

*adaptacyjny regulator stanu, reguła delta,
regulacja prędkości, układ dwumasowy,
napęd elektryczny*

Marcin KAMIŃSKI*

REGULATOR STANU ZE ZMIENNYMI PARAMETRAMI ZASTOSOWANY W STRUKTURZE STEROWANIA UKŁADU DWUMASOWEGO

W artykule przedstawiono metodykę projektowania regulatora stanu, którego nastawy są aktualizowane *on-line* – w trakcie działania układu. W celu optymalizacji parametrów regulatora zastosowano regułę delta. Obiektem jest układ napędowy, posiadający w części mechanicznej elastyczny wał łączący silnik napędzający z maszyną roboczą. Założono również zredukowaną liczbę czujników pomiarowych, w związku z tym zastosowano filtr Kalmana. Wykonano testy porównawcze dla adaptacyjnego oraz klasycznego regulatora zastosowanego w pętli regulacji prędkości napędu. Uzyskano poprawę precyzji sterowania prędkością układu, szczególnie istotna jest poprawa działania klasycznego układu w obecności zmian parametrów obiektu.

1. WPROWADZENIE

Zagadnienia precyzyjnego sterowania położeniem lub prędkością układu napędowego dotyczą przede wszystkim projektowania nowoczesnych oraz odpornych regulatorów lub układów odtwarzających zmienne stanu [1]–[3]. Kolejną kwestią, która jest często rozważana w projektowaniu napędów jest uwzględnienie konstrukcji części mechanicznej analizowanej struktury. W czasopiśmie naukowo-inżynierskich omawiane są zagadnienia związane z luzem elementów sprzęgających silnik z obciążeniem oraz dotyczące tarcia występującego w maszynach [4], [5]. Oddzielnym problemem jest występowanie elastyczności wału sprzęgającego. W takim przypadku, jeśli zastosowane będą klasyczne układy regulacji oraz wymuszana

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: marcin.kaminski@pwr.edu.pl

będzie duża dynamika odpowiedzi obiektu, w przebiegach zmiennych stanu pojawiają się zakłócenia [6], [7].

W publikacjach opisano wiele rozwiązań dotyczących metod sterowania układu napędowego z elastycznym wałem, wśród nich należy wyróżnić algorytmy oparte na:

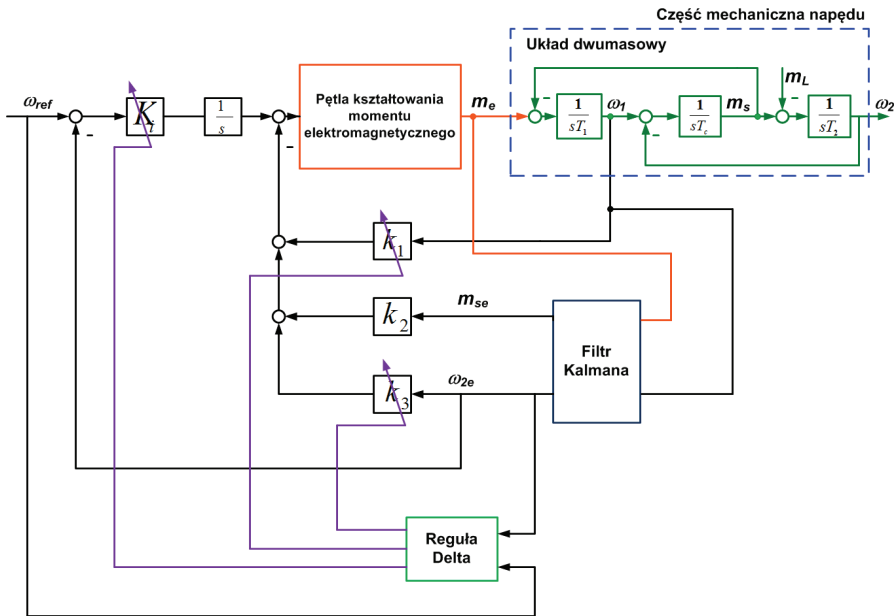
- sterowaniu ślizgowym [8],
- sieciach Petriego [9],
- modelach rozmytych [10],
- sieciach neuronowych [11],
- sterowaniu predykcyjnym [12].

