

układ dwumasowy, identyfikacja parametrów, filtr Kalmana

Krzysztof DRÓŹDŹ*

IDENTYFIKACJA PARAMETRÓW UKŁADU DWUMASOWEGO ZA POMOCĄ ROZMYTEGO FILTRU KALMANA

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z identyfikacją parametrów mechanicznych układu dwumasowego, w trybie *online* za pomocą filtrów Kalmana. Podczas procesu identyfikacji uwzględniono jednoczesną regulację prędkości układu realizowaną w strukturze adaptacyjnej z dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi. Do klasycznego algorytmu nieliniowego rozszerzonego filtra Kalmana wprowadzono zaprojektowane systemy rozmyte, których zadaniem była adaptacja wybranych współczynników macierzy Q , przeprowadzana na podstawie aktualnych estymowanych wartości parametrów mechanicznych badanego układu napędowego. Omówiono model matematyczny obiektu badań, nieliniowego rozszerzonego filtra Kalmana i wprowadzone modyfikacje w postaci systemów rozmytych. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, dotyczące obu rodzajów filtra Kalmana, w zamkniętej strukturze sterowania oraz scharakteryzowano sposób doboru współczynników obserwatorów.

1. WPROWADZENIE

Nowoczesne struktury sterowania układów napędowych z połączeniem sprzężystym, do prawidłowej i efektywnej pracy wymagają znajomości wartości parametrów sterowanego obiektu. W przypadku ich nieprawidłowej wartości w algorytmie sterującym, przebiegi dynamiczne układu ulegają pogorszeniu [9]. W związku z tym konieczna jest dokładna identyfikacja parametrów układu napędowego.

Identyfikacja parametrów mechanicznych układów napędowych jest skomplikowanym zagadnieniem, które cieszy się stałym zainteresowaniem ze strony wielu ośrodków badawczych [1]–[4], [6], [9], [11]. Spośród najczęściej wykorzystywanych metod identyfikacji wyróżnić można metody parametryczne i nieparametryczne. Zadanie identyfikacji parametrycznej polega na przyjęciu modelu identyfikowanego obiektu i minimali-

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

zacji różnicy pomiędzy odpowiedziami modelu i obiektu, możliwej dzięki odpowiedniemu doborowi współczynników modelu [2], [8], [9]. W podejściu nieparametrycznym wyznacza się charakterystyki układu na podstawie skończonej liczby pomiarów [2].

Poza metodami identyfikacji parametrów mechanicznych układów dwumasowych typu *off-line* lub przeprowadzanych podczas pierwszego uruchomienia układu. W odróżnieniu od nich istnieją również metody identyfikacji bazujące na obserwatorach pracujących w trybie *on-line* [8]. W celu przeprowadzenia identyfikacji w trybie *on-line* wykorzystać można algorytm nieliniowego rozszerzonego filtru Kalmana [7]. Algorytm ten stanowi typ optymalnej filtracji rekursywnej i może być stosowany w przypadku procesów nieliniowych. Rozwiązanie takie zapewnia możliwość jednoczesnego sterowania układu dwumasowego w zamkniętej strukturze regulacji oraz identyfikacji jego parametrów mechanicznych, w odróżnieniu od innych metod przedstawianych w literaturze, co stanowi zaletę proponowanego rozwiązania [5]. Przy zastosowaniu takiego rozwiązania problematycznym jest dobór wartości współczynników macierzy kowariancji \mathbf{Q} i \mathbf{R} filtru Kalmana. Problem ten jest dodatkowo utrudniony przy uwzględnieniu szerokiego zakresu możliwych do wystąpienia wartości identyfikowanych parametrów.

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z identyfikacją parametrów mechanicznych układu dwumasowego w trybie *on-line* za pomocą zmodyfikowanego algorytmu rozszerzonego filtru Kalmana (rozmytego filtru Kalmana – RFK), przy uwzględnieniu szerokiego zakresu możliwych do wystąpienia wartości identyfikowanych parametrów, co w odróżnieniu od prac znanych z literatury stanowi rozszerzenie badań związanych z omawianym zagadnieniem. Opracowany algorytm przetestowano symulacyjnie w otwartej oraz zamkniętej strukturze sterowania.

2. MODEL MATEMATYCZNY OBIEKTU BADAŃ I STRUKTURA STEROWANIA

Obiektem badań jest układ napędowy z połączeniem sprężystym składający się ze skupionych mas silnika i maszyny roboczej rozmieszczonych na końcach sprężystego wału. Zastosowany rodzaj silnika nie ma znaczenia, ze względu na powszechną znajomość metod sterowania momentem. Do rozważań wykorzystano powszechnie stosowany model układu dwumasowego z bezinercyjnym połączeniem sprężystym [8], [10]. Model ten można opisać poniższymi równaniami stanu w jednostkach względnych:

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

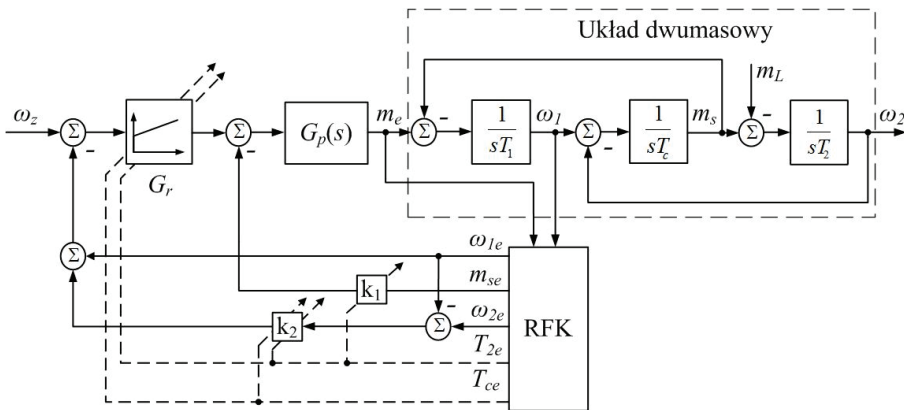
$$\frac{d\omega_2(t)}{dt} = \frac{1}{T_2}(m_s(t) - m_L(t)), \quad (2)$$

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

gdzie:

- ω_1 – prędkość maszyny roboczej,
- m_e – moment elektromagnetyczny,
- m_s – moment skrętny,
- m_L – moment obciążenia,
- T_1 – mechaniczna stała czasowa silnika,
- T_2 – mechaniczna stała czasowa maszyny roboczej,
- T_c – stała czasowa elementu sprzężystego.

W badaniach wykorzystano strukturę sterowania adaptacyjnego z regulatorem PI i dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi: od momentu skrętnego (k_1) oraz różnicy prędkości (k_2) [8]. Schemat omawianej struktury przedstawiono na rysunku 1. W skład struktury sterowania wchodzi: zoptymalizowana pętla wymuszenia momentu elektromagnetycznego, część mechaniczna układu napędowego, filtr Kalmana oraz regulator PI.



Rys. 1. Schemat blokowy struktury sterowania

Transmitancja regulatora prędkości ma postać:

$$G_r(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (4)$$

Przyjęto następującą transmitancję opisującą pętlę wymuszenia momentu elektromagnetycznego:

$$G_p(s) = \frac{1}{0,002s + 1} \quad (5)$$

Współczynniki układu regulacji dobierano przy uwzględnieniu aktualnych estymowanych wartości parametrów mechanicznych T_2 i T_c , według poniższych zależności [8], [10]:

$$K_I = \omega_r^4 T_1 T_2 T_c, \quad (6)$$

$$K_p = 4\xi_z \omega_r^3 T_1 T_2 T_c, \quad (7)$$

$$k_2 = \frac{1}{\omega_r^3 T_2 T_c} - 1, \quad (8)$$

$$k_1 = \frac{T_1(4\xi_z^2 - k_2)}{T_2(1 + k_2)} - 1 \quad (9)$$

gdzie:

ω_r – zadana pulsacja rezonansowa,

ξ_z – zadany współczynnik tłumienia układu,

K_I, K_p – wzmacnienia całkowite i proporcjonalne regulatora prędkości.

Badania przeprowadzono dla następujących wartości pulsacji rezonansowej $\omega_r = 40 \text{ s}^{-1}$ i współczynnika tłumienia $\xi_z = 0,7$. W tabeli 1 zestawiono podstawowe dane modelowanego układu składającego się z dwóch maszyn prądu stałego połączonych za pomocą długiego wału.

Tabela 1. Zestawienie podstawowych danych modelowanego układu

| Parametr | Wartość | Jednostka |
|--------------------------------------|---------|-----------|
| Moc | 500 | W |
| Napięcie znamionowe | 220 | V |
| Prędkość znamionowa | 1450 | obr/min |
| Długość wału napędowego | 600 | mm |
| Średnica wału napędowego | 6 | mm |
| Częstotliwość rezonansowa | 14,4 | Hz |
| Częstotliwość antyrezonansowa | 10,2 | Hz |
| Mechaniczna stała czasowa silnika | 0,203 | s |
| Mechaniczna stała czasowa obciążenia | 0,203 | s |
| Stała czasowa elementu sprężystego | 0,0012 | s |

3. OPIS I MODEL MATEMATYCZNY FILTRÓW KALMANA

3.1. NIELINIOWY ROZSZERZONY FILTR KALMANA

W celu przeprowadzenia procesu identyfikacji parametrów układu dwumasowego należy rozszerzyć jego wektor stanu o dodatkowe wielkości $1/T_2$ i $1/T_c$. W niniejszej

pracy założono zakresy możliwych do wystąpienia wartości identyfikowanych parametrów wynoszące: od $0,4 T_{2N}$ do $4 T_{2N}$ oraz od $0,5 T_{cN}$ do $2 T_{cN}$. Po uwzględnieniu wymienionych warunków wektor stanu przyjmuje następującą postać:

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

Rozszerzone równania stanu i wyjścia układu można przedstawić następująco:

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

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

gdzie $\mathbf{w}(t)$, $\mathbf{v}(t)$ – szumy białe występujące w układzie.

Macierz \mathbf{A}_R zależna jest od aktualnej wartości parametrów T_2 i T_c , ze względu na to wymaga ona aktualizacji w każdym kroku obliczeniowym, zgodnie z aktualną estymowaną wartością wymienionych parametrów. Macierze stanu, sterowania i wyjścia określone są następująco:

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

Wektorami wejściowymi i wyjściowymi badanego układu oraz filtrów Kalmana są moment elektromagnetyczny i prędkość silnika:

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

Po dyskretyzacji równań układu (11a, 11b) z krokiem T_s następuje proces estymacji zmiennych stanu i parametrów układu za pomocą filtrów Kalmana. Klasyczny algorytm rozszerzonego filtru Kalmana można przedstawić następująco:

1. Predykcja wektora stanu:

$$\hat{\mathbf{x}}_R(k+1/k) = \mathbf{A}_R(k) \hat{\mathbf{x}}_R(k/k) + \mathbf{B}_R \mathbf{u}(k). \quad (14)$$

2. Predykcja macierzy kowariancji:

$$\mathbf{P}(k+1/k) = \mathbf{F}_R(k) \mathbf{P}(k) \mathbf{F}_R^T(k) + \mathbf{Q}(k), \quad (15)$$

gdzie:

$$\mathbf{F}_R(k) = \frac{\partial \mathbf{f}_R(\mathbf{x}_R(k/k)\mathbf{u}(k), k)}{\partial \mathbf{x}_p(k/k)} \Big|_{\mathbf{x}_R = \hat{\mathbf{x}}_R(k/k)}, \quad (16)$$

$$\mathbf{F}_R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{-1}{T_1}T_s & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{1}{T_2(k)}T_s & m_s(k)T_s & 0 \\ \frac{1}{T_c(k)}T_s & \frac{-1}{T_c(k)}T_s & 1 & 0 & [\omega_1(k) - \omega_2(k)]T_s \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

3. Obliczenie wzmocnienia Kalmana:

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{C}_R^T(k+1) \times [\mathbf{C}_R(k+1)\mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{C}_R^T(k+1) + \mathbf{R}(k)]^{-1}. \quad (18)$$

4. Korekcja wektora stanu:

$$\hat{\mathbf{x}}_R(k+1/k+1) = \hat{\mathbf{x}}_R(k/k) + \mathbf{K}(k+1) \times [\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{C}_R(k+1)\hat{\mathbf{x}}_R(k+1/k)]. \quad (19)$$

5. Korekcja macierzy kowariancji:

$$\mathbf{P}(k+1/k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{C}_R(k+1)]\mathbf{P}(k+1/k). \quad (20)$$

6. Powrót do pierwszego kroku.

Opisany algorytm wymaga określenia wartości współczynników macierzy kowariancji zakłóceń zmiennych stanu \mathbf{Q} oraz sygnałów wyjściowych \mathbf{R} :

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & q_{55} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R} = [r]. \quad (21)$$

Wartości wymienionych współczynników, w przypadku klasycznego algorytmu rozszerzonego filtra Kalmana pracującego w otwartej strukturze sterowania, dobrano za pomocą algorytmu genetycznego, zgodnie z przyjętą funkcją celu:

$$F_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (|\omega_1 - \omega_{1e}|) * \sum_{i=1}^n (|\omega_2 - \omega_{2e}|) * \sum_{i=1}^n (|m_s - m_{se}|) * \sum_{i=1}^n (|T_2 - T_{2e}|) * \sum_{i=1}^n (|T_c - T_{ce}|)}{n} \quad (22)$$

gdzie:

- n – liczba próbek,
- x_e – wartość estymowana.

