

Adaptacja reguł rozmytego modelu siły oporu w sterowaniu położeniem silnika liniowego

Marcin Jastrzębski

Wstęp

W układach sterowania modele matematyczne wykorzystuje się między innymi w zadaniach identyfikacji, sterowania adaptacyjnego czy kompensacji. Przykładem może być kompensacja siły tarcia [1, 2] w układach sterowania pozycyjnego lub śledzenia trajektorii. Oprócz wspomnianej siły tarcia na opory ruchu składają się także m.in. opór od prądów wirowych i siły występujące w przewodach doprowadzonych do silnika. Wiedza pochodząca z procesu identyfikacji obiektu może być wykorzystana w układach regulacji, zarówno do określenia struktury układu sterowania, jak i do strojenia parametrów regulatorów. W niniejszym artykule zaproponowany zostanie nieciągły model rozmyty z rozszerzonymi funkcjami następników reguł, którego zadaniem będzie odtworzenie i kompensacja całkowitej siły oporu. Dane do budowy rozmytego modelu siły oporu zostały wyznaczone w oparciu o obserwator parametryczny OPI [*Observer-based Parametr Identifiers*] [3]. Do strojenia modelu został wykorzystany ewolucyjny algorytm bakteryjny [4]. Do sterowania wykorzystano algorytm wstecznego całkowania (*backstepping*). Efektywność zaproponowanego rozwiązania sprawdzono w zadaniu sterowania położeniem silnika liniowego z magnesami trwałymi, w warunkach zmiany tarcia oraz obciążenia.

Adaptacyjny algorytm wstecznego całkowania (ang. *adaptive backstepping*) jest rozwijany od ponad 15 lat i jest uważany za jedną z najbardziej skutecznych metod sterowania układami nieliniowymi [5]. Ideę algorytmu można przedstawić następująco [6]. Obiekt sterowania jest dzielony na podsystemy. W pierwszym podsystemie wybiera się tzw. sterowanie wirtualne (zmienna stanu lub funkcja zmiennych stanu) i buduje się algorytm zmian tego sterowania, który pozwala na zrealizowanie śledzenia zadanych trajektorii przez wyjście obiektu. Zakłada się, że nieznanne parametry są stałe i występują w równaniu dynamiki błędu w postaci liniowej, pomnożone przez znane tzw. macierze regresji. Wirtualne sterowanie wykorzystuje przybliżone wartości nieznananych parametrów, otrzymane z różniczkowych praw adaptacji. Kolejny podsystem jest sterowany w analogiczny sposób, by zapewnić odtwarzanie zadanych wartości wirtualnego sterowania dla poprzedniego podsystemu. Ostatecznie wyznacza się właściwe sterowanie obiektu. Do udowodnienia stabilności całego systemu stosowane są techniki lapunowskie. Innym sposobem przybliżenia idei adaptacyjnego algorytmu wstecznego całkowania może być porównanie go do algorytmu regulacji kaskadowej, w którym odpowiednikami wielkości zadanych wyznaczanych przez regulatory podrzędne będą sterowania wirtualne, a za eliminację błędów w stanie ustalonym – zamiast części całkującej regulatora – będą odpo-

Streszczenie: W artykule zaproponowano sterowanie wykorzystujące adaptacyjny algorytm wstecznego całkowania wraz z nieciągłym, rozmytym modelowaniem siły oporu ruchu. Omówiono sposób pozyskania danych uczących i strojenia modelu rozmytego oraz przeprowadzono badania eksperymentalne mające na celu pokazanie skuteczności zaproponowanego rozwiązania w zadaniu sterowania położeniem silnika liniowego, w tym podczas pracy ze skokową zmianą obciążenia lub zmianą tarcia.

Słowa kluczowe: sterowanie adaptacyjne, algorytm wstecznego całkowania, modelowanie rozmyte, silnik liniowy.

Abstract: This paper presents the application of fuzzy, discontinuous model of disturbance force in adaptive backstepping algorithm. The methodology of collecting learning data and tuning algorithm for fuzzy model was described.