Wymienione powyżej struktury sterowania charakteryzują się dobrymi właściwościami dynamicznymi. Jednak należy zauważyć, że są złożone obliczeniowo, zatem może występować problem implementacji sprzętowej. Poza tym często dokładność podążania za trajektorią zadaną zależy od precyzji odtwarzania zmiennych stanu. Jedną z najlepszych oraz najmniej złożonych metod (biorąc pod uwagę strukturę regulatora) jest zastosowanie regulatora stanu. Szczególnie w przypadku sterowania napędem elektrycznym o zwiększonej liczbie zmiennych stanu tłumienie oscylacji może być bardzo skuteczne. Problemem w przypadku aplikacji takiego regulatora jest jednak wrażliwość układu na zmiany parametrów obiektu [13]. W niniejszej publikacji zaproponowano rozwiązanie tego problemu poprzez wprowadzenie dodatkowej adaptacji nastaw regulatora. W tym celu zastosowano algorytm adaptacyjny znany z teorii sieci neuronowych – regułę delta [14]–[16]. Analizując przepływ danych w regulatorze stanu można zaobserwować analogię jego budowy do prostego modelu neuronowego (np. ADALINE [16]), natomiast współczynniki wzmocnień mogą być potraktowane jako wagi sieci neuronowej. Szczegóły dotyczące regulatora stanu oraz algorytmu adaptacji przedstawiono w dalszej części artykułu. Ponadto zamieszczono wyniki testów prezentujących działanie adaptacyjnego regulatora stanu oraz przebiegi prezentujące porównanie w odniesieniu do układu klasycznego. W badaniach analizowano wpływ zmian mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej oraz różne opóźnienia obwodu kształtowania momentu elektromagnetycznego. Jest to istotne, ponieważ w trakcie projektowania wpływ opóźnienia tej pętli, w celu uproszczenia obliczeń został pominięty. Wprowadzone założenie ma również dodatkową zaletę, umożliwia rozwinięcie otrzymanych wniosków na napędy elektryczne z różnymi typami silników. Podsumowując, w trakcie projektowania układ dwumasowy został przedstawiony w postaci transmitancji opisującej część mechaniczną.

Artykuł został podzielony na pięć części, pracę rozpoczyna krótkie wprowadzenie przedstawiające uzasadnienie analizowanej tematyki. Następnie opisano model układu dwumasowego, po czym przedstawiono syntezę regulatora stanu o zmiennych parametrach, przestrajanych zgodnie z regułą delta. W dalszej części publikacji zamieszczono wyniki badań oraz podsumowanie.

2. MODEL UKŁADU NAPĘDOWEGO Z POŁĄCZENIEM SPRĘŻYSTYM

Układ sterowania zastosowany dla silników połączonych wałem o skończonej sztywności oparto na klasycznej kaskadowej strukturze. Wewnętrzna pętla jest przeznaczona do kształtowania momentu elektromagnetycznego, zawiera: regulator prądu, układ pomiaru prądu, część związaną z energoelektroniką. W trakcie projektowania regulatora stanu założono idealne, bezzwłoczne działanie tego obwodu. W testach sprawdzano dodatkowo dokładność działania układu regulacji w przypadku reprezentacji tej części napędu za pomocą członu inercyjnego pierwszego rzędu ze stałą czasową T_{me} (dla regulatora projektowanego dla $T_{me} = 0$ s). W zewnętrznej części zawarto regulator prędkości, który w niniejszym przypadku uwzględnia kontrolę wszystkich zmiennych stanu układu dwumasowego. W związku z powyższym w układzie istnieje konieczność odtwarzania zmiennych stanu, w tym celu zastosowano filtr Kalmana. Szczegóły dotyczące tego algorytmu odtwarzania w zastosowaniu do układu napędowego z elastycznym wałem zostały przedstawione w publikacji [6], [12]. Analizowana struktura sterowania została przedstawiona na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat blokowy struktury sterowania