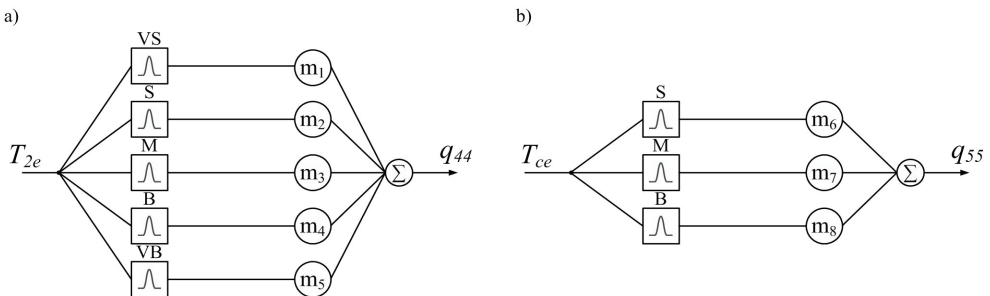
Powyższa funkcja celu uwzględnia wszystkie estymowane wielkości, które występują w rozszerzonym wektorze stanu badanego układu. Optymalizację przeprowadzono stosując kolejno omówione warunki. Obserwator pracował w otwartej strukturze sterowania. Sygnałem wymuszającym był sygnał prostokątny o amplitudzie $0,5 \omega_N$, powodujący cykliczne rozruchy układu, w którym nie występuje moment obciążenia. Przyjęto wartość ograniczenia momentu elektromagnetycznego równą $3 m_{eN}$. Sygnały wejściowe filtru Kalmana zakłócono szumami białymi o wartościach wariancji wynoszących $4e-5$ dla momentu elektromagnetycznego, $5e-6$ dla prędkości silnika i wartościach średnich równych 0 dla obu sygnałów. Założono zmienność parametrów T_2 i T_c w czasie pracy układu napędowego. W tabeli 2 zestawiono uzyskane wartości współczynników macierzy **Q** i **R** klasycznego algorytmu nieliniowego rozszerzonego filtru Kalmana (NRFK).

Tabela 2. Zestawienie uzyskanych wartości parametrów macierzy NRFK (otwarta struktura sterowania)

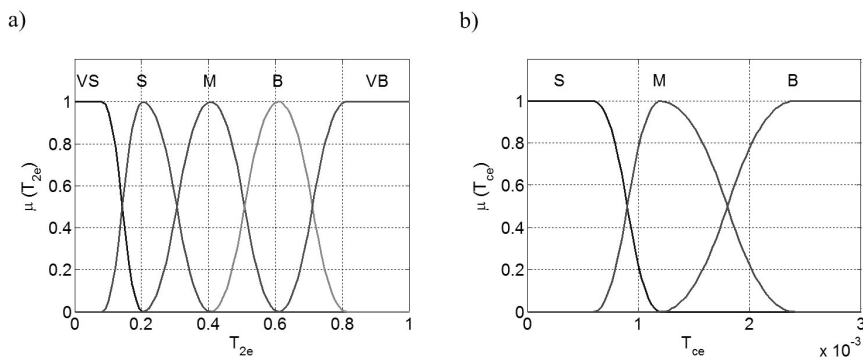
| Parametr | q_{11} | q_{22} | q_{33} | q_{44} | q_{55} | r |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Wartość | 0,005 | 0,106 | 0,001 | 44,90 | 3,999e5 | 2,753 |

3.2. ROZMYTY FILTR KALMANA

W celu wprowadzenia adaptacji wybranych współczynników macierzy kowariancji **Q** filtru Kalmana zastosowano systemy rozmyte, których struktury przedstawiono na rysunku 2. Omawiane systemy wyznaczały wartości współczynników q_{44} i q_{55} , na podstawie aktualnych estymowanych wartości parametrów T_{2e} i T_{ce} . W przedstawionych systemach zastosowano funkcje przynależności zmiennych wejściowych, które zobrazowano na rysunku 3.



Rys. 2. Struktury zastosowanych systemów rozmytych wprowadzających adaptację współczynników q_{44} (a) oraz q_{55} (b)



Rys. 3. Zastosowane funkcje przynależności zmiennych wejściowych systemów rozmytych wprowadzających adaptację współczynników q_{44} (a) oraz q_{55} (b)

Zaprojektowane systemy rozmyte, dzięki odpowiedniemu doborowi współczynników m_i , umożliwiają kształtowanie charakterystyk zmian wybranych współczynników w funkcji estymowanych wartości parametrów układu. Ich dobór przeprowadzono za pomocą algorytmu genetycznego, minimalizującego poniższą funkcję celu:

$$F_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (|T_2 - T_{2e}|) * \sum_{l=1}^n (|T_c - T_{ce}|)}{n} \quad (23)$$

Uzyskane wartości poszczególnych współczynników zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Zestawienie otrzymanych wartości parametrów m_i RFK (otwarta struktura sterowania)

| Parametr | m_1 | m_2 | m_3 | m_4 | m_5 | m_6 | m_7 | m_8 |
|----------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|
| Wartość | 1,2e4 | 5,3e3 | 270,50 | 9,30 | 43,0 | 6,24e7 | 4,4e7 | 6,34e5 |

Ze względu na uzyskanie niezadowolających wyników badań przeprowadzonych w zamkniętej strukturze sterowania, przy wykorzystaniu wartości współczynników z tabel 1 i 2, zaprojektowany obserwator poddano dodatkowej optymalizacji. Proces ten odbył się w zamkniętej strukturze sterowania, wykorzystując algorytm genetyczny minimalizujący funkcję celu (22) dla współczynników macierzy \mathbf{Q} , \mathbf{R} klasycznego algorytmu oraz funkcję celu (23) dla współczynników m_i rozmytego filtru Kalmana. Uzyskane wartości poszczególnych współczynników przedstawiono w tabelach 4 i 5.

Tabela 4. Zestawienie uzyskanych wartości parametrów macierzy NRFK (zamknięta struktura sterowania)

| Parametr | q_{11} | q_{22} | q_{33} | q_{44} | q_{55} | r |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|
| Wartość | 0,013 | 0,049 | 0,076 | 214,429 | 3,07e6 | 19,020 |

Tabela 5. Zestawienie otrzymanych wartości parametrów m_i RFK (zamknięta struktura sterowania)

| Parametr | m_1 | m_2 | m_3 | m_4 | m_5 | m_6 | m_7 | m_8 |
|----------|---------|---------|--------|-------|-------|---------|---------|---------|
| Wartość | 3,189e5 | 441,314 | 28,677 | 7,967 | 1,255 | 8,097e6 | 1,889e6 | 1,584e6 |

4. WYBRANE WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Badania symulacyjne rozpoczęto od przetestowania nieliniowego rozszerzonego filtru Kalmana o stałych wartościach współczynników macierzy \mathbf{Q} i \mathbf{R} , pracującego w otwartej strukturze sterowania. Kolejnym etapem badań była analogiczna do poprzedniego przypadku weryfikacja zaprojektowanego rozmytego filtru Kalmana. Po uzyskaniu zadowalających rezultatów pracy obserwatorów rozpoczęto badania w zamkniętej strukturze sterowania. Ze względu na uzyskanie niezadowalających wyników badań przeprowadzono dodatkową optymalizację filtrów Kalmana. W przypadku doboru parametrów klasycznego algorytmu nieliniowego rozszerzonego filtru Kalmana zastosowano funkcję celu F_1 (22). Następnie do wspomnianego algorytmu wprowadzono systemy rozmyte i przeprowadzono optymalizację ich współczynników m_i , stosując funkcję celu F_2 (23). Oba procesy optymalizacji przeprowadzono za pomocą algorytmu genetycznego. Wyniki omówionych badań przedstawiono na rysunkach 4–7. Rysunki 4 i 5 obrazują rezultaty pracy nieliniowego rozszerzonego filtru Kalmana, a rysunki 6 i 7 rozmytego filtru Kalmana.

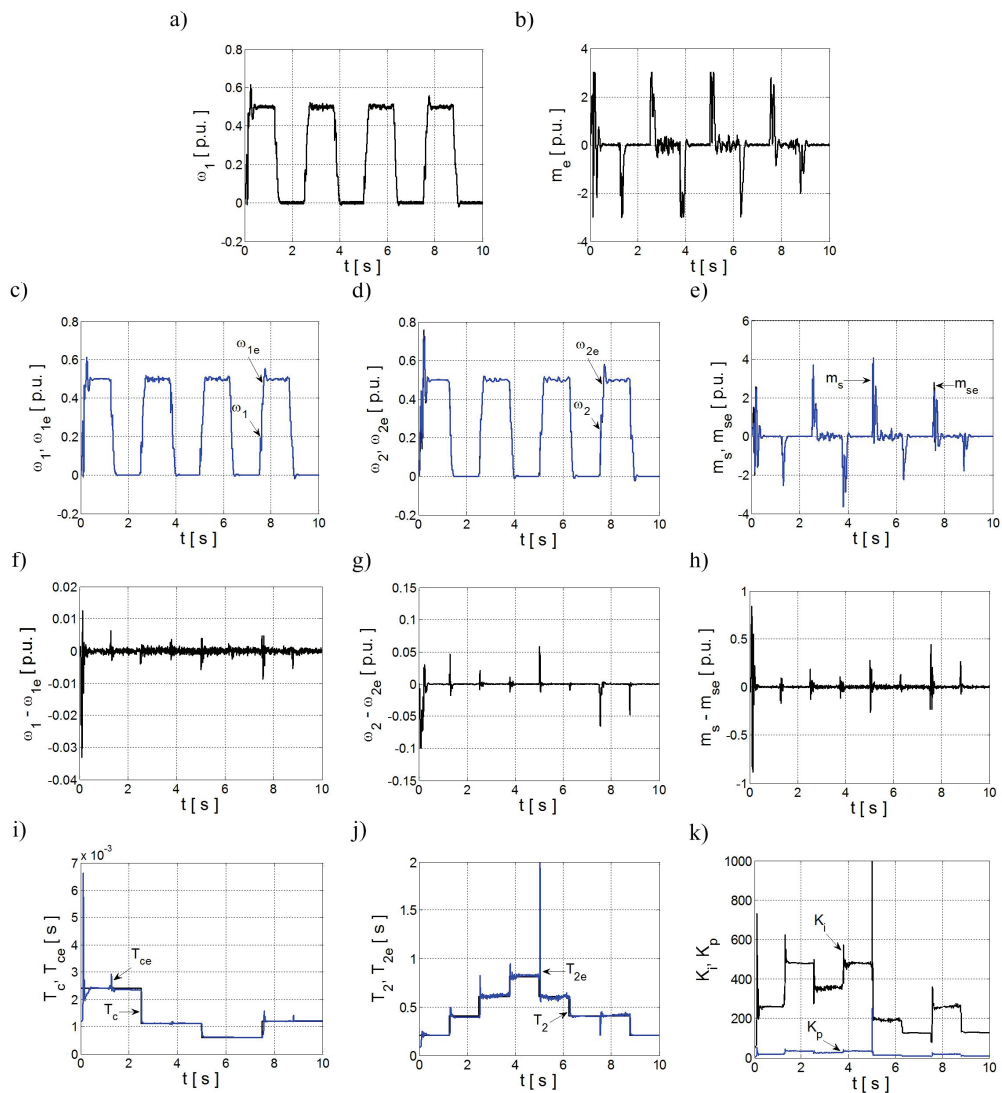
W celu porównania otrzymanych wyników badań obliczono wartości błędów estymacji poszczególnych wielkości, według poniższej zależności:

$$\delta x = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_{ie}|}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

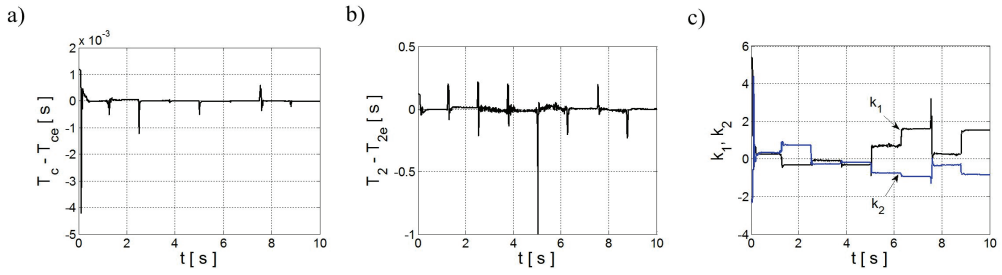
gdzie:

- x – wartość rzeczywista,
- x_e – wartość estymowana,
- n – liczba próbek.

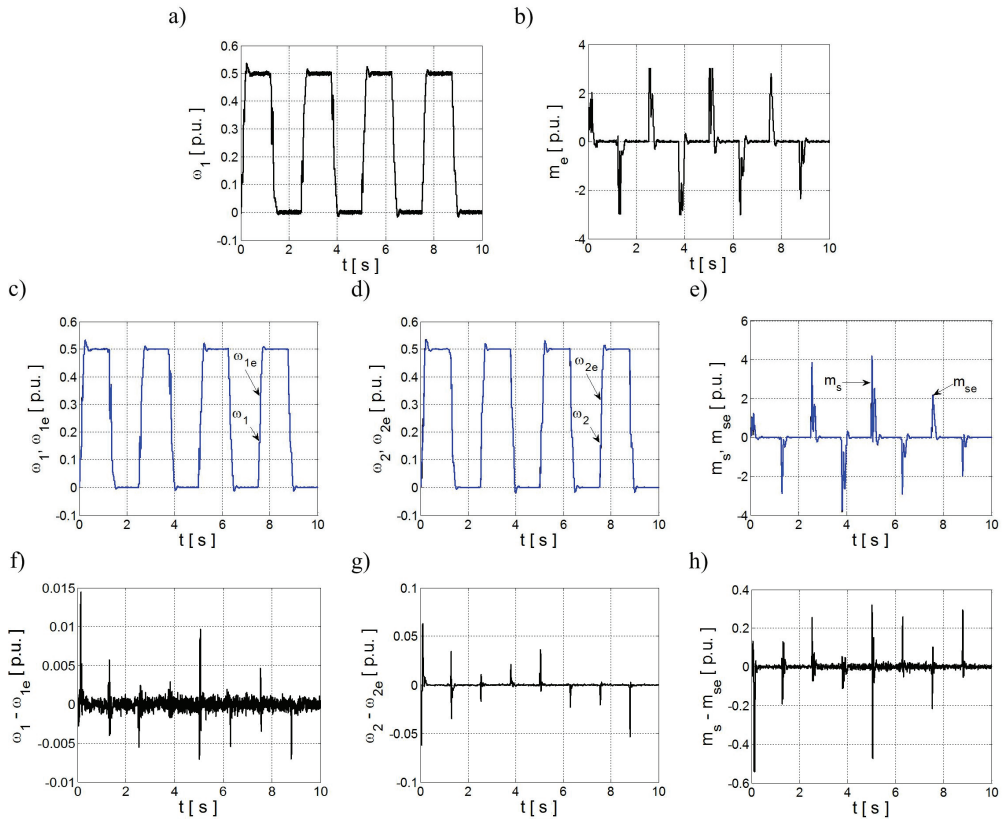
Wartości uzyskanych błędów zestawiono w tabeli 6. Porównanie to wskazuje na uzyskanie znacznej poprawy jakości estymacji wszystkich wielkości, co pozwoliło poprawić jakość regulacji prędkości układu napędowego.



