

Mgr inż. Krzysztof Drózdź

Politechnika Wroclawska,
Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych,
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska
E-mail: krzysztof.drozdz@pwr.edu.pl

Sterowanie adaptacyjne układu napędowego z połączeniem sprzężystym wykorzystujące rozmyty filtr Kalmana z dynamiczną adaptacją wybranych współczynników

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

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

Streszczenie: W artykule przedstawiono zagadnienia związane z tłumieniem drgań skrętnych w elektrycznych układach napędowych z połączeniem sprzężystym o zmiennym momencie bezwładności maszyny roboczej poprzez zastosowanie struktury sterowania adaptacyjnego. W celu odtwarzania zmiennych stanu rozpatrywanego układu wykorzystano zmodyfikowany algorytm rozszerzonego filtra Kalmana z dynamiczną adaptacją wybranych współczynników. Adaptacja współczynników macierzy kowariancji zapewnia poprawę jakości estymacji zmiennych stanu i parametru układu w obecności zmiennego momentu bezwładności. Elementem realizującym wspomnianą adaptację jest system rozmyty, którego sygnałami wejściowymi są aktualna estymowana wartość stałej czasowej maszyny roboczej oraz przetworzony sygnał modułu różnicy pomiędzy momentami elektromagnetycznym i skrętnym. Rozważania teoretyczne i badania symulacyjne zostały zweryfikowane przez testy na stanowisku rzeczywistym..

1. Wprowadzenie

Oczekiwania wobec nowoczesnych układów napędowych skupiają się głównie na precyzyjnym sterowaniu ich prędkością lub położeniem. Przykładami napędów, które muszą spełniać takie wymagania są układy serwonapędowe oraz napędy manipulatorów robotów przemysłowych [11]. W wielu mechatronicznych aplikacjach napędowych występują zjawiska nieliniowe, zmienność parametrów układu w czasie pracy, czy oscylacje elektromechanicznych zmiennych stanu. W przypadku zastosowania uproszczonego podejścia do modelowania układu napędowego jako układ jednomasowy, oraz braku adaptacji struktury sterowania do zmiennych warunków, zjawiska te przyczyniają się do nieprawidłowej pracy układu napędowego. Jedną z głównych przyczyn powstawania oscylacji elektromechanicznych zmiennych stanu układów napędowych, jest skończona sztywność połączenia silnika z maszyną roboczą [5]. W związku z tym, w wielu przypadkach, przyjęcie modelu układu napędowego jako układ dwumasowy jest bardziej odpowiednie [11]. Istnieją również układy napędowe, w modelowaniu których należy uwzględnić większą liczbę mas i połączeń elastycznych, np. przenośniki taśmowe [6].

Zagadnienia związane ze sterowaniem prędkością układu dwumasowego początkowo rozpatrywane były w przypadku napędów walcowniczych oraz innych ciężkich napędów przemysłowych, gdzie duża bezwładność silników oraz długie połączenia mechaniczne były przyczyną powstawania drgań skrętnych [2, 12, 13]. Rozwój techniki mikroprocesorowej oraz energoelektroniki umożliwiające skuteczne sterowanie momentem elektromagnetycznym silników napędowych, spowodował uwidocznienie zjawiska

występowania drgań skrętnych w innych grupach napędów, takich jak napędy włókiennicze, papiernicze, radioteleskopów, robotów, dźwignic, serwonapędy i inne [1, 3, 4, 7, 13, 15].

W celu tłumienia drgań skrętnych wykorzystywane są między innymi mechaniczne tłumiki drgań, jednak jedną z najefektywniejszych metod jest zastosowanie odpowiedniej struktury sterowania. Znany jest szereg struktur regulacji prędkości układu dwumasowego, których przegląd znajduje się w [5]. Najprostsze rozwiązania bazują na strukturach sterowania wykorzystujących regulatory PI/PID oraz podstawowym sprzężeniu zwrotnym od prędkości silnika napędowego. W bardziej złożonych strukturach stosowane są dodatkowe sprzężenia zwrotne od trudno mierzalnych zmiennych stanu układu napędowego, takich jak moment skrętny, prędkość maszyny roboczej oraz moment obciążenia. W przypadku występowania zmienności parametrów układu stosowane jest sterowanie adaptacyjne lub ślizgowe, co zapewnia prawidłową pracę struktury sterowania [13].

W przemysłowych aplikacjach układów napędowych największy wpływ na jakość ich pracy ma zmienność parametrów w czasie jej trwania, w szczególności zmiana wartości stałej czasowej maszyny roboczej T_2 . Wystąpienie tych czynników powoduje pogorszenie właściwości dynamicznych struktury sterowania oraz zmianę założonych trajektorii prędkości układu napędowego. W celu zapewnienia poprawnej pracy stosowane jest omawiane sterowanie adaptacyjne [9]. Taki typ sterowania wykorzystywany jest również w regulacji różnorodnych procesów i obiektów, w których występuje zmienność parametrów w czasie [8, 14].