Część mechaniczną napędu stanowią człony całkujące reprezentujące: maszyny w układzie oraz element sprzęgający. Zakładając w rozważaniach odniesienie poszczególnych zmiennych stanu do wartości znamionowych, jednym ze sposobów opisu układu dwumasowego jest poniższy układ równań [10]–[13]:

$$\begin{aligned}
T_1 \frac{d\omega_1(t)}{dt} &= m_e(t) - m_s(t) \\
T_2 \frac{d\omega_2(t)}{dt} &= m_s(t) - m_l(t) \cdot \\
T_c \frac{dm_s(t)}{dt} &= \omega_1(t) - \omega_2(t)
\end{aligned}
\tag{1-3}$$

W powyższych wzorach oznaczono: ω_1 , ω_2 – prędkości silnika oraz obciążenia, m_s – moment skrętny, m_e – moment elektromagnetyczny, m_l – moment obciążenia, T_1 , T_2 , T_c – mechaniczne stałe czasowe: silnika, maszyny roboczej oraz sprzęgła.

W badaniach przyjęto następujące wartości stałych czasowych: $T_1 = T_2 = 203$ ms oraz $T_c = 2,6$ ms.

3. ADAPTACYJNY REGULATOR STANU

Obliczenia przedstawione w artykule zostały zrealizowane zgodnie z metodą przedstawioną w [6]. Wstępnie założono następującą transmitancję obwodu kształtowania momentu elektromagnetycznego:

$$G(s) = 1. \tag{4}$$

Część regulatora bazująca bezpośrednio na uchybie pomiędzy wartością zadaną a prędkością maszyny roboczej, opisana jest poniższą zależnością:

$$R = \frac{K_i}{s}. \tag{5}$$

Wprowadzając do zapisu operator Laplace'a oraz uwzględniając równania (1)–(5), otrzymano następujący opis obiektu:

$$\begin{aligned}
T_1 s \omega_1 &= m_e - m_s \\
T_2 s \omega_2 &= m_s - m_l \\
T_c s m_s &= \omega_1 - \omega_2 \\
m_e &= R(\omega_{ref} - \omega_2) - k_1 \omega_1 - k_2 m_s - k_3 \omega_2
\end{aligned}
\tag{6-9}$$

Na podstawie powyższego układu równań możliwe jest wyznaczenie zależności:

$$\begin{aligned}
&\omega_2 (T_1 T_2 T_c s^3 + T_1 s + T_2 s + R + k_1 T_c T_2 s^2 + k_1 + k_2 T_2 s + k_3) \\
&= R \omega_{ref} - k_1 T_c s m_l - k_2 m_l - m_l - T_1 T_c s^2 m_l.
\end{aligned}
\tag{10}$$

Przekształcając równanie (10), uzyskano transmitancję przewodnią układu przedstawionego na rysunku 1:

$$\frac{\omega_2}{\omega_{ref}} = \frac{K_i}{s^4 T_1 T_2 T_c + s^3 k_1 T_c T_2 + s^2 (T_1 + T_2 + k_2 T_2) + s(k_1 + k_3) + K_i}, \quad (11)$$

zatem równanie charakterystyczne zamkniętego układu regulacji ma postać:

$$H(s) = s^4 + s^3 \frac{k_1}{T_1} + s^2 \left(\frac{1}{T_2 T_c} + \frac{1}{T_1 T_c} + \frac{k_2}{T_1 T_c} \right) + s \left(\frac{k_1}{T_1 T_2 T_c} + \frac{k_3}{T_1 T_2 T_c} \right) + \frac{K_i}{T_1 T_2 T_c}. \quad (12)$$

W celu wyznaczenia zależności opisujących wartości nastaw regulatora stanu (K_i , k_1 , k_2 , k_3), wyrażenia przy operatorach Laplace'a z równania (12) porównano z odpowiednimi (tego samego rzędu) z poniższego równania:

$$\begin{aligned} & (s^2 + 2\xi_r \omega_o s + \omega_o^2) (s^2 + 2\xi_r \omega_o s + \omega_o^2) \\ & = s^4 + s^3 (4\xi_r \omega_o) + s^2 (2\omega_o^2 + 4\xi_r^2 \omega_o^2) + s (4\xi_r \omega_o^3) + \omega_o^4, \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie: ξ_r – współczynnik tłumienia, ω_o – częstotliwość rezonansowa. W efekcie formułowany jest układ równań, po rozwiązaniu którego otrzymywane są zależności opisujące parametry regulatora stanu:

$$\begin{aligned} k_1 &= 4\xi_r \omega_o T_1 \\ k_2 &= T_1 T_c \left(2\omega_o^2 + 4\xi_r^2 \omega_o^2 - \frac{1}{T_2 T_c} - \frac{1}{T_1 T_c} \right) \\ k_3 &= T_1 T_2 T_c \left(4\xi_r \omega_o^3 - \frac{k_1}{T_1 T_2 T_c} \right) = T_1 T_2 T_c 4\xi_r \omega_o^3 - k_1 \\ K_i &= \omega_o^4 T_1 T_2 T_c \end{aligned} \quad (14)–(17)$$

W celu poprawy odporności układu na zmiany parametrów obiektu wprowadzono adaptację nastaw zgodnie z algorytmem, który często stosowany jest w optymalizacji współczynników wagowych sieci neuronowych – regułą delta [14]–[16]. Trening tego typu modelu, ma na celu minimalizację funkcji celu względem parametrów sieci \mathbf{w} , czyli w każdej iteracji obliczeń k błąd E powinien być redukowany:

$$E(\mathbf{w}(k+1)) < E(\mathbf{w}(k)). \quad (18)$$

W trakcie wyznaczenia zależności funkcji celu od wartości sieci neuronowej wykorzystuje się rozwinięcie w szereg Taylora:

$$E(\mathbf{w}(k+1)) = E(\mathbf{w}(k) + \Delta\mathbf{w}(k)) \approx E(\mathbf{w}(k)) + \mathbf{g}(k)\Delta\mathbf{w}(k). \quad (19)$$

Zależność (18) jest spełniona jeśli:

$$\mathbf{g}(k)\Delta\mathbf{w}(k) < 0, \quad (20)$$

zatem adaptacja wag sieci neuronowej powinna być realizowana zgodnie z równaniem:

$$\mathbf{w}(k+1) = \mathbf{w}(k) - \eta\mathbf{g}(k), \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (21)$$

gdzie:

$$\mathbf{g}(k) = \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial \mathbf{w}}, \quad (22)$$

natomiast η – niewielka stała czasowa decydująca o kroku adaptacji. Przyjmując jako funkcję celu różnicę pomiędzy wartością rzeczywistą y a zadaną d , podniesiony do drugiej potęgi:

$$E(\mathbf{w}(k)) = (y(k) - d(k))^2 = \left(\sum_{i=1}^N x_i(k)w_i(k) - d(k) \right)^2, \quad (23)$$

po przekształceniach, uzyskiwane jest równanie opisujące adaptację parametrów:

$$\Delta\mathbf{w}(k) = -\alpha \left(\sum_{i=0}^N x_i(k)w_i(k) - d(k) \right) x_i(k), \quad (24)$$

gdzie $\alpha = 2\eta$.

W przypadku zastosowania powyższego algorytmu w regulatorze stanu, należy zaznaczyć, że minimalizowany jest błąd zdefiniowany następująco:

$$e = \omega_{refm} - \omega_2, \quad (25)$$

wartość zadana prędkości wprowadzana jest poprzez model odniesienia, opisany poniższą zależnością:

$$G_{ref}(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}, \quad (26)$$

w której oznaczono: ξ – współczynnik tłumienia oraz ω – pulsacja rezonansowa. Parametry modelu odniesienia kształtują dynamikę wymuszaną w układzie regulacji. Ze względu na definicję minimalizowanego błędu (25) adaptacji w regulatorze stanu podlegały współczynniki: k_1 , k_3 , K_i (rysunek 1). Współczynnik α decyduje o szybkości adaptacji. Wartościami wejściowymi x_i , ze wzoru (24) są: prędkości silnika, prędkość maszyny roboczej, uchyb regulacji prędkości ω_2 . Należy podkreślić, że obliczenia są realizowane *on-line*, w trakcie pracy napędu.