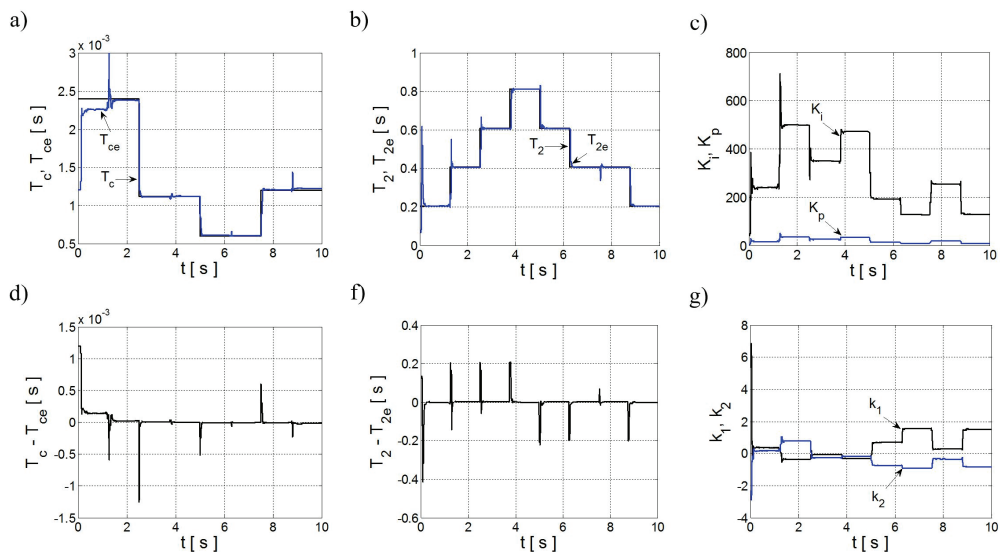
Rys. 4. Przebiegi sygnałów wejściowych NRFK: prędkości silnika (a), momentu elektromagnetycznego (b), oraz przebiegi wielkości rzeczywistych, estymowanych, błędów estymacji i parametrów układu regulacji: prędkości silnika (c, f), prędkości maszyny roboczej (d, g), momentu skrotnego (e, h), parametru T_c (i), parametru T_2 (j), wzmocnień regulatora PI (k) w przypadku pracy NRFK w zamkniętej strukturze sterowania



Rys. 5. Przebiegi błędów estymacji i parametrów układu regulacji: parametru T_c (a), parametru T_2 (b), dodatkowych sprzężeń zwrotnych (c) w przypadku pracy NRFK w zamkniętej strukturze sterowania



Rys. 6. Przebiegi sygnałów wejściowych RFK: prędkości silnika (a), momentu elektromagnetycznego (b), oraz przebiegi wielkości rzeczywistych, estymowanych, błędów estymacji i parametrów układu regulacji: prędkości silnika (c, f), prędkości maszyny roboczej (d, g), momentu skrętnego (e, h) w przypadku pracy RFK w zamkniętej strukturze sterowania



Rys. 7. Przebiegi wielkości rzeczywistych, estymowanych, błędów estymacji i parametrów układu regulacji: parametru T_c (a, d), parametru T_2 (b, f), wzmożeń regulatora PI i dodatkowych sprzężeń zwrotnych (c, g) w przypadku pracy RFK w zamkniętej strukturze sterowania

