(k|k), \quad \mathbf{W}_0(k+1|k) = \frac{\kappa}{n+\kappa} \\ \chi_i(k|k) &= \hat{\mathbf{x}}_R(k|k) + \left[\sqrt{(n+k)\mathbf{P}(k|k)} \right] \\ \mathbf{W}_i &= \frac{\kappa}{2(n+\kappa)} \quad \text{dla } i=1, \dots, n \\ \chi_{i+n}(k|k) &= \hat{\mathbf{x}}_R(k|k) - \left[\sqrt{(n+k)\mathbf{P}(k|k)} \right] \\ \mathbf{W}_{i+n} &= \frac{\kappa}{2(n+\kappa)} \quad \text{dla } i=1, \dots, n \end{aligned}$$

3. Transformacja nieliniowa $2n+1$ punktów sigma zgodnie z modelem dynamiki:

$$(19) \quad \chi_i(k+1|k) = f[\chi_i(k|k), k] \quad \text{dla } i=1, \dots, 2n$$

4. Predykcja wektora stanu (aktualizacja czasu):

$$(20) \quad \hat{\mathbf{x}}_R(k+1|k) = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i \chi_i(k+1|k)$$

5. Predykcja macierzy kowariancji:

$$(21) \quad \mathbf{P}(k+1|k) = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i [\chi_i(k+1|k) - \hat{\mathbf{x}}_R(k+1|k)] \cdot [\chi_i(k+1|k) - \hat{\mathbf{x}}_R(k+1|k)]^T + \mathbf{Q}(k)$$

6. Predykcja wektora wyjściowego:

$$(22) \quad \hat{\mathbf{y}}_R(k+1|k) = \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i [\chi_i(k+1|k), k]$$

7. Predykcja macierzy kowariancji wzajemnych:

$$(23) \quad \begin{aligned} \mathbf{P}_{xy}(k+1|k) &= \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i [\chi_i(k+1|k) - \hat{\mathbf{x}}_R(k+1|k)] \cdot \\ &\quad \cdot \{h[\chi_i(k+1|k) - \hat{\mathbf{y}}_R(k+1|k)]\}^T \\ \mathbf{P}_{yy}(k+1|k) &= \sum_{i=0}^{2n} \mathbf{W}_i \cdot \{h[\chi_i(k+1|k), k] - \hat{\mathbf{y}}_R(k+1|k)\} \\ &\quad \cdot \{h[\chi_i(k+1|k), k] - \hat{\mathbf{y}}_R(k+1|k)\}^T \end{aligned}$$

$$\mathbf{S}(k+1) = \mathbf{P}_{yy}(k+1|k) + \mathbf{R}(k+1)$$

8. Obliczenie wzmacnienia Kalmana:

$$(24) \quad \mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}_{xy}(k+1|k) \mathbf{S}^{-1}(k+1)$$

9 Korekcja wektora stanu:

$$(25) \quad \begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_R(k+1|k+1) &= \hat{\mathbf{x}}_R(k+1|k) + \\ &\quad + \mathbf{K}(k+1) [\mathbf{y}_R(k+1) - \hat{\mathbf{y}}_R(k+1|k)] \end{aligned}$$

10. Korekcja macierzy kowariancji:

$$(26) \quad \mathbf{P}(k+1|k+1) = \mathbf{P}(k+1|k) - \mathbf{K}(k+1) \mathbf{S}(k+1) \mathbf{K}^T(k+1)$$

11. Powrót do pierwszego kroku.

W przypadku rozważanego układu napędowego macierze kowariancji \mathbf{Q} i \mathbf{R} filtru Kalmana przyjmują następującą postać:

$$(27) \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{55} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = [r]$$

Wymiar macierzy \mathbf{Q} zależy od rozmiaru wektora stanu, natomiast wymiar macierzy \mathbf{R} od rozmiaru wektora wyjściowego. Wartości wyrazów tych macierzy dobrano