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie zagadnień dotyczących zastosowania rozmytego filtru Kalmana, pracującego w strukturze sterowania adaptacyjnego dwumasowego układu napędowego o zmiennym momencie bezwładności maszyny roboczej oraz poprawa jakości estymacji zmiennych stanu i parametru rozważanego układu. W referacie przedstawiono możliwości kształtowania dynamiki układu, poprzez wprowadzenie dynamicznej adaptacji współczynników macierzy kowariancji zakłóceń zmiennych stanu \mathbf{Q} rozszerzonego filtru Kalmana. Adaptację wymienionych współczynników przeprowadzono za pomocą zaprojektowanego systemu rozmytego, umożliwiającego kształtowanie charakterystyk zmian wybranych współczynników macierzy \mathbf{Q} poprzez odpowiedni dobór wartości singletonów. Sygnałami wejściowymi systemu rozmytego są aktualna estymowana wartość stałej czasowej maszyny roboczej i przetworzony sygnał różnicy pomiędzy momentami elektromagnetycznym i skrętnym, za pomocą którego rozpoznawany jest stan układu (statyczny lub dynamiczny).

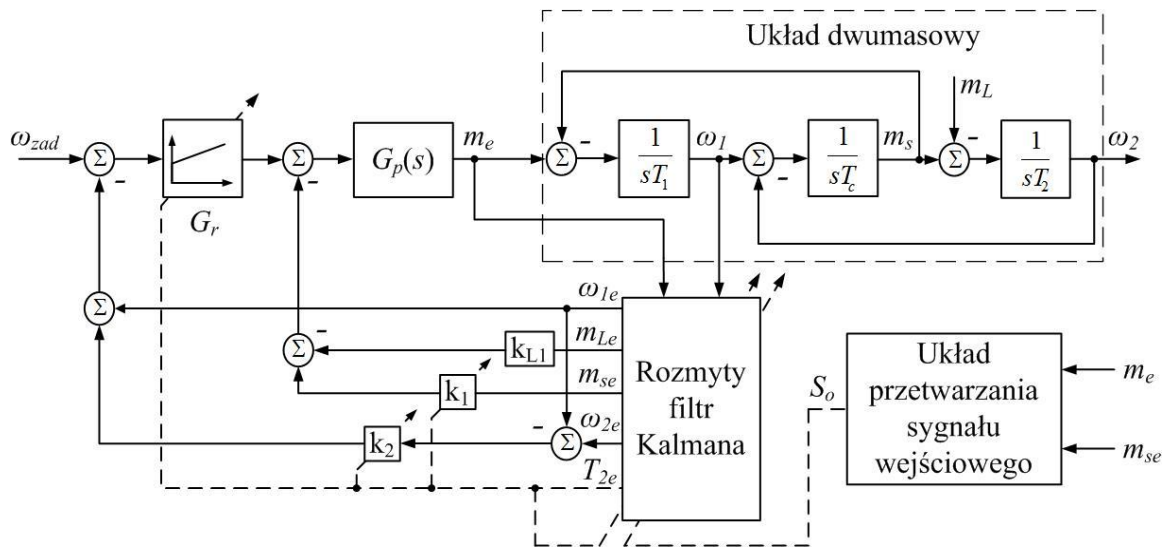
2. Model matematyczny obiektu badań oraz struktura sterowania

Przedmiotem badań jest układ napędowy z połączeniem sprzężystym, który składa się ze skupionych mas silnika oraz maszyny roboczej rozmieszczonych na końcach sprzężystego wału [10]. Wykorzystano powszechnie stosowany model układu dwumasowego z bezinercyjnym połączeniem sprzężystym [9]. Model ten opisany jest poniższymi równaniami stanu (w jednostkach względnych):

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

gdzie: ω_1 - prędkość silnika, ω_2 - prędkość maszyny roboczej, m_s - moment skrętny, m_L - moment obciążenia, T_1 - mechaniczna stała czasowa silnika, T_2 - mechaniczna stała czasowa maszyny roboczej, T_c - stała sprężystości.

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



Rys. 1. Schemat blokowy struktury sterowania

Założono następującą transmitancję pętli wymuszenia momentu elektromagnetycznego:

$$G_p(s) = \frac{1}{0,002s + 1} \quad (2)$$

Transmitancję regulatora prędkości przedstawiono poniżej:

$$G_r(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

gdzie: K_i , K_p - wzmacnienia całkujące i proporcjonalne regulatora prędkości. Współczynniki układu regulacji dobierano na podstawie aktualnej wartości stałej czasowej maszyny roboczej T_2 , według poniższych zależności:

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

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

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

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

$$k_{L1} = T_c K_I (1 + k_2) + 1 + k_1 \quad (8)$$

gdzie: ω_r - zadana pulsacja rezonansowa, ξ_z - zadany współczynnik tłumienia układu. Badania przeprowadzono zakładając następujące wartości pulsacji rezonansowej oraz współczynnika tłumienia układu: $\omega_r = 40 \text{ s}^{-1}$, $\xi_z = 0,7$.

3. Model matematyczny rozszerzonego filtru Kalmana

W przypadku występowania zmiennej w czasie wartości stałej czasowej maszyny roboczej T_2 , konieczne jest rozszerzenie wektora stanu układu o jej odwrotność oraz o moment obciążenia m_L . Przyjęcie odwrotności stałej czasowej $1/T_2$ związane jest z uproszczeniem obliczeń dotyczących linearyzacji równania stanu. W niniejszej pracy założono szeroki zakres zmian stałej czasowej T_2 , wynoszący od T_{2N} do $4T_{2N}$. Po uwzględnieniu wymienionych warunków, wektor stanu przyjmuje następującą postać:

$$\mathbf{x}_R(t) = \left[\omega_1(t) \quad \omega_2(t) \quad m_s(t) \quad m_L(t) \quad \frac{1}{T_2(t)} \right]^T \quad (9)$$

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

$$\frac{d}{dt} \mathbf{x}_R(t) = \mathbf{A}_R \left(\frac{1}{T_2(t)} \right) \mathbf{x}_R(t) + \mathbf{B}_R \mathbf{u}(t) + \mathbf{w}(t) = \mathbf{f}_R(\mathbf{x}_R(t), \mathbf{u}(t)) + \mathbf{w}(t) \quad (10a)$$

$$\mathbf{y}_R(t) = \mathbf{C}_R \mathbf{x}_R(t) + \mathbf{v}(t) \quad (10b)$$

gdzie: $\mathbf{w}(t)$, $\mathbf{v}(t)$ - szумы białe występujące w układzie.

Macierze stanu, sterowania i wyjścia określone są następująco:

$$\mathbf{A}_R \left(\frac{1}{T_2(t)} \right) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{T_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_2(t)} & -\frac{1}{T_2(t)} & 0 \\ \frac{1}{T_c} & -\frac{1}{T_c} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_R = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_R = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

Macierz \mathbf{A}_R zależna jest od parametru T_2 . Przy założeniu zmiennej w czasie wartości stałej czasowej maszyny roboczej, konieczne jest aktualizowanie macierzy \mathbf{A}_R w każdym kroku obliczeniowym, zgodnie z aktualną estymowaną wartością stałej czasowej T_2 . Wektorami wejściowymi i wyjściowymi układu napędowego oraz filtru Kalmana są moment elektromagnetyczny i prędkość silnika napędowego:

$$\mathbf{u} = m_e, \quad \mathbf{y} = \omega_1 \quad (12)$$

Po dyskretyzacji równania stanu (10) z krokiem T_s rozpoczyna się proces estymacji zmiennych stanu, za pomocą algorytmu rozszerzonego filtru Kalmana. Algorytm ten można opisać w następujących krokach [9]:

1. Obliczenie predyktora wektora stanu:

$$\hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{R}}(k+1/k) = \mathbf{A}_{\mathbf{R}}(k)\hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{R}}(k/k) + \mathbf{B}_{\mathbf{R}}\mathbf{u}(k) \quad (13)$$

2. Estymacja macierzy kowariancji błędu predykcji:

$$\mathbf{P}(k+1/k) = \mathbf{F}_{\mathbf{R}}(k)\mathbf{P}(k)\mathbf{F}_{\mathbf{R}}^T(k) + \mathbf{Q}(k) \quad (14)$$

gdzie:

$$\mathbf{F}_{\mathbf{R}}(k) = \frac{\partial \mathbf{f}_{\mathbf{R}}(\mathbf{x}_{\mathbf{R}}(k/k)\mathbf{u}(k))}{\partial \mathbf{x}_{\mathbf{p}}(k/k)} \Big|_{\mathbf{x}_{\mathbf{R}}=\hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{R}}(k/k)} \quad (15)$$

$$\mathbf{F}_{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{-1}{T_1}T_s & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \frac{1}{T_2(k)}T_s & \frac{-1}{T_2(k)}T_s & T_s(m_s(k)-m_L(k)) \\ \frac{1}{T_c}T_s & \frac{-1}{T_c}T_s & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

3. Obliczenie wzmocnienia Kalmana:

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{C}_{\mathbf{R}}^T(k+1)[\mathbf{C}_{\mathbf{R}}(k+1)\mathbf{P}(k+1/k)\mathbf{C}_{\mathbf{R}}^T(k+1) + \mathbf{R}(k)]^{-1} \quad (17)$$

4. Wyznaczenie estymaty wektora stanu:

$$\hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{R}}(k+1/k+1) = \hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{R}}(k/k) + \mathbf{K}(k+1)[\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{C}_{\mathbf{R}}(k+1)\hat{\mathbf{x}}_{\mathbf{R}}(k+1/k)] \quad (18)$$

5. Obliczenie macierzy kowariancji błędu estymaty:

$$\mathbf{P}(k+1/k+1) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{C}_{\mathbf{R}}(k+1)]\mathbf{P}(k+1/k) \quad (19)$$

6. Powrót do pierwszego kroku.

Algorytm ten wymaga określenia wartości elementów macierzy kowariancji zakłóceń zmiennych stanu \mathbf{Q} oraz sygnałów wyjściowych \mathbf{R} :

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

Wartości te dobrano za pomocą algorytmu genetycznego, zgodnie z przyjętą funkcją celu:

$$F_1 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n |\omega_{i1} - \omega_{i1e}| \right) * \left(\sum_{i=1}^n |\omega_{i2} - \omega_{i2e}| \right) * \left(\sum_{i=1}^n |m_{is} - m_{ise}| \right) * \left(\sum_{i=1}^n |m_{iL} - m_{iLe}| \right) * \left(\sum_{i=1}^n |T_{i2} - T_{i2e}| \right)}{n} \quad (20)$$

Powyższa funkcja celu uwzględnia wszystkie estymowane wielkości zawarte w wektorze stanu badanego układu napędowego. W tabeli 1 przedstawiono otrzymane wartości elementów macierzy \mathbf{Q} i \mathbf{R} .

Tabela 1. Zestawienie wartości elementów macierzy \mathbf{Q} i \mathbf{R}

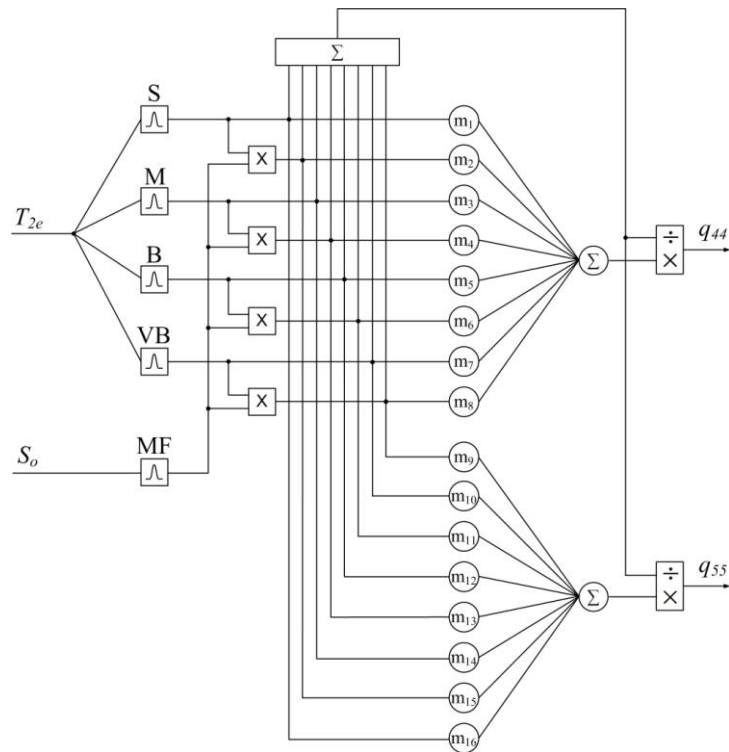
q_{11}	q_{22}	q_{33}	q_{44}	q_{55}	r
0,037	0,020	2E-5	99,18	61,63	41,84

4. Zastosowany system rozmyty

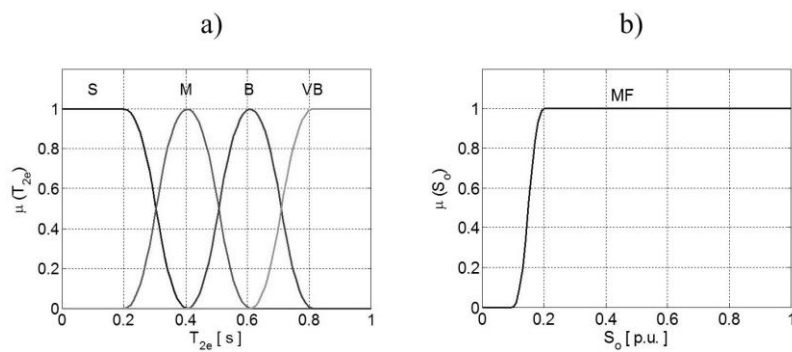
W niniejszej pracy układem wprowadzającym adaptację elementów macierzy kowariancji zakłóceń zmiennych stanu \mathbf{Q} algorytmu filtru Kalmana jest zaprojektowany system rozmyty. Strukturę tego systemu przedstawiono na rysunku 2. Rysunek 3 przedstawia zastosowane w nim funkcje przynależności zmiennych wejściowych. Wyznaczanie wartości elementów q_{44} i q_{55} macierzy \mathbf{Q} przebiega na podstawie aktualnej estymowanej wartości stałej czasowej maszyny roboczej T_{2e} i przetworzonego sygnału modułu różnicy pomiędzy momentem elektromagnetycznym i estymowanym momentem skrętnym S_o , dzięki któremu możliwe jest rozróżnienie stanów statycznego i dynamicznego układu napędowego. W przypadku występowania wartości tego sygnału przekraczającej ustaloną granicę, system rozmyty przestrasza współczynniki macierzy kowariancji na wartości odpowiadające stanowi dynamicznemu napędowi oraz danej wartości stałej czasowej maszyny roboczej. W przeciwnym przypadku rozpoznawany jest stan statyczny i następuje analogiczny proces przestrojenia. Sygnał S_o stanowi wyjście układu przetwarzania sygnału wejściowego, którego strukturę przedstawiono na rysunku 4. W układzie tym zastosowano filtr dolnoprzepustowy o stałej czasowej T_f w celu ograniczenia występujących zakłóceń wysokoczęstotliwościowych. W badaniach przyjęto $T_f = 0,005s$. Zaprojektowany system rozmyty umożliwia kształtowanie powierzchni zmian współczynników q_{44} i q_{55} macierzy \mathbf{Q} w funkcji T_{2e} i S_o . Kształt tych powierzchni zależy od dobranych wartości współczynników m_i . W niniejszej pracy ich dobór przeprowadzono za pomocą algorytmu *Pattern Search* według następującej funkcji celu:

$$F_2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^n |m_{iL} - m_{iLe}| \right) * \left(\sum_{i=1}^n |T_{i2} - T_{i2e}| \right)}{n} \quad (21)$$

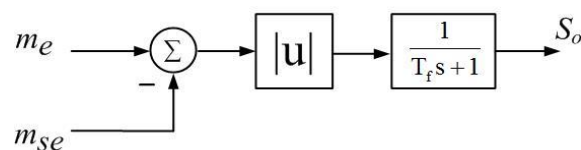
Proces ten ze względu na dużą liczbę parametrów został przeprowadzony dwuetapowo. W pierwszej kolejności optymalizowano wartości współczynników od m_9 do m_{16} , zachowując stałą wartość q_{44} . Następnie przeprowadzono optymalizację współczynników od m_1 do m_8 , przy zmiennej wartości q_{55} . W obydwu przypadkach punktami startowymi algorytmu optymalizacji były odpowiednie wartości elementów macierzy kowariancji filtra Kalmana q_{44} i q_{55} . Zestaw otrzymanych wartości poszczególnych współczynników m_i przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 2. Struktura zastosowanego systemu rozmytego



Rys. 3. Zastosowane funkcje przynależności



Rys. 4. Struktura układu przetwarzania sygnału wejściowego

Tabela 2. Zestawienie wartości parametrów m_i

m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8
149,21	29,87	208,97	8,11E-4	259,58	5,19	313,45	55,40
m_9	m_{10}	m_{11}	m_{12}	m_{13}	m_{14}	m_{15}	m_{16}
162,60	61426,94	7,34E-4	3624,63	14,61	532,67	13,35	168,83

5. Wybrane wyniki badań symulacyjnych

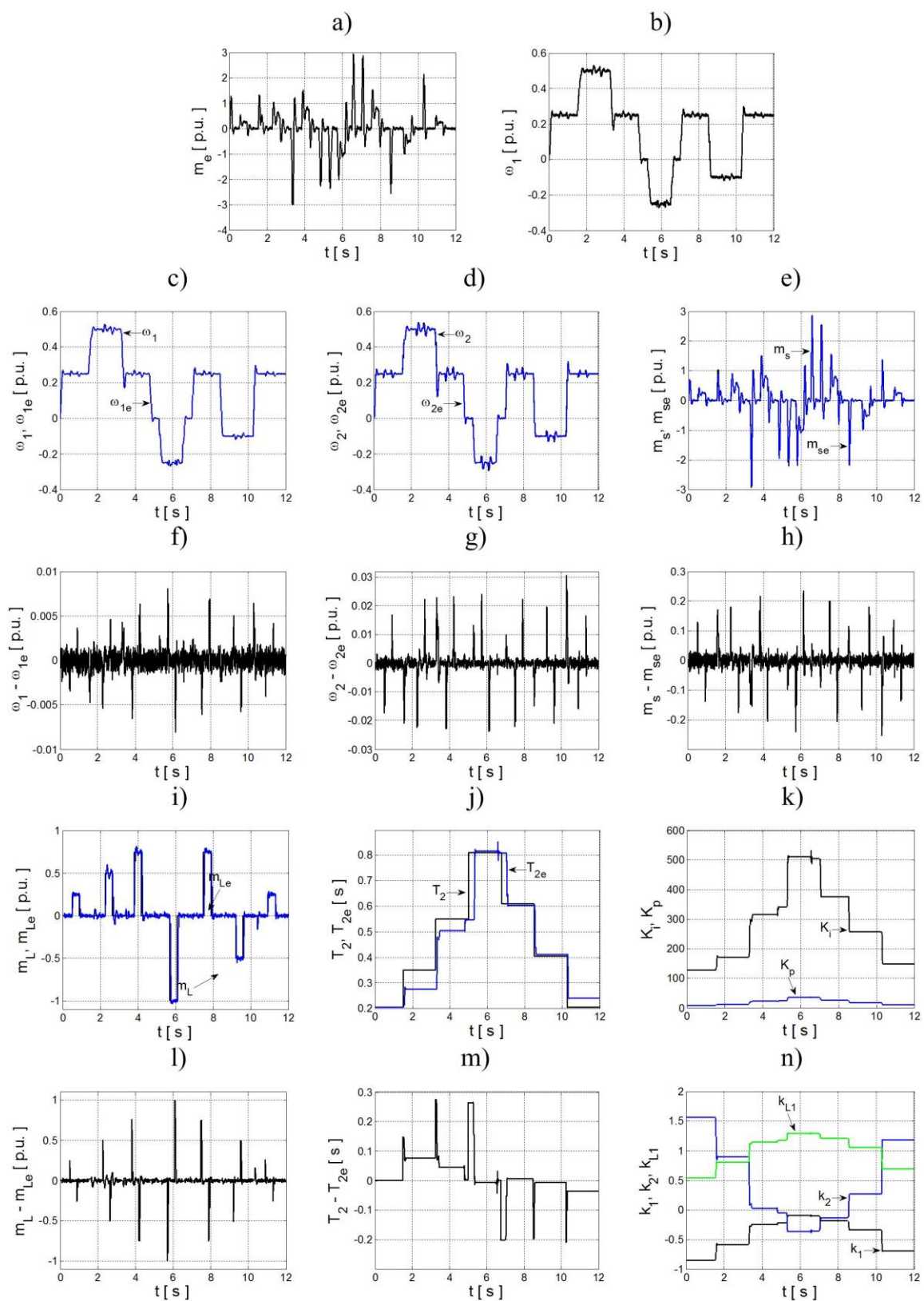
W badaniach symulacyjnych początkowo testowano rozszerzony filtr Kalmana o stałych współczynnikach macierzy \mathbf{Q} i \mathbf{R} pracujący w zamkniętej strukturze sterowania. Przyjęto odmienne warunki pracy układu napędowego niż w procesie optymalizacji. Zastosowano układ uniemożliwiający jednoczesną estymację momentu obciążenia i stałej czasowej maszyny roboczej. Na rysunku 5 przedstawiono wybrane wyniki omawianych badań. Uwzględniono tu zmiany w czasie stałej czasowej maszyny roboczej w zakresie od T_{2N} do $4T_{2N}$. Jakość estymacji prędkości silnika, maszyny roboczej oraz momentu skrętnego można uznać za zadowalającą. Z analizy uzyskanych wyników wynika, że struktura sterowania pracuje prawidłowo. Przebiegi estymat momentu obciążenia i stałej czasowej maszyny roboczej charakteryzują się jednak niepożądanymi dużymi wartościami błędów estymacji, które mogą powodować wzbudzenie drgań skrętnych. W celu eliminacji omówionych wad zastosowano adaptację współczynników q_{44} i q_{55} macierzy \mathbf{Q} za pomocą zaprojektowanego systemu rozmytego. Na rysunku 6 przedstawiono wybrane wyniki badań zamkniętej struktury sterowania z rozmytym filtrem Kalmana. Celem oceny jakości estymacji oraz porównania obu metod obliczono błędy estymacji poszczególnych zmiennych stanu i parametru T_2 , stosując poniższą zależność:

$$\delta x = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_{ie}|}{n}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

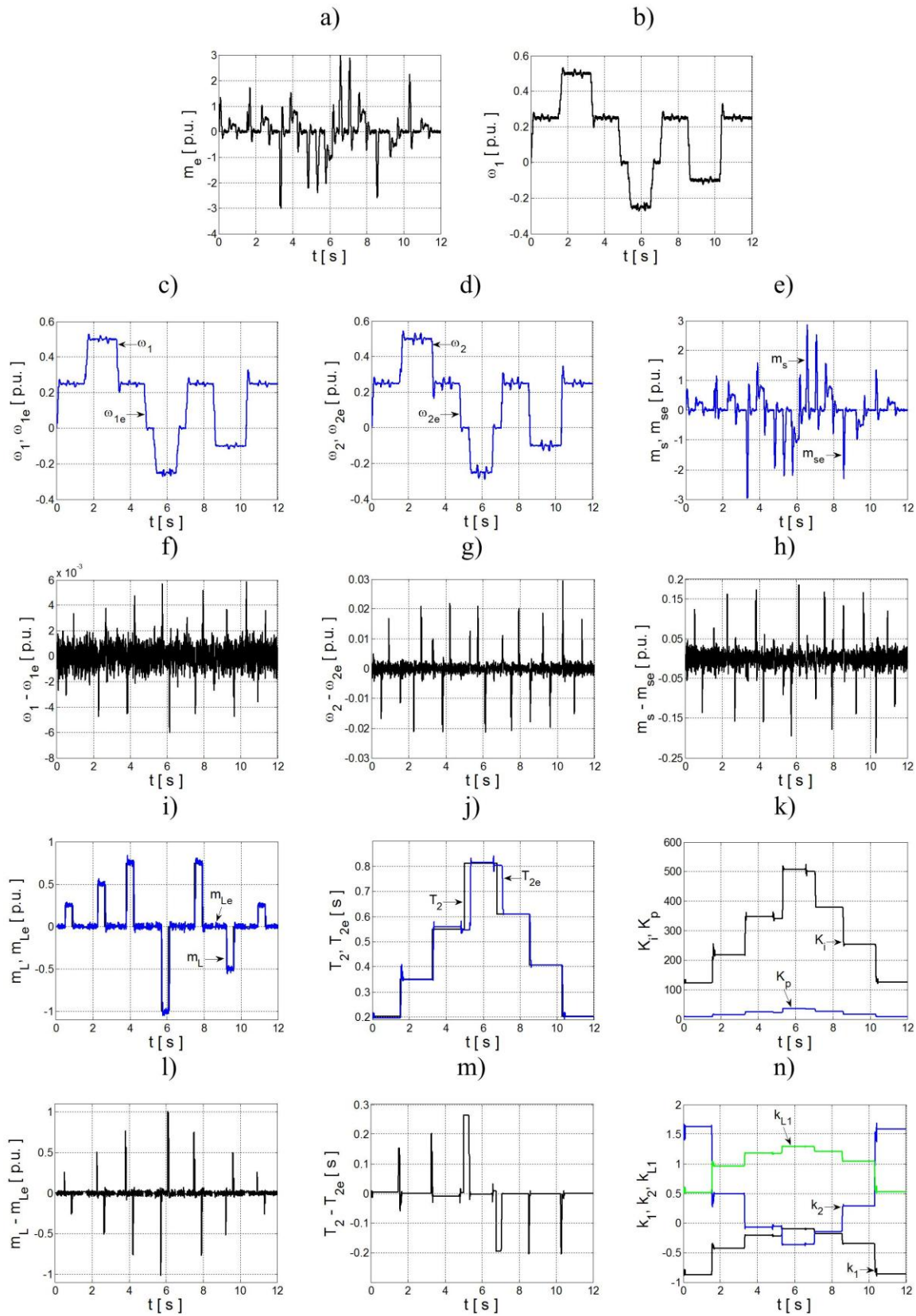
gdzie: x - wartość rzeczywista, x_e - wartość estymowana, n - liczba próbek. Wartości obliczonych błędów estymacji zestawiono w tabeli 3. Analiza uzyskanych wyników badań wskazuje na uzyskanie znaczącej poprawy jakości estymacji wszystkich estymowanych wielkości.

Tabela 3. Zestawienie wartości błędów estymacji

Metoda	$\delta\omega_1$	$\delta\omega_2$	δm_s	δm_L	δT_2
	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[s]
przy stałych współczynnikach	7,34E-5	19,4E-40	192,62E-4	374,32E-4	402,63E-4
z rozmytą adaptacją współczynników q_{44} i q_{55}	6,44E-4	16,05E-4	166,80E-4	336,71E-4	187,41E-4



Rys. 5. Przebiegi: sygnałów wejściowych rozszerzonego filtru Kalmana - momentu elektromagnetycznego (a) i prędkości silnika (b), rzeczywistych i estymowanych wielkości oraz błędy estymacji: prędkości silnika (c, f), prędkości maszyny roboczej (d, g), momentu skrętnego (e, h), momentu obciążenia (i, l), stałej czasowej maszyny roboczej (j, m), parametrów układu regulacji (k, n)

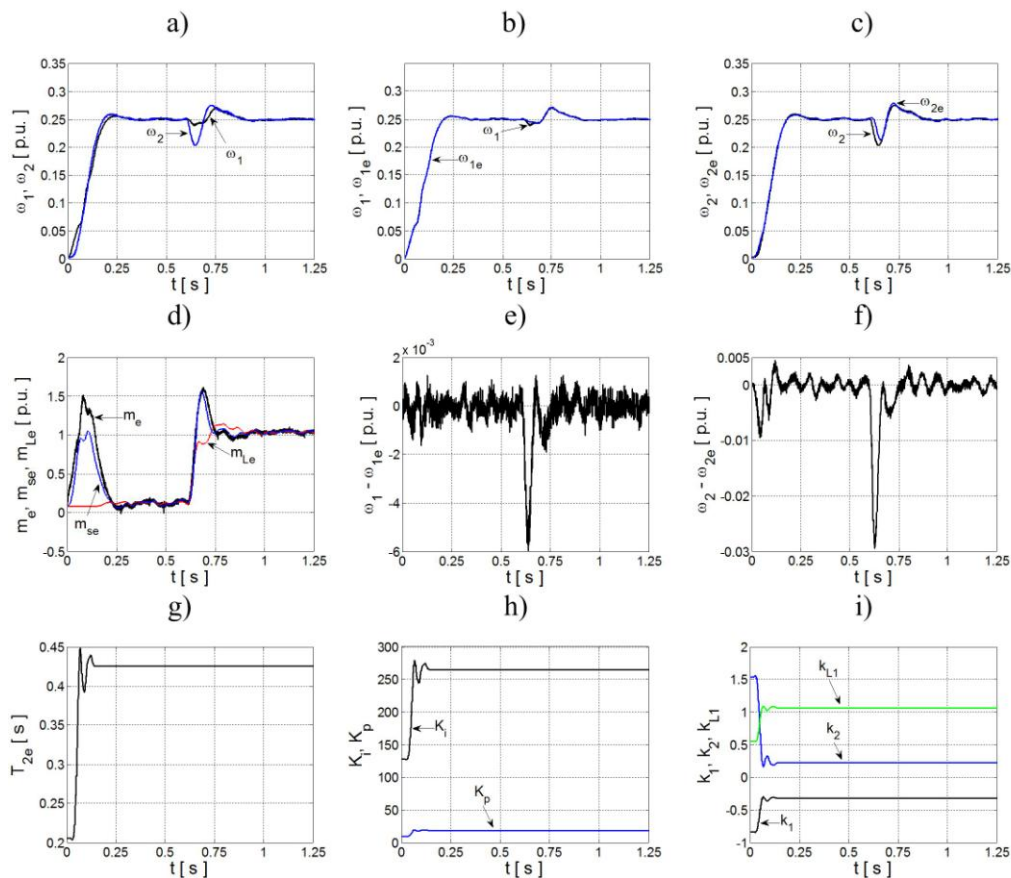


Rys. 6. Przebiegi: sygnałów wejściowych rozmytego filtra Kalmana - momentu elektromagnetycznego (a) i prędkości silnika (b), rzeczywistych i estymowanych wielkości oraz błędy estymacji: prędkości silnika (c, f), prędkości maszyny roboczej (d, g), momentu skrętnego (e, h), momentu obciążenia (i, l), stałej czasowej maszyny roboczej (j, m), parametrów układu regulacji (k, n)

6. Wybrane wyniki badań eksperymentalnych

W celu weryfikacji badań symulacyjnych przeprowadzono testy zaproponowanego rozwiązania na stanowisku laboratoryjnym. Stanowisko to składa się z dwóch maszyn prądu stałego o mocy 500W połączonych długim sprężystym wałem. Silnik napędowy zasilany jest z przekształtnika energoelektronicznego w układzie mostka H. Obciążenie zestawu zrealizowano przy wykorzystaniu układu modulatora rezystancji. Algorytm sterowania układu napędowego zaimplementowano na karcie z procesorem sygnałowym dSpace DS 1103. Pomiar prędkości wykonywany był za pomocą enkoderów o rozdzielczości 3600 impulsów na obrót. Parametry pętli regulacji momentu elektromagnetycznego dobrano w sposób zapewniający szybką kontrolę tej wielkości. Estymację niedostępnych zmiennych stanu i parametru T_2 zrealizowano przy użyciu opisanego rozmytego filtra Kalmana.

Strukturę sterowania adaptacyjnego przetestowano dla wartości prędkości zadanej $\omega_{zad} = 0,25\omega_N$. Wartość prędkości dobrano tak, aby uniknąć osiągnięcia ograniczenia momentu elektromagnetycznego. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 7. W czasie rozruchu widoczny jest wpływ układu naprzemiennej estymacji stałej czasowej maszyny roboczej i momentu obciążenia. Praca struktury sterowania rozpoczyna się z wartościami współczynników $K_i, K_p, k_1, k_2, k_{L1}$ dobranymi dla błędnej wartości $T_{2e} = 0,203s$. Następnie, w czasie rozruchu wyznaczana przez algorytm rozmytego filtra Kalmana wartość T_{2e} dąży do wartości rzeczywistej. Zgodnie z zależnościami (4)-(8) zmianom ulegają współczynniki układu regulacji. Analiza wyników badań wskazuje na prawidłową pracę struktury sterowania.



Rys. 7. Przebiegi prędkości silnika i maszyny roboczej (a), rzeczywistej i estymowanej prędkości silnika (b) oraz maszyny roboczej (c), momentów: elektromagnetycznego, skrętnego i obciążenia (d), błędów estymacji prędkości silnika (e) i maszyny roboczej (f), parametrów układu regulacji (f, g)

7. Podsumowanie

W pracy przedstawiono zagadnienia związane ze sterowaniem adaptacyjnym układu dwumasowego wykorzystującym rozszerzony filtr Kalmana. Opisano modele matematyczne rozważanego układu napędowego, filtru Kalmana oraz strukturę sterowania. Scharakteryzowano zaprojektowany system rozmyty, którego zadaniem była adaptacja współczynników q_{44} i q_{55} macierzy kowariancji zakłóceń zmiennych stanu \mathbf{Q} . Przedstawiono sposób doboru współczynników systemu rozmytego. Proponowany rozmyty filtr Kalmana przebadano w przypadku pracy w zamkniętej strukturze sterowania. Przeprowadzono badania porównawcze z klasycznym algorytmem nieliniowego rozszerzonego filtru Kalmana. Uzyskano znaczną poprawę jakości estymacji wszystkich wielkości. Rozważania teoretyczne oraz badania symulacyjne zweryfikowano w badaniach eksperymentalnych. Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- zastosowanie zaawansowanej struktury sterowania adaptacyjnego wykorzystującej filtry Kalmana umożliwi efektywne tłumienie drgań skrętnych rozpatrywanego układu napędowego z połączeniem sprężystym,
- wprowadzenie zaprojektowanego systemu rozmytego wnoszącego dynamiczną adaptację wybranych współczynników filtru Kalmana zapewnia poprawę jakości estymacji wszystkich wielkości w porównaniu do klasycznego algorytmu, co pozytywnie wpływa na pracę struktury regulacji w obecności zmian stałej czasowej maszyny roboczej w szerokim zakresie,
- wykorzystanie algorytmu *Pattern Search* do optymalizacji wartości singletonów systemu rozmytego pozwala na uzyskanie zadowalających efektów pracy obserwatora,
- przy zastosowaniu tego algorytmu należy zwrócić szczególną uwagę na odpowiednie sformułowanie postaci funkcji celu.

Podziękowanie: 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. Brock S, Deskur J, Janiszewski D, Muszyński R. Active damping of torsional vibrations in servodrives. *Power Electronics and Electrical Drives. Selected Problems*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2007: 278-297.
2. Butler D H E, Churches M A, Vergan E R, Anbe Y, Naitoh H. Compensation of a digitally controlled static power converter for the damping of rolling mill torsional vibration. *IEEE Transactions on Industry Applications* 1992; 28(2): 427-433.
3. De Luca A, Schroder D, Thummel M. An Acceleration-based State Observer for Robot Manipulators with Elastic Joints. *IEEE International Conference on Robotics and Automation* 2007: 3817-3823.
4. Gierlotka K. Układy sterowania napędów elektrycznych z elementami sprężystymi. *Gliwice: Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej* 1992; 129(1181).
5. Kamiński M. Implementacja neuronowego estymatora prędkości napędu dwumasowego w układzie FPGA. *Przegląd Elektrotechniczny* 2010; 2: 225-230.

6. Karolewski B, Ligocki P. Modelowanie długich przenośników taśmowych (Modelling of long belt conveyors). *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 2: 179-187.
7. Michael C A, Safacas A N. Dynamic and Vibration Analysis of a Multimotor DC Drive System With Elastic Shafts Driving a Tissue Paper Machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2007; 54(4): 2033-2046.
8. Poleszak J. Koncepcja adaptacyjnego sterowania kątem wyprzedzenia wtrysku w silniku o zapłonie samoczynnym (The adaptive control of the injection timing in the diesel engine). *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2003; 2: 52-55.
9. Szabat K. Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym. Wrocław: Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej 2008; 61(19).
10. Szabat K, Dybkowski M. Tłumienie drgań skrętnych w układzie dwumasowym z luzem mechanicznym. *Przegląd Elektrotechniczny* 2010; 2: 376-379.
11. Szabat K, Orłowska-Kowalska T. Adaptive Control of Two-Mass System using Nonlinear Extended Kalman Filter. 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics IECON 2006: 1539-1544.
12. 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* 2007; 54(2): 1193-1206.
13. Szabat K, Serkies P J. Zastosowanie sterowania predykcyjnego w układzie napędowym z połączeniem sprężystym. *Przegląd Elektrotechniczny* 2010; 2: 380-383.
14. Świć A, Taranenko W. Sterowanie adaptacyjne dokładnością obróbki części osiowo-symetrycznych o małej sztywności w stanie sprężysto-odkształcalnym (Adaptive control of machining accuracy of axial-symmetrical low-rigidity parts in elastic-deformable state). *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 3: 17-25.
15. Zoller T, Leibfried T, Miri A M. Application of Power Electronics for Damping of Torsional Vibrations. 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems PEDS 2007: 521-525.