Tabela 6. Zestawienie wartości błędów estymacji dla NRFK i RFK

| Metoda | $\delta\omega_1$ | $\delta\omega_2$ | δm_s | δT_2 | δT_c |
|--------|------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|
| | [p.u.] | [p.u.] | [p.u.] | [s] | [s] |
| NRFK | 0,0006 | 0,0017 | 0,0154 | 0,0184 | 0,0001 |
| RFK | 0,0006 | 0,0015 | 0,0136 | 0,0098 | 4e-5 |

5. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono zagadnienia związane z identyfikacją parametrów mechanicznego układu dwumasowego w trybie *online* za pomocą filtrów Kalmana, przy jednoczesnym sterowaniu adaptacyjnym układu. Badaniom poddano klasyczny algorytm nieliniowego rozszerzonego filtru Kalmana oraz zaprojektowany rozmyty filtr Kalmana. Oba rodzaje obserwatorów poddano opisanym procesom optymalizacji, w których wykorzystano algorytmy genetyczne minimalizujące odpowiednie funkcje celu. Zadaniem wprowadzonych systemów rozmytych była adaptacja wybranych współczynników macierzy Q filtru Kalmana, która odbywała się na podstawie aktualnych estymowanych wartości parametrów T_{2e} i T_{ce} . Przeprowadzono badania obu typów filtrów Kalmana w otwartej oraz zamkniętej strukturze sterowania. W obydwu przypadkach konieczna była dodatkowa optymalizacja wykonana w zamkniętej

strukturze sterowania. Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- zastosowanie filtrów Kalmana w adaptacyjnej strukturze sterowania układu dwumasowego, umożliwiła jednoczesną identyfikację jego parametrów mechanicznych oraz prawidłową regulację prędkości układu,
- wprowadzenie logiki rozmytej do klasycznego algorytmu nieliniowego rozszerzonego filtru Kalmana zapewnia poprawę jakości estymacji parametrów i zmiennych stanu badanego układu napędowego, w obecności zmian parametrów w szerokim zakresie podczas jego pracy,
- optymalizację obserwatorów w otwartej strukturze sterowania należy uznać za proces wstępny, wymagający przeprowadzenia procesu zasadniczego w zamkniętej strukturze sterowania.

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] HASHIMOTO S., HARA K., FUNATO H., KAMIYAMA K., *AR-based identification and control approach in vibration suppression*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, Issue: 3, 2001, 806–811.
- [2] LIS J., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Analiza właściwości estymatora regresji jądrowej w zadaniu identyfikacji nieparametrycznej charakterystyk nieliniowych złożonego układu napędowego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, Vol. 58, nr 25, 2005, 296–305.
- [3] MOLA M., KHAYATIAN A., DEHGHANI M., *Identification and adaptive position control of two mass systems with unknown backlash*, 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2013, 1–6.
- [4] NILKHAMHANG I., SANO A., *Iterative tuning algorithm for feedforward parameter identification of a 2-mass motor system*, Control Conference, 2004, 5th Asian, Vol. 3, 2004, 1729–1736.
- [5] PACAS M., Villwock S., *Application of the Welch-Method for the Identification of Two- and Three-Mass-Systems*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, Issue: 1, 2008, 457–466.
- [6] SAARAKKALA S.E., LEPPINEN T., HINKKANEN M., LUOMI J., 2012 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC), 2012, 1–6.
- [7] SCHUTTE F., BEINEKE S., ROLFSMEIER A., GROSTOLLEN H., *Online Identification of Mechanical Parameters Using Extended Kalman Filters*, Industry Applications Conference, Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97, Conference Record of the 1997 IEEE, Vol. 1, 1997, 501–508.
- [8] SZABAT K., *Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, nr 61, Wrocław 2008.
- [9] SZABAT K., KAMIŃSKI G., *Graficzna metoda identyfikacji parametrów układu dwumasowego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, Vol. 59, Nr 26, 2006, 256–267.

- [10] SZABAT K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Application of the Kalman Filters to the High-Performance Drive System With Elastic Coupling*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, Issue: 11, 2012, 4226–4235.
- [11] ZOUBEK H., PACAS M., *An identification method for multi-mass-systems in speed-sensorless operation*, 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2011, 1895–1900.

IDENTIFICATION OF MECHANICAL PARAMETERS OF THE TWO-MASS SYSTEM USING FUZZY KALMAN FILTER

In the paper the issues related to the online identification of mechanical parameters of the two-mass system using Kalman filters are presented. Observers in a closed-loop adaptive control structure were investigated. To the classical algorithm of nonlinear extended Kalman filter designed fuzzy systems were introduced. Adaptation of selected coefficients of the matrix \mathbf{Q} was introduced by these systems. Mathematical models of the two-mass system and the nonlinear extended Kalman filter are presented. Subsequently, applied fuzzy systems are discussed. The results of both types of Kalman filter are shown. Method of optimizing coefficients of the observers was discussed.