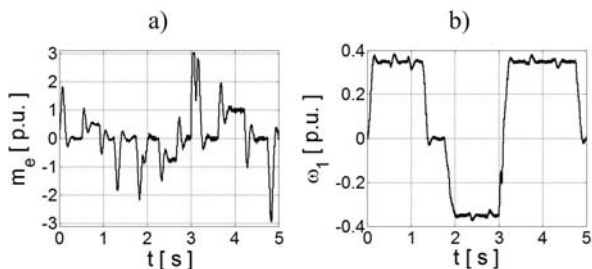
podczas badań symulacyjnych, za pomocą algorytmu genetycznego minimalizującego poniższą funkcję celu:

$$(26) \quad F = \frac{1}{n} \left[\left(\sum_{i=1}^n |\omega_{i1} - \omega_{i1e}| \right) + \left(\sum_{i=1}^n |\omega_{i2} - \omega_{i2e}| \right) + \left(\sum_{i=1}^n |m_{is} - m_{ise}| \right) + \left(\sum_{i=1}^n |m_{iL} - m_{iLe}| \right) + \left(\sum_{i=1}^n |T_{i2} - T_{i2e}| \right) \right]$$

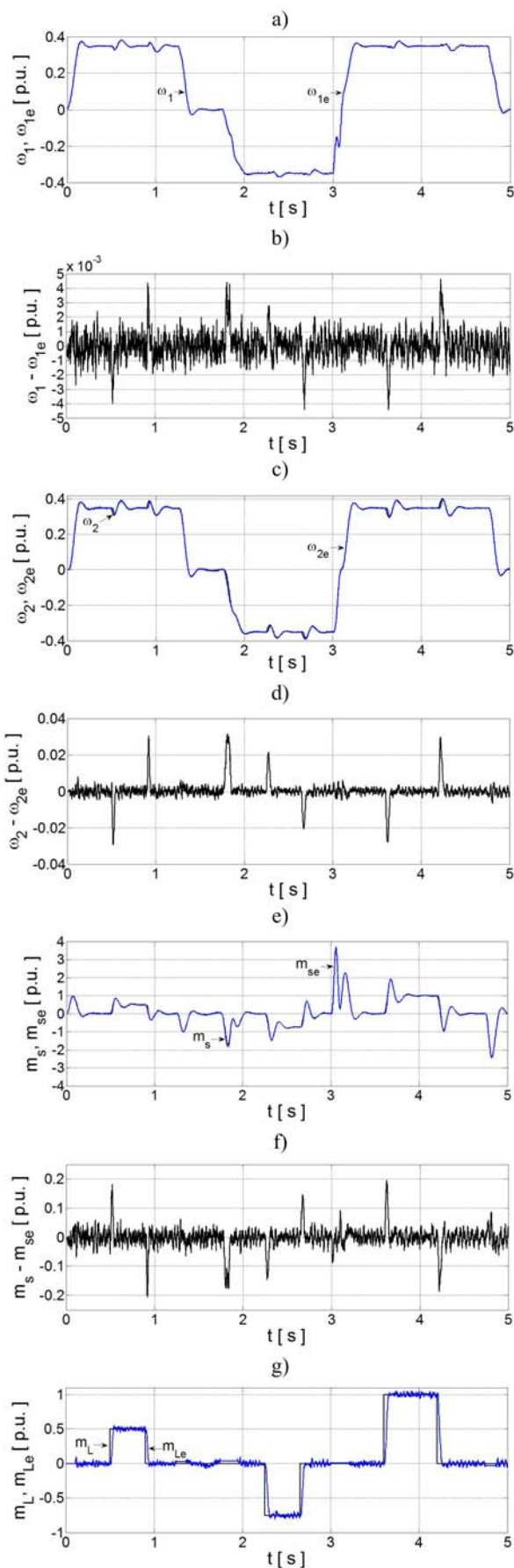
gdzie: x_i - wartość rzeczywista, x_{ie} - wartość estymowana, n - liczba próbek. W modelu symulacyjnym, utworzonym w środowisku Matlab/Simulink, przyjęto następujące założenia: wartość ograniczenia zadanego momentu elektromagnetycznego wynosiła $3m_{eN}$, sygnał momentu elektromagnetycznego zakłócono szumem białym o wariancji równej $4E-5$, a sygnał prędkości silnika szumem białym o wariancji równej $5E-6$. Uwzględniono dyskretny pomiar prędkości, poprzez zastosowanie kwantyzacji tego sygnału, i wcześniej opisane opóźnienia pętli wymuszenia momentu elektromagnetycznego. Prawidłowy dobór wyrazów macierzy kowariancji filtra Kalmana, realizowany przez algorytmy optymalizacji, wymaga uwzględnienia w postaci funkcji celu błędów estymacji wszystkich wielkości. Takie podejście umożliwia minimalizację ich poszczególnych wartości, przy jednoczesnym zapewnieniu dużej dynamiki odpowiedzi obserwatora. Powyższa funkcja celu uwzględnia sumy modułów dyskretnych błędów estymacji zmiennych stanu i parametru występujących w rozszerzonym wektorze stanu (11) rozpatrywanego układu. W celu znormalizowania jej wartości, suma poszczególnych składników została podzielona przez liczbę próbek.

Wyniki badań

Badania symulacyjne rozpoczęto od procesu doboru wartości wyrazów macierzy Q i R . Następnie testowano obserwator w zamkniętej pętli sterowania, gdzie wartość prędkości zadanej to $\omega_z = 0,35\omega_N$ w trybie nawrotnym. W algorytmie bezśladowego filtra Kalmana zastosowano dodatkowy układ uniemożliwiający jednoczesną estymację wartości momentu obciążenia oraz stałej czasowej maszyny roboczej. Spowodowane jest to faktem nieobserwowalności takiego układu w przypadku jednoczesnej estymacji obu wielkości. Wybrane wyniki badań przedstawiono na rysunkach 2, 3 i 4. Ze względu na znane właściwości wykorzystanej w pracy struktury sterowania adaptacyjnego dotyczących tłumienia drgań skrętnych, opisanych w [1], podczas niniejszych badań skupiono się na dokładności odtwarzania zmiennych stanu i parametru rozpatrywanego układu napędowego. Rysunek 2 przedstawia przebiegi sygnałów wejściowych algorytmu

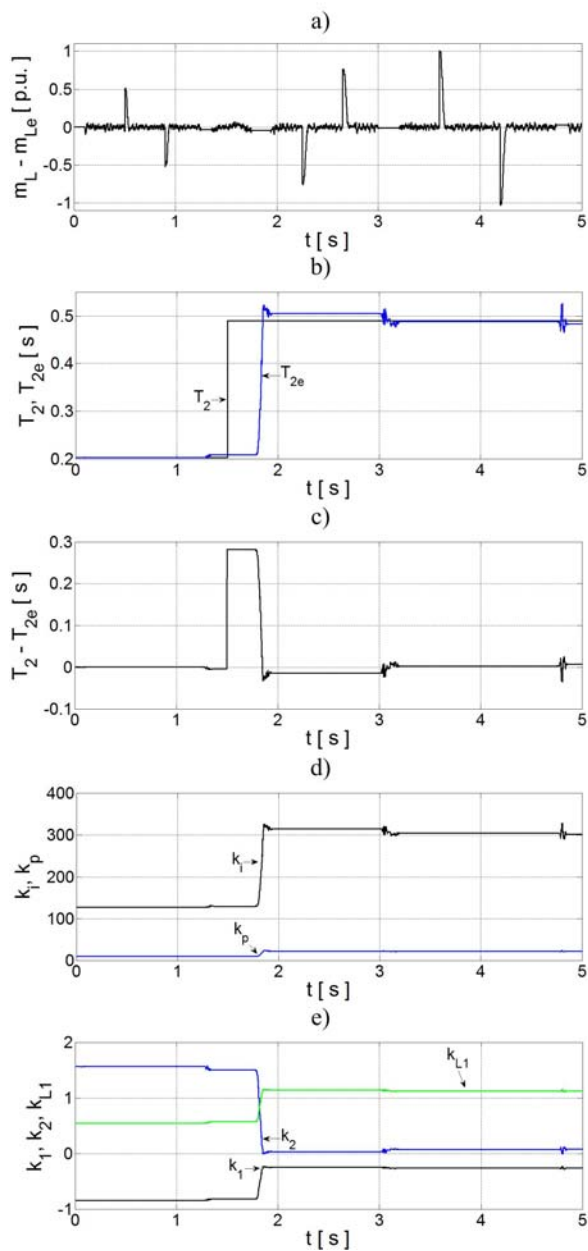


Rys. 2. Przebiegi symulacyjne sygnałów wejściowych UKF: momentu elektromagnetycznego (a), prędkości silnika (b)

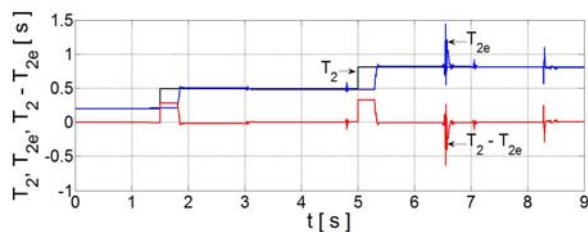


Rys. 3. Przebiegi symulacyjne rzeczywistych i estymowanych zmiennych stanu oraz błędów estymacji: prędkości silnika (a, b), prędkości maszyny roboczej (c, d), momentu skrętnego (e, f), momentu obciążenia (g)

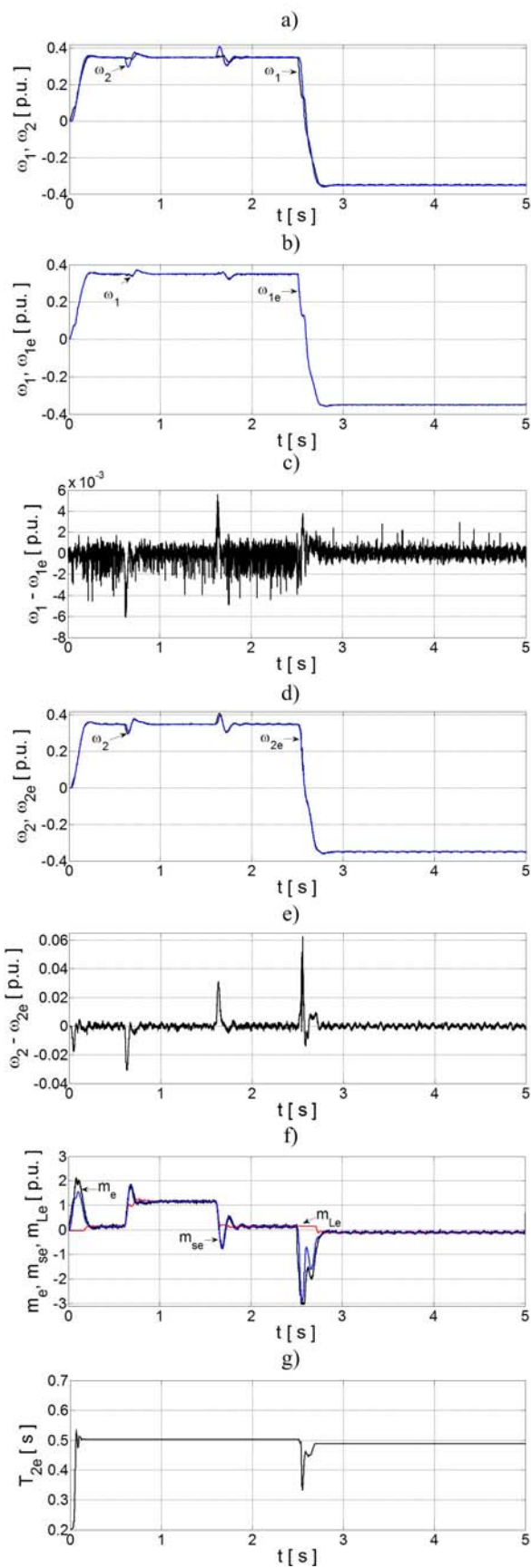
UKF: momentu elektromagnetycznego i prędkości silnika, na podstawie których obliczane są wartości zmiennych stanu i parametru obserwowanego obiektu. Na rysunkach 3 i 4 zobrazowano przebiegi tych wielkości wraz z ich błędami estymacji oraz przebiegami współczynników struktury sterowania, których wartości wyznaczone są na podstawie



Rys. 4. Przebiegi symulacyjne: błędów estymacji momentu obciążenia (a), rzeczywistej i estymowanej wartości stałej czasowej maszyny roboczej (b) oraz błędów estymacji (c), współczynników struktury sterowania (d, e)



Rys. 5. Przebiegi symulacyjne wartości rzeczywistej, estymowanej i błędów estymacji stałej czasowej maszyny roboczej



Rys. 6. Przebiegi eksperymentalne wielkości rzeczywistych, estymowanych oraz błędów estymacji: prędkości silnika i maszyny roboczej (a, b, c) i maszyny roboczej (d, e), momentów: elektromagnetycznego, skrętnego i obciążenia (f), stałej czasowej maszyny roboczej (g)

estymowanego parametru T_2 . Wartość tego parametru początkowo była równa jego znamionowej wartości, a następnie zwiększono ją w sposób skokowy, co odzwierciedla zamontowanie dodatkowej tarczy zwiększającej moment bezwładności maszyny obciążającej podczas testów eksperymentalnych. Zwiększenie tej wartości spowodowało następujące zmiany błędów estymacji poszczególnych wielkości: zmniejszeniu uległy wartości błędów odtwarzania prędkości silnika, maszyny roboczej i momentu skrętnego, natomiast zwiększeniu uległy wartości błędów estymacji momentu obciążenia i stałej czasowej maszyny roboczej. W przypadku dalszego zwiększania momentu bezwładności maszyny roboczej zjawiska te nasilają się. Rysunek 5 przedstawia taką sytuację, skupiając się na uwidocznieniu wzrostu wartości błędów estymacji parametru T_2 , co ze względu na właściwości filtru Kalmana przekłada się na zmiany wartości błędów estymacji pozostałych wielkości. Prawidłowe odtwarzanie tego parametru ma szczególne znaczenie dla kształtowania momentu elektromagnetycznego w zastosowanej strukturze sterowania adaptacyjnego. Duże wartości błędów jego estymacji mogą doprowadzić do nieprawidłowego sterowania prędkością układu lub do utraty stabilności struktury regulacji. W zastosowanym zakresie zmian tego parametru pracę układu można uznać za prawidłową. Ważnym aspektem odtwarzania tej wielkości jest to, że jest ona możliwa jedynie w stanach dynamicznych, co wynika z modelu matematycznego rozpatrywanego układu (1) - (3). Opisane właściwości determinują konieczność wprowadzenia adaptacji wybranych wyrazów macierzy kowariancji filtru Kalmana. Przedstawienie takich badań planowane jest w przyszłych pracach autora.

Badania eksperymentalne przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym składającym się z dwóch maszyn prądu stałego o mocy 500 W, połączonych sprzężystym wałem o długości 600 mm i średnicy 6 mm. Zasilanie silnika napędowego zrealizowano za pomocą przekształtnika energoelektronicznego w układzie mostka H, natomiast obciążenie poprzez zastosowanie modulatora rezystancji. Algorytmy sterowania i obserwatora zostały zaimplementowane na platformie sprzętowej z procesorem sygnałowym dSpace DS 1103. Pomiary obu prędkości przeprowadzono za pomocą enkoderów o rozdzielczości 36000 impulsów na obrót. Testy te zostały przeprowadzone przy zbliżonych warunkach do badań symulacyjnych i potwierdzają zadowalające rezultaty pracy układu, przy uwzględnieniu założonego zakresu zmian stałej czasowej maszyny roboczej.

Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z zastosowaniem bezśladowego filtru Kalmana w strukturze sterowania adaptacyjnego układu dwumasowego. Opisano model matematyczny rozpatrywanego układu napędowego i strukturę regulacji. Scharakteryzowano zastosowany algorytm bezśladowego filtru Kalmana oraz przedstawiono sposób doboru wartości wyrazów jego macierzy kowariancji Q i R . Zaimplementowany algorytm testowano symulacyjnie i eksperymentalnie w zamkniętej strukturze regulacji. Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- zastosowanie przedstawionej adaptacyjnej struktury sterowania układu dwumasowego umożliwia efektywne tłumienie drgań skrętnych, pomimo zmienności wartości momentu bezwładności maszyny roboczej,
- algorytm UKF zapewnia zadowalającą jakość estymacji wszystkich wielkości w zakresie uwzględnionych zmian parametru T_2 ,

- zastosowanie algorytmów genetycznych w procesie doboru wyrazów macierzy Q i R pozwala na uzyskanie zadowalających rezultatów pracy obserwatora, przy prawidłowym sformułowaniu 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.

Autorzy: mgr inż. Krzysztof Drózdź;

E-mail: krzysztof.drozdz@pwr.edu.pl;

Politechnika Wroclawska; Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych; 50-370 Wrocław, ul. Smoluchowskiego 19

LITERATURA

- [1] 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
- [2] 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.
- [3] Valenzuela M. A., Bentley J. M., Lorenz R. D., Evaluation of Torsional Oscillations in Paper Machine Sections, *IEEE Transaction on Industry Applications*, 41 (2005), n.2, 493-501.
- [4] Vasak M., Peric N., Protective Predictive Control of Electrical Drives with Elastic Transmission, *Proceedings of 13th Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC (2008)*, 2258-2263.
- [5] 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)*, 2227 – 2234.
- [6] Saarakkala S. E., Hinkkanen M., State-Space Speed Control of Two-Mass Mechanical Systems: Analytical Tuning and Experimental Evaluation, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50 (2012), n. 5, 3428-3437
- [7] Szabat K., Serkies P. J., Zastosowanie sterowania predykcyjnego w układzie napędowym z połączeniem sprzężystym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr. 2, 380-383.
- [8] Fuentes E. J., Silva C. A., Yuz J. I., Predictive Speed Control of a Two-Mass System Driven by a Permanent Magnet Synchronous Motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59 (2012), n. 7, 2840-2848
- [9] Orłowska-Kowalska T., Kaminski M., Szabat K., Implementation of a Sliding-Mode Controller With an Integral Function and Fuzzy Gain Value for the Electrical Drive With an Elastic Joint, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57 (2010), n. 4, 1309 – 1317.
- [10] Orłowska-Kowalska T., Szabat K., Neural-Network Application for Mechanical Variables Estimation of a Two-Mass Drive System, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 54 (2007), n. 3, 1352-1364.
- [11] Ruderman M., Maebashi W., Iwasaki M., Semi-dual loop control of two-mass actuator system using Luenberger state observer, *39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, (2013), 6563-6568
- [12] Echchaachouai A., El Hani S., Hammouch A., Guedira S., Extended Kalman filter used to estimate speed rotation for sensorless MPPT of wind conversion chain based on a PMSG, *International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT)*, (2015), 172-177
- [13] Janiszewski D., Bezczytnikowy napęd z silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych oparty na bezśladowym filtrze Kalmana, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 2, 169-174
- [14] Kraszewski T., Czopik G., Technologia szerokopasmowa UWB w lokalizacji obiektów w pomieszczeniach zamkniętych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 8, 186-191