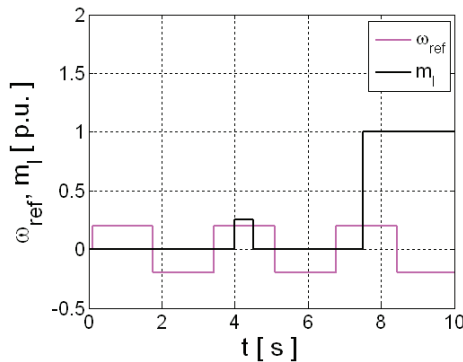
4. WYNIKI BADAŃ

Układ regulacji opisany w poprzedniej części artykułu, przedstawiony na rysunku 1, zaimplementowano w programie Matlab/Simulink. Krok obliczeniowy przyjęto na poziomie $t = 0,0001$ s. Wartości początkowe adaptowalnych nastaw regulatora stanu wyznaczono na podstawie (14), (16), (17). Poza testami prezentującymi wpływ opóźnień w pętli kształtowania momentu elektromagnetycznego, przyjęto $T_{me} = 0$ s. W celu dokładniejszego porównania regulatora adaptacyjnego oraz klasycznego wyznaczono błąd zgodnie ze wzorem:

$$IAE = \int |\varepsilon| dt = \int |z - \omega_2| dt, \quad (27)$$

gdzie: z – wartość zadana prędkości, ω_2 – prędkość wyjściowa układu regulacji.

Na rysunku 2 zamieszczono wartości przebiegi, prezentujące zmiany wartości zadanej ω_{ref} oraz momentu obciążenia m_l w strukturze sterowania. Poszczególne testy trwają 10 sekund, w tym czasie wymuszane są cykliczne nawroty z prędkością równą 20% wartości znamionowej oraz przełączane jest obciążenie.