Practical experiments show benefits of using proposed method for position control in linear motor drive with variable ballast and friction.

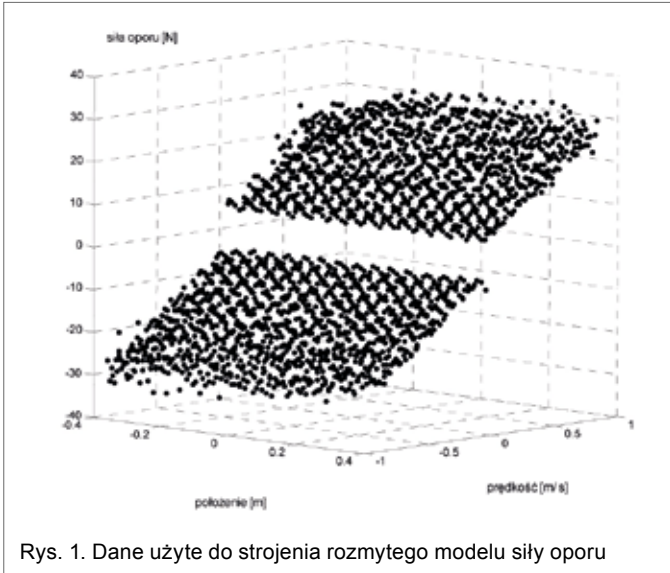
Keywords: adaptive backstepping, fuzzy modeling, linear motor.

wiadać prawa adaptacji estymat nieznananych parametrów. Kolejnym podobieństwem w obydwu algorytmach jest sposób działania w sytuacji wejścia sygnału sterującego na ograniczenia. W regulatorze typu PI stosowany jest mechanizm *anti-windup*, w algorytmie adaptacyjnym zatrzymywany jest proces adaptacji parametrów [7].

Nieciągły model rozmyty siły oporu ruchu

Opory ruchu będą modelowane jako funkcja położenia i prędkości silnika. Dane pomiarowe użyte do strojenia modelu, uzyskane przy wykorzystaniu obserwatora parametrycznego OPI [3], zostały pokazane na rys. 1. Ich równomierne rozmieszczenie wynika z faktu, że były zbierane podczas przejazdów silnika ze stałymi prędkościami.

Analiza zebranych danych wykazała nieciągłość dla prędkości równej zero, której źródłem jest istnienie tarcia statycznego, oraz okresową (równą podziałce biegunowej silnika, tzn. 51,2 mm) zmienność siły oporu powiązaną ze zmianą położenia



reklama

Rys. 1. Dane użyte do strojenia rozmytego modelu siły oporu

silnika. Określając strukturę modelu rozmytego, należy wziąć pod uwagę dwa kryteria. Pierwsze z nich to dokładność modelu, drugie to jego złożoność. Szukając kompromisu, zdecydowano się na strojenie $N = 9$ regułowego modelu rozmytego z rozszerzonymi funkcjami następników, tak aby mogły one reprezentować wspomnianą nieciągłość oraz pofalowanie. Funkcje następników reguł $i = 1, 2, 3, 7, 8, 9$ były określone wzorem

$$f_i(v, x) = p_{iv}v + p_{ix}x + q_i + s_i \sin\left(2\pi \frac{x - d_i}{0,0512}\right) \quad (1)$$

a dla reguł $i = 4, 5, 6$, tych o początkowej sile aktywacji skoncentrowanej w pobliżu prostej $v = 0$

$$f_i(v, x) = p_{iv}v + p_{ix}x + q_i + g_i \operatorname{sgn}(v) + s_i \sin\left(2\pi \frac{x - d_i}{0,0512}\right) \quad (2)$$

gdzie liczba 0,0521 określa długość podziałki biegunowej w metrach.

Wyjście modelu zostało obliczone jako średnia ważona

$$T = \frac{\sum_{i=1}^N o_i \cdot f_i \cdot w_i}{\sum_{i=1}^N o_i} \quad (3)$$

w której o_i jest siłą aktywacji i -tej reguły, równą iloczynowi wartości funkcji przynