

Zastosowanie algorytmu *BAT* w optymalizacji obliczeń adaptacyjnego regulatora stanu układu dwumasowego

Streszczenie. W publikacji analizowany jest regulator stanu, którego parametry podlegają adaptacji zgodnie z regułą Widrowa-Hoffa. Stały współczynnik wykorzystywany przy wyznaczaniu poprawek regulatora stanu wyznaczono za pomocą algorytmu *BAT*. Sterowanym obiektem jest układ dwumasowy. Przedstawiono analizę właściwości dynamicznych struktury sterowania, wykonano badania dla znamionowych oraz zmodyfikowanych parametrów obiektu, a także porównano działanie klasycznego oraz adaptacyjnego regulatora stanu. Zaprojektowany regulator zaimplementowano w karcie dSPACE1103, a następnie przeprowadzono testy na stanowisku laboratoryjnym.

Abstract. In article adaptive state space controller is analyzed. Parameters are recalculated according to Widrow-Hoff rule. Inside adaptation algorithm, the constant value of learning rate is selected using *BAT* algorithm. The plant used in control structure is two-mass system. Dynamical properties of proposed controller are considered. Results are prepared for nominal and disturbed parameters of the plant. Comparison between classical and adaptive controller is also presented. Designed controller has been implemented in dSPACE1103 card, then experiment was prepared. (*Application of the *BAT* algorithm in optimization of adaptive state space controller used for two-mass system*).

Słowa kluczowe: adaptacyjny regulator stanu, współczynnik uczenia, algorytm *BAT*, układ dwumasowy.

Keywords: adaptive state space controller, learning coefficient, *BAT* algorithm, two-mass system.

Wstęp

Układ dwumasowy stanowi połączenie dwóch elementów inercyjnych, w którym sygnał przetwarzany nie jest przekazywany idealnie. W konstrukcji występuje dodatkowy człon inercyjny (o zdecydowanie mniejszej stałej czasowej w porównaniu do pozostałych części), który może być przyczyną występowania oscylacji zmiennych stanu w układzie. Zadaniem teorii sterowania jest w takim przypadku tłumienie zakłóceń, a w efekcie precyzyjne sterowanie całą strukturą [1]-[3]. Model układu dwumasowego reprezentuje zjawiska, które mogą być zaobserwowane w napędach elektrycznych wielu urządzeń, np. robotów przemysłowych [4], taśmociągów [5], mechanizmów maszyn papierniczych [6], itp. W celu dokładniejszego opisu rzeczywistych obiektów, dodatkowo wprowadzane są również elementy związane z tarcieniem lub luzem połączenia silników napędu [7].

Bardzo dobre rezultaty sterowania układem dwumasowym uzyskiwane są poprzez zastosowanie regulatora stanu [8], [9]. Dokładność odtwarzania trajektorii zadanej jest w tym przypadku dodatkowo połączona z niską złożonością obliczeniową regulatora. Jednak uzyskiwane wyniki są bezpośrednio zależne od jakości identyfikacji parametrów obiektu. W celu zwiększenia odporności struktury sterowania na zakłócenia w postaci fluktuacji stałych czasowych obiektu zastosowano adaptację parametrów regulatora. Zaobserwowano podobieństwo pomiędzy przetwarzaniem danych regulatora stanu oraz modelu sztucznego neuronu. W analizowanym regulatorze sygnał zadany momentu elektromagnetycznego jest obliczany jako suma zmiennych sprzężeń zwrotnych z uwzględnieniem odpowiednich współczynników. Model neuronu liniowego realizuje obliczenia definiowane jako ważona suma sygnałów wejściowych. W związku z tym adaptacja wzmacnień jest realizowana zgodnie z metodyką stosowaną w teorii sieci neuronowych – regułą *Widrowa-Hoffa* [10]-[12]. Jednym z najbardziej problematycznych zagadnień, w praktycznych aplikacjach związanych z sieciami neuronowymi, jest dobór parametrów algorytmu adaptacyjnego, tzw. współczynnika uczenia. Determinuje on krok obliczeń, a w związku z tym szybkość osiągnięcia minimum funkcji celu oraz precyzję obliczeń. W literaturze trudno znaleźć informacje dotyczące sposobu wyznaczania tego parametru, jednocześnie przedstawiany jest znaczący wpływ tej wielkości na działanie całej struktury neuronowej

[13]-[15]. W niniejszej publikacji, w celu rozwiązania tego problemu, zastosowano algorytm *BAT* [16]. Należy podkreślić, że optymalizacja parametru algorytmu treningowego była realizowana *off-line*, wartość ta nie była zmieniana w trakcie pracy układu regulacji. Natomiast wzmożenie w torach sprzężeń zwrotnych regulatora stanu były obliczane *on-line*, w trakcie pracy napędu.

Szczegóły dotyczące adaptacyjnego regulatora stanu oraz algorytmu *BAT* przedstawiono w kolejnych rozdziałach artykułu. Następnie zaprezentowano wybrane wyniki badań (symulacyjnych, a także eksperymentalnych) oraz podsumowanie.

Opis regulatora stanu oraz układu dwumasowego

Ogólna struktura analizowanego układu sterowania została przedstawiona na rysunku 1. W pętli regulacji prędkości napędu zastosowano regulator stanu, zawierający człon całkujący w głównym torze przetwarzania. Następnie sygnał sterujący jest zadawany poprzez sumowanie poszczególnych zmiennych stanu załączonych do torów sprzężeń zwrotnych. Całkę wyprowadzono na wyjście tej części układu, w ten sposób sygnał ograniczający całą stanowi limit dla zadawanego prądu w strukturze napędowej. W trakcie działania układu wprowadzane są korekty dla współczynników sprzężeń zwrotnych: K_i , k_1 , k_3 . Zgodnie z teorią dotyczącą napędu elektrycznego, część struktury sterowania dotycząca pętli prądowej, w wielu przypadkach, w celu uproszczenia analizy, przedstawiana jest jako człon inercyjny pierwszego rzędu [2], [9]:

$$(1) \quad G_c(s) = \frac{1}{T_{me}s + 1},$$

gdzie: T_{me} – zastępcza stała czasowa obwodu regulacji prądu.

W trakcie projektowania założono $T_{me}=0s$, co oznacza idealną, bezwłoczną pętlę kształtowania momentu elektromagnetycznego. W celu obliczenia wartości początkowych regulatora wyprowadzono transmitancję przewodnią struktury sterowania:

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

równanie charakterystyczne zamkniętego układu regulacji ma postać:

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

Zgodnie z teorią sterowania, w celu wyznaczenia zależności opisujących nastawy regulatora należy utworzyć układ równań, poprzez zestawienie odpowiednich składowych równania (3) oraz zależności:

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

gdzie: ξ_r – współczynnik tłumienia, ω_o – częstotliwość rezonansowa. Ostatecznie otrzymywane są wzory opisujące wartości początkowe współczynników przyjętych w sprzężeniach zwrotnych układu sterowania:

$$(5-8) \begin{aligned} K_i &= \omega_o^4 T_1 T_2 T_c \\ k_1 &= 4\xi_r \omega_o T_1 \\ k_2 &= T_1 T_c \left(2\omega_o^2 + 4\xi_r^2 \omega_o^2 - \frac{1}{T_2 T_c} - \frac{1}{T_1 T_c} \right) \\ k_3 &= (T_1 T_2 T_c 4\xi_r \omega_o^3) - (4\xi_r \omega_o T_1) \end{aligned}$$

W celu poprawy odporności układu w każdym kroku i obliczeń algorytmu nastawy są modyfikowane:

$$(9-11) \begin{aligned} K_i(i+1) &= K_i(i) + \Delta K_i(i) = K_i(i) + \alpha g_i(i), \\ k_1(i+1) &= k_1(i) + \Delta k_1(i) = k_1(i) + \alpha g_1(i), \quad i = 0, 1, 2, \dots \\ k_3(i+1) &= k_3(i) + \Delta k_3(i) = k_3(i) + \alpha g_3(i), \end{aligned}$$

gdzie:

$$(12-14) \begin{aligned} g_i(i) &= \frac{\partial E}{\partial K_i}, \\ g_1(i) &= \frac{\partial E}{\partial k_1}, \\ g_3(i) &= \frac{\partial E}{\partial k_3} \end{aligned}$$

natomiast α – współczynnik uczenia. Funkcja celu dla dowolnego modelu neuronowego może być zapisana następująco:

$$(15) E(\mathbf{w}(i)) = \frac{1}{2} (d(i) - y(i))^2 = \frac{1}{2} \left(d(i) - \sum_{j=1}^N x_j(i) w_j(k) \right)^2,$$

gdzie: d – wartość zadana, y – wyjście modelu neuronowego, w – współczynniki wagowe. Odnosząc ogólne oznaczenia przyjęte we wzorze (15) do adaptacyjnego regulatora stanu, należy wstępnie zdefiniować błąd e_{nn} , który jest minimalizowany w trakcie obliczeń algorytmu adaptacyjnego:

$$(16) E(K_i(i), k_1(i), k_3(i)) = \frac{1}{2} (e_{nn}(i))^2,$$

Po wyznaczeniu gradientu funkcji (16) otrzymywane są równania opisujące korekty nastaw regulatora stanu:

$$(17-19) \begin{aligned} \Delta K_i(i) &= \alpha \frac{\partial E}{\partial K_i} = -\alpha e_{nn}(i) e(i) \\ \Delta k_1(i) &= \alpha \frac{\partial E}{\partial k_1} = -\alpha e_{nn}(i) \omega_1(i) \\ \Delta k_3(i) &= \alpha \frac{\partial E}{\partial k_3} = -\alpha e_{nn}(i) \omega_2(i) \end{aligned}$$

Powyższe równania są analogiczne do wzorów stosowanych w optymalizacji wag modelu ADALINE [10]-[12]. Zgodnie z założeniami bezpośredniego adaptacyjnego sterowania neuronowego można z pewnymi ograniczeniami wprowadzić założenie dotyczące minimalizacji błędu z uwzględnieniem obiektu [17]:

$$(20-22) \begin{aligned} \Delta K_i(i) &= \alpha \frac{\partial E}{\partial K_i} = -\alpha e_{refm}(i) e(i) \\ \Delta k_1(i) &= \alpha \frac{\partial E}{\partial k_1} = -\alpha e_{refm}(i) \omega_1(i) \\ \Delta k_3(i) &= \alpha \frac{\partial E}{\partial k_3} = -\alpha e_{refm}(i) \omega_2(i) \end{aligned}$$

gdzie:

$$(23) e_{refm} = \omega_{refm} - \omega_1$$

W torze głównym regulatora błąd e jest wyznaczany bezpośrednio na podstawie wartości zadanej oraz prędkości ω_2 . Natomiast w przetwarzaniu algorytmu adaptacji, w celu uzyskania zbieżności obliczeń, dla uchybu e_{refm} sygnał zadany jest wprowadzany poprzez model odniesienia:

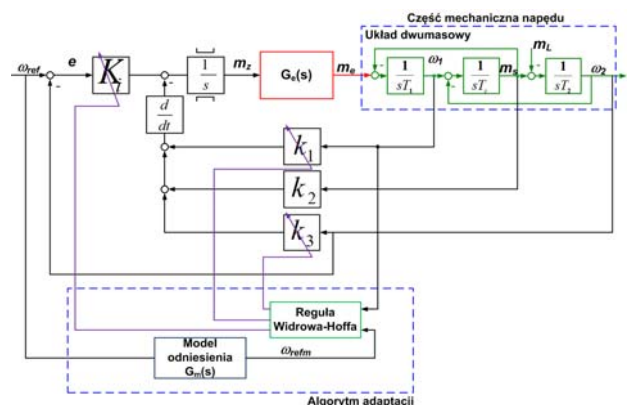
$$(24) G_m(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\xi \omega s + \omega^2},$$

gdzie: ξ – współczynnik tłumienia oraz ω – pulsacja rezonansowa.

Układ dwumasowy reprezentujący część mechaniczną jest opisany następującym równaniem stanu [1]-[4], [8], [9]:

$$(25) \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ m_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{T_1} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_2} \\ \frac{1}{T_c} & -\frac{1}{T_c} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ m_s(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_e(t) \\ m_L(t) \end{bmatrix}$$

gdzie: ω_1 – prędkość silnika, ω_2 – prędkość maszyny roboczej, m_s – moment skrętny, m_e – moment elektromagnetyczny, m_L – moment obciążenia, T_1 – mechaniczna stała czasowa silnika, T_2 – mechaniczna stała czasowa obciążenia, T_c – stała czasowa elementu sprzężystego.

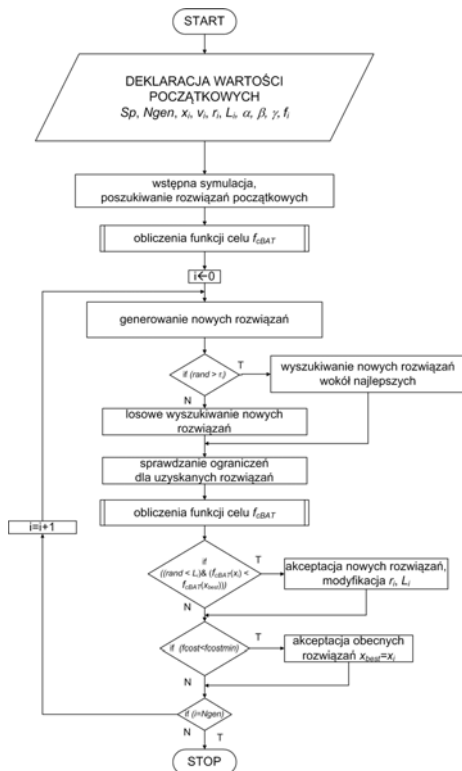


Rys.1. Schemat blokowy struktury sterowania

Algorytm BAT

W strukturze sterowania przedstawionej na rysunku 1, wartości początkowe nastaw: K_i , k_1 , k_3 , a także stały współczynnik k_2 , zostały obliczone według równań (5)-(8). Adaptacja dla wybranych parametrów jest realizowana

zgodnie z zależnościami (9)-(11). Parametr α , występujący w równaniach opisujących korekty nastaw regulatora, został wyznaczony za pomocą algorytmu BAT. Na rysunku 2 zamieszczono schemat blokowy prezentujący proces przetwarzania danych w obliczeniach optymalizacyjnych.



Rys.2. Schemat blokowy przedstawiający ogólną ideę algorytmu BAT

BAT jest metaheurystycznym algorytmem optymalizacyjnym. Obliczenia są realizowane iteracyjnie, sposób przetwarzania jest oparty na obserwacjach biologicznych. Wstępnie definiowane są parametry populacji osobników oraz parametry związane z obliczeniami. Wśród najistotniejszych należy wymienić: prędkość osobników v_i , położenie osobników x_i oraz częstotliwość zmian f_i , parametry związane z oddziaływaniem otoczenia: L_i oraz r_i , ilość powtórzeń N_{gen} . Wartość początkowa poszukiwanego parametru równań (9)-(11) została wyznaczona losowo. Pierwszym etapem działania algorytmu BAT była wstępna symulacja oraz obliczenia funkcji celu:

$$(26) \quad f_{c,BAT} = \frac{\sum_{i=1}^p |\omega_{ref1} - \omega_{2i}|}{p}$$

gdzie: p – liczba próbek przebiegu. Następnie rozpoczynana jest część obliczeń powtarzana cyklicznie. Na podstawie wstępnie uzyskanych wyników, aktualizowane są zmienne związane ze stanem populacji:

$$(27-29) \quad \begin{aligned} f_i &= f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\beta \\ v_i(k) &= v_i(k-1) + (x_i(k) - x_{best})f_i \\ x_i(k) &= x_i(k-1) + v_i(k) \end{aligned}$$

W dalszych obliczeniach wyznaczane są nowe rozwiązania optymalne, losowo lub wokół aktualnie najlepszych rozwiązań, zależnie od wartości r_i . Po sprawdzeniu ograniczeń przeliczana jest funkcja celu (26), na tej

podstawie wprowadzane są ewentualne zmiany wartości parametrów algorytmu:

$$(30-31) \quad \begin{aligned} L_i(k+1) &= \alpha L_i(k) \\ r_i(k+1) &= r_i^0 (1 - \exp(-\gamma k)), \end{aligned}$$

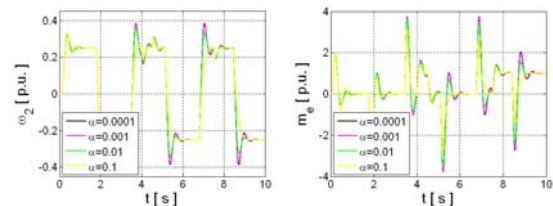
gdzie: r_i^0 – wartość początkowa.

W ostatnim etapie działania każdej iteracji algorytmu BAT sprawdzana jest dokładność działania układu z uzyskanymi aktualnie wartościami, rezultat jest porównywany z najlepszymi rozwiązaniami, na tej podstawie podejmowana jest decyzja o akceptacji nowych rozwiązań [16].