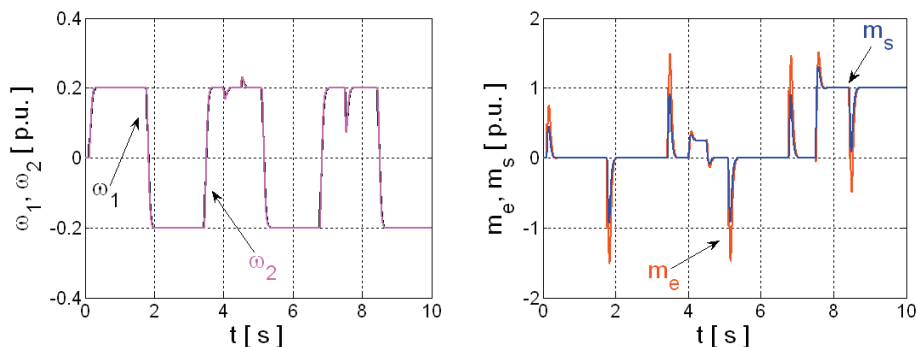


Rys. 2. Przebiegi sygnałów zadawanych w układzie napędowym

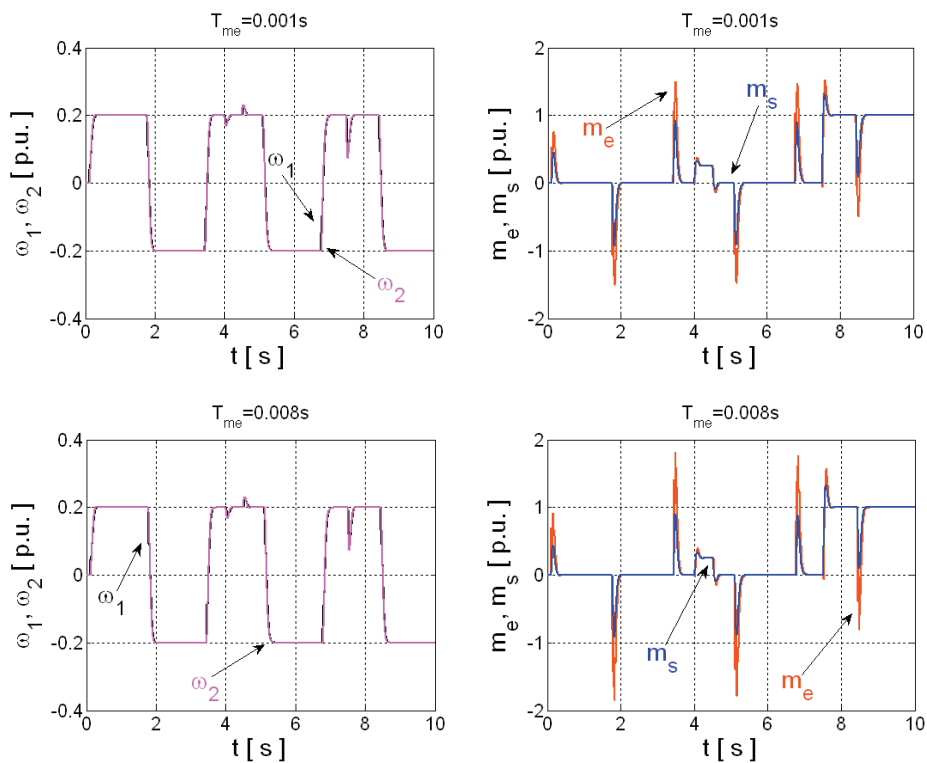
Na rysunku 3 zaprezentowano testy przedstawiające poprawność działania układu ze zmodyfikowanym regulatorem stanu. Prędkość zadana jest osiągana bardzo dynamicznie, w czasie przełączania momentu obciążenia (w trakcie kolejnych nawrotów napędu) układ regulacji reaguje, w wyniku czego uskok prędkości jest krótkotrwały, po czym utrzymana zostaje wartość referencyjna.

Następnie testowano wpływ opóźnienia pętli kształtowania momentu elektromagnetycznego. Uzyskane wyniki zamieszczono na rysunku 4. W przypadku wolniejszego obwodu elektromagnetycznego obserwowane jest nieznaczne zwiększenie wartości momentu w stanach przejściowych. Warto podkreślić, że w każdym z przypadków przebiegi prędkości w układzie napędowym są niemal identyczne. Na podstawie prze-