Badania symulacyjne

Badania symulacyjne wykonano w programie Matlab. W testach przyjęto krok obliczeniowy równy $t=0,1ms$. W układzie dwumasowym, opisanym równaniem (25), wprowadzono następujące wartości stałych czasowych: $T_1 = T_2 = 203ms$ oraz $T_c = 1,2ms$. W układzie założono pełną obserwowalność pomiarową zmiennych stanu, pominięto estymatory. W większości badań symulacje trwają 10 sekund, w tym czasie zadawana trajektoria prędkości wymusza cykliczne nawroty napędu z prędkością znamionową równą 25% wartości znamionowej, jednocześnie w strukturze sterowania przełączane jest obciążenie.

Jednym z najistotniejszych celów niniejszej aplikacji było zastosowanie algorytmu optymalizacyjnego w doborze parametru układu adaptacji regulatora (tzw. współczynnika uczenia). Pierwsze testy, zaprezentowane na rysunku 3, przedstawiają istotność wymienionego zagadnienia. Przebiegi wykonano dla różnych wartości współczynnika α .

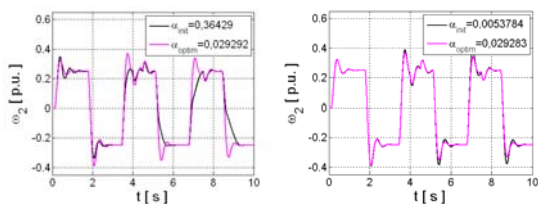


Rys.3. Przebiegi zmiennych stanu w układzie regulacji zarejestrowane dla różnych wartości parametru α

Na uzyskanych wykresach widoczny jest wpływ stałej czasowej algorytmu adaptacyjnego na szybkość dostrajania się regulatora stanu. Niewielkie wartości parametru α wpływają na dłuższy czas adaptacji, natomiast zwiększanie tej wartości wymusza szybszą adaptację. Jednak zbyt duża wartość współczynnika uczenia może powodować przeregulowania, oscylacje zmiennych stanu oraz inne zakłócenia. Zjawisko tego typu jest związane z tym, że niewielka wartość α prowadzi do niezbyt dużych przyrostów adaptowanych współczynników, a w efekcie precyzja obliczeń jest większa. Wzrost parametru współczynnika adaptacji powoduje zwiększanie kroku w poszukiwaniach optymalnej wartości, co wpływa na szybkość poszukiwań, jednak algorytm optymalizacyjny może w takim przypadku pominąć optimum globalne.

W związku z powyższym optymalizacja współczynnika α została zrealizowana za pomocą algorytmu BAT. Na rysunku 4 przedstawiono końcowy rezultat działania zastosowanej metody optymalizacji. Na przebiegach zamieszczono trajektorie prędkości obciążenia w układzie regulacji dla dwóch przypadków, w których testowano wartości α obliczone przez BAT. Początkowy poziom tego parametru był losowany. W każdym z testów algorytm zdecydowanie poprawiał adaptację regulatora stanu.

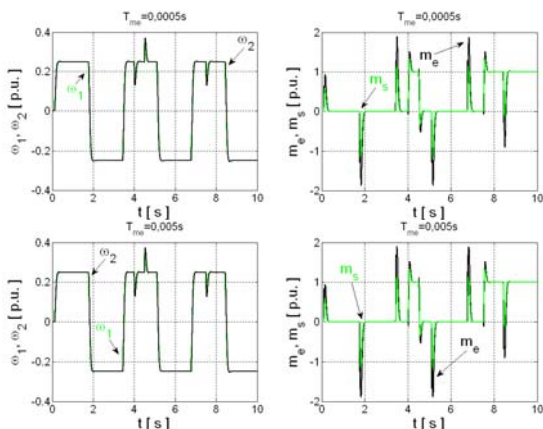
Należy podkreślić podobne wartości ostateczne, uzyskane po obliczeniach optymalizacyjnych.



Rys.4. Przebiegi wybranych zmiennych stanu w strukturze sterowania z adaptacyjnym regulatorem stanu prezentujące wpływ optymalizacji współczynnika α

Wszystkie wyniki zaprezentowane dotychczas miały na celu, przede wszystkim, analizę oddziaływania algorytmu adaptacyjnego. W celu poprawy obserwacji tego procesu, parametry początkowe regulatora (5)-(8) dobrano dla znamionowych stałych czasowych układu dwumasowego, natomiast testy realizowano dla $T_2=4T_{2n}$.

W następnym etapie badań przyjęto znamionowe parametry układu dwumasowego. W związku z odwołaniem zjawisk pojawiających się w układzie dwumasowym do napędu elektrycznego z połączeniem sprężystym, analizie poddano wpływ opóźnień wewnętrznej pętli kształtowania momentu elektromagnetycznego. W układzie regulacji prędkości zastosowano adaptacyjny regulator stanu. Wyniki zamieszczono na rysunku 5. W badanym zakresie zmian stałej czasowej T_{me} , układ regulacji działa poprawnie, nie występują istotne zakłócenia, mimo pominięcia tych zakłóceń w trakcie projektowania regulatora stanu.

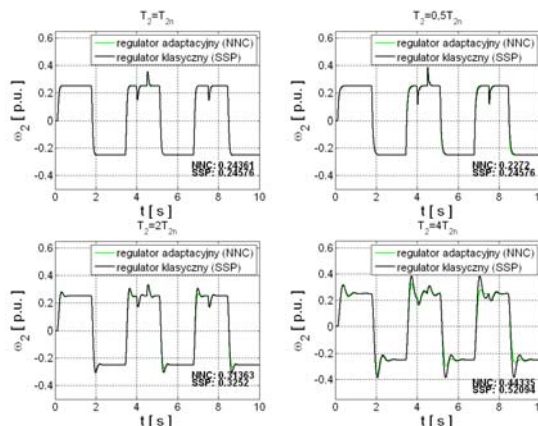


Rys.5. Przebiegi zmiennych stanu w strukturze sterowania z adaptacyjnym regulatorem stanu – wpływ parametru T_{me}

Zgodnie z generalnymi założeniami projektowymi stawianymi przed adaptacyjnym regulatorem stanu, celem jest zwiększenie odporności klasycznego regulatora na zmiany parametrów obiektu. W niniejszej części artykułu przedstawiono porównanie obu wspomnianych regulatorów w obecności zmian parametru układu dwumasowego – stałej czasowej T_2 . W celu numerycznego porównania, dodatkowo obliczono błąd regulacji, zgodnie ze wzorem:

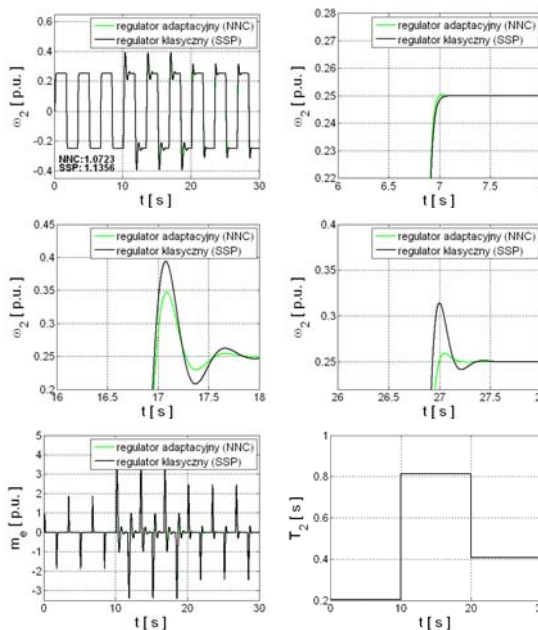
$$(32) \quad Err = \int |\varepsilon| dt = \int |z - \omega_2| dt,$$

gdzie: z – wartość zadana prędkości, ω_2 – prędkość wyjściowa układu regulacji. Wyniki zaprezentowane na rysunku 6 przedstawiają poprawę działania regulatora stanu w każdym z testowanych przypadków.



Rys.6. Przebiegi prędkości ω_2 uzyskane po zastosowaniu klasycznego oraz adaptacyjnego regulatora stanu – badania wykonane dla różnych wartości parametru T_2

Ostatnie badania symulacyjne dotyczyły testów napędu z adaptacyjnym regulatorem stanu, w których założono zmienny w czasie moment bezwładności maszyny roboczej. Test trwał 30s, zmiany wprowadzano co 10s. Napęd ponownie wykonywał cykliczne nawroty, obciążenie nie było załączane. W ten sposób potwierdzona została poprawność obliczeń nastaw regulatora stanu, a w rezultacie zwiększenie odporności struktury na zmiany stałej czasowej T_2 (w porównaniu do układu z klasycznym regulatorem), wprowadzane w trakcie działania struktury sterowania. Zaobserwowane zjawiska zostały zilustrowane przebiegami zamieszczonymi na rysunku 7.



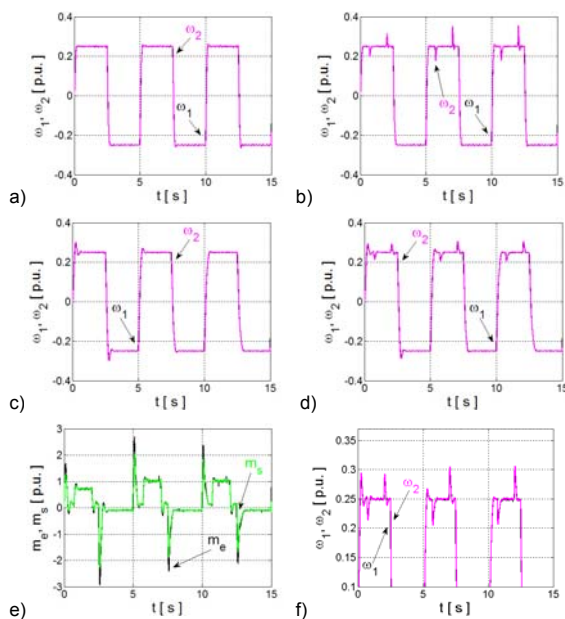
Rys.7. Wybrane przebiegi zarejestrowane w napędzie o zmiennej wartości stałej czasowej T_2

Eksperyment

W badaniach eksperymentalnych układ dwumasowy stanowiły dwa silniki prądu stałego o mocy 0,5kW, które połączone sprzęgłem o długości ok. 0,5m. Szczegóły konstrukcyjne przedstawiono w publikacji [9]. Jednym z najistotniejszych etapów prowadzonych prac, z punktu widzenia testów struktur sterowania stosowanych w napędach elektrycznych, jest implementacja algorytmu w układzie programowalnym realizującym obliczenia na stanowisku rzeczywistym. Najczęściej w tym celu stosuje

się procesory sygnałowe oraz matryce FPGA [9], [15], [18]. W opisywanej aplikacji wykorzystano procesor sygnałowy karty dSPACE1103. Program opracowano w języku programowania wysokiego poziomu - Matlab/Simulink. Warunki eksperymentu odpowiadały testom symulacyjnym (częstotliwość obliczeń, parametry).

Wybrane wyniki badań zamieszczono na rysunku 8. Wstępnie testowano układ regulacji przy znamionowych parametrach obiektu, zadana trajektoria prędkości jest odtwarzana bardzo precyzyjnie (rysunek 8a), struktura działa podobnie również w trakcie przełączania obciążenia w stanach ustalonych prędkości (rysunek 8b). W tym etapie badań wpływ algorytmu adaptacji jest praktycznie nieobserwowalny, ponieważ wartości początkowo regulatora zostały dobrane zgodnie z nominalnymi wartościami parametrów układu dwumasowego. Na kolejnych przebiegach (rysunek 8c,d) zaprezentowano analogiczne testy, jednak w celu zwiększenia stałej czasowej T_2 , na wale maszyny roboczej zamontowano dodatkowe tarcze obciążające. Zmiany momentów: elektromagnetycznego oraz skrętnego w trakcie tych badań przedstawiono na rysunku 8e. W celu umożliwienia dokładniejszej obserwacji obu prędkości napędu wybrane fragmenty sygnałów zostały powiększone na rysunku 8f. W trakcie kolejnych zmian kierunku obrotów w regulatorze dostrajane są nastawy, w efekcie korygowany jest wymuszany moment elektromagnetyczny oraz redukowane są przeregulowania wynikające ze zmian parametru układu dwumasowego.



Rys.8. Przebiegi zmiennych stanu układu napędowego – badania eksperymentalne

Podsumowanie

W publikacji zaprezentowano aplikację adaptacyjnego regulatora stanu w sterowaniu układem dwumasowym. Najistotniejszym celem była optymalizacja części regulatora obliczającej korekty dla nastaw wykorzystywanych w głównym torze przetwarzania. Zaprezentowano wpływ współczynnika adaptacyjnego na przebiegi zmiennych stanu oraz możliwość efektywnej optymalizacji tego parametru za pomocą algorytmu BAT. Ponadto wykazano zwiększenie odporności regulatora stanu, na zmiany stałej czasowej T_2 , poprzez wprowadzenie adaptacji zgodnie z regułą Widrowa-Hofa. Zaobserwowane właściwości opisywanego regulatora zostały potwierdzone w badaniach eksperymentalnych. Dodatkową zaletą proponowanej

postaci regulatora stanu, w porównaniu do wielu aplikacji stosowanych dla układu dwumasowego (opisywanych w publikacjach), jest uproszczona struktura nie wymagająca znaczącej mocy obliczeniowej.

Autorzy: dr inż. Marcin Kamiński, Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, E-mail: marcin.kaminski@pwr.edu.pl

LITERATURA

- [1] Serkies P.J., Predykcyjna regulacja prędkości serwonapędu PMSM z połączeniem sprężystym przy różnym blokowaniu sterowań, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr.11, 271-274
- [2] Deskur J., Pajchrowski T., Zawirski K., Speed controller for a drive with complex mechanical structure and variable parameters, *Proc. of 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC)*, (2014), 762-767
- [3] Drózd K., Szabat K., Adaptacyjne sterowanie układu dwumasowego z wykorzystaniem rozmytego filtra Kalmana, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.6, 40-44
- [4] Tomei P., A simple PD controller for robots with elastic joints, *IEEE Trans. Aut. Control*, 36 (1991), no.10, 1208-1213
- [5] Hacı A., Jezernik K., Sabanovic A., Improved Design of VSS controller for a linear belt-driven servomechanism, *IEEE Trans. Mechatronics*, 10 (2005), no.104, 385-390
- [6] Valenzuela M. A., Bentley J. M., Lorenz R. D., Evaluation of torsional oscillations in paper machine sections, *IEEE Trans. Ind. Applications*, 41 (2005), no.2, 493-501
- [7] Beinke S., Wertz H., Schutte F., Grotstollen H., Frohlike N., Identification of nonlinear two-mass systems for self-commissioning speed control of electrical drives, *Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 4 (1998), no.2, 2251-2256
- [8] Szabat K., Zastosowanie regulatora stanu w strukturze sterowania układu dwumasowego, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wroclawskiej*, 62 (2008), nr 28, 452-457
- [9] Szabat K., Orłowska-Kowalska T., Adaptive control of the electrical drives with the elastic coupling using Kalman filter, *Adaptive Control*, 4 (2009), 205-226
- [10] Osowski S., *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006
- [11] Fausett L.V., *Fundamentals of Neural Networks: Architectures, Algorithms And Applications*, Prentice Hall, 1993
- [12] Widrow B., Lehr M.A., 30 years of adaptive neural networks: perceptron, Madaline, and backpropagation, *Proceedings of the IEEE*, 78 (1990), n. 9, 1415-1442
- [13] Chaoui H., Sicard P., Gueaieb W., ANN-Based Adaptive Control of Robotic Manipulators With Friction and Joint Elasticity, *IEEE Trans. Ind. Electronics*, 56 (2009), n. 8, 3174-3187
- [14] Behera L., Kumar S., Patnaik A., On Adaptive Learning Rate That Guarantees Convergence in Feedforward Networks, *IEEE Trans. Neural Networks*, 17 (2006), n. 5, 1116-1125
- [15] Orłowska-Kowalska T., Kamiński M., Adaptive neural speed controllers applied for a drive system with an elastic mechanical coupling – A comparative study, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 45 (2015), 152-167
- [16] Yang X.-S., A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm, in: *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NISCO 2010)* (Eds. J. R. Gonzalez et al.), *Studies in Computational Intelligence*, Springer Berlin, 284, Springer, (2010), 65-74
- [17] Tanomaru J., Omatu S., Process Control by On-Line Trained Neural Controllers, *IEEE Trans. Ind. Electronics*, 39 (1992), n. 6, 511-521
- [18] Tarczewski T., Grzesiak L., Wawrzak A., Karwowski K., Erwiński K., Układ laboratoryjny napędu z silnikiem PMSM sterowanym z kształtującego napięcie ciągle 3-poziomowego falownika napięcia typu NPC, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2014), nr.6, 166-171