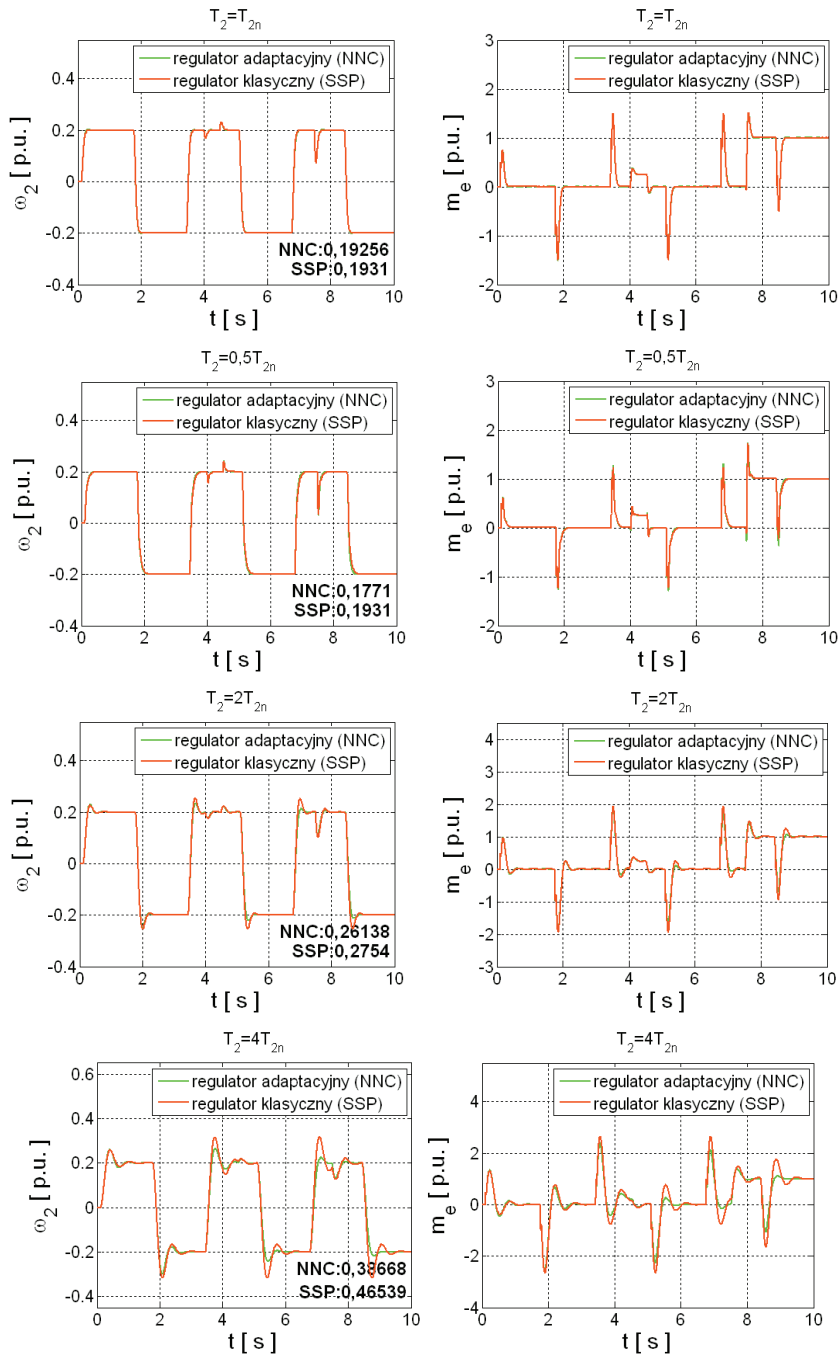
prowadzonej analizy można założyć, że adaptacyjny regulator stanu może być stosowany w układach napędowych z różnymi typami silników.



Rys. 3. Przebiegi zmiennych stanu w strukturze sterowania z adaptacyjnym regulatorem stanu



Rys. 4. Przebiegi zmiennych stanu w strukturze sterowania z adaptacyjnym regulatorem stanu, wykonane dla różnych wartości parametru T_{me}



Rys. 5. Porównanie działania adaptacyjnego regulatora stanu z klasyczną strukturą, badania wykonane dla różnych wartości parametru T_2

W kolejnym etapie badań wykonano testy porównawcze adaptacyjnego oraz klasycznego regulatora stanu. Analizowano działanie układu regulacji dla zmian stałej czasowej T_2 (rysunek 5). Na przebiegach prędkości ω_2 zamieszczone zostały wartości błędu I_{AE} dla obu testowanych regulatorów, obliczone dla identycznych warunków badań (pracy napędu). W każdym z przedstawionych przypadków regulator adaptacyjny wykazywał większą dokładność podążania według zadanej trajektorii prędkości. Zmiana T_2 wprowadza istotne zakłócenia w działaniu układu z klasycznym regulatorem stanu, pojawiają się przeregulowania. W testach zrealizowanych dla regulatora adaptacyjnego można zaobserwować oddziaływanie algorytmu opisanego równaniem (24). W kolejnych cyklach pracy pojawia się uchyb regulacji, na podstawie tej informacji wprowadzana jest poprawka w nastawach regulatora. W efekcie, przykładowo dla większej wartości T_2 , wymuszany moment elektromagnetyczny w stanach przejściowych przyjmuje mniejsze wartości, przeregulowania są tłumione, ponadto poprawione jest działanie układu w trakcie przełączeń obciążenia. Konkludując, przestrajanie wartości nastaw regulatora stanu powoduje zdecydowaną poprawę działania układu napędowego w przypadku zmian parametrów sterowanego obiektu.

5. PODSUMOWANIE

W artykule zaproponowano zmodyfikowany, adaptacyjny regulator stanu zastosowany w układzie regulacji prędkości napędu elektrycznego z połączeniem sprężystym. Zaprezentowano metodykę projektowania oraz wyniki testów. Precyzja działania klasycznego regulatora stanu jest w znacznym stopniu zależna od dokładności identyfikacji obiektu. Wprowadzenie adaptacji znacznie poprawia działanie układu regulacji. Uzyskane wyniki przedstawiają dużą dynamikę opisanego układu regulacji oraz odporność na zmiany wybranych parametrów układu napędowego.

LITERATURA

- [1] JIE L., HAI-PENG R., YAN-RU Z., *Robust Speed Control of Induction Motor Drives Using First-Order Auto-Disturbance Rejection Controllers*, IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, Vol. 51, No. 1, 712–720.
- [2] SUN W., YU Y., WANG G., XU D., *A novel design method for adaptive full order observer feedback matrix and speed estimation algorithm*, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2014, 1–7.
- [3] PAJCHROWSKI T., ZAWIRSKI K., *Application of artificial neural network to robust speed control of servodrive*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, No. 1, 200–207.
- [4] SZABAT K., *Model obserwatora zmiennych stanu dla układu z nieliniowym walem mechanicznym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, 2009, Vol. 63, No. 29, 355–368.
- [5] VILLWOCK S., PACAS M., *Time-Domain Identification Method for Detecting Mechanical Backlash in Electrical Drives*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, Vol. 56, No. 2, 568–573.

- [6] SZABAT K., *Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 61, Seria: Monografie Nr 19, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [7] PAUL P., MUSZYŃSKI R., *Zmodyfikowany obserwator w układzie napędowym z połączeniem sprężystym*, Materiały konferencji SENE '03, 2003, 399–404.
- [8] KOROUNDI P., HASHIMOTO H., UTKIN V., *Discrete sliding mode control of two mass system*. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 1995, Vol. 1, 338–343.
- [9] DERUGO P., *Analiza wpływu konkurencyjnych warstw Petriego na działanie regulatora neuronowo-rozmytego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 69, Seria: Studia i Materiały, Nr 33, 2013, 97–110.
- [10] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., *Control of the drive system with stiff and elastic couplings using adaptive neuro-fuzzy approach*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, No. 1, 228–240.
- [11] KAMINSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., *Neural speed controller based on two state variables applied for a drive with elastic connection*, 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014, 610–615.
- [12] SERKIES P. J., SZABAT K., *Application of the MPC to the position control of the two-mass drive system*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, Vol. 60, No. 9, 3679–3688.
- [13] SZABAT K., *Zastosowanie regulatora stanu w strukturze sterowania układu dwumasowego*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 62, Seria: Studia i Materiały, Nr 28, 2008, 452–457.
- [14] OSOWSKI S., *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006.
- [15] FAUSETT L. V., *Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms And Applications*, Prentice Hall, 1993.
- [16] WIDROW B., LEHR M. A., *30 years of adaptive neural networks: perceptron, Madaline, and backpropagation*, Proceedings of the IEEE, 1990, Vol. 78, No. 9, 1415–1442.

STATE SPACE CONTROLLER WITH CHANGEABLE PARAMETERS APPLIED IN CONTROL STRUCTURE OF TWO-MASS SYSTEM

In this paper design process of state space controller with on-line adaptation of parameters is presented. The delta rule is implemented for adaptation of gains of the controller. The object is electrical drive with elastic connection between motor and load machine. Reduced number of measurement sensors is assumed. For this purpose the Kalman filter is used. Tests show comparison between classical and proposed, adaptive controller. Improvement of speed control, using described controller, is achieved, especially in presence of parameters changes of the two-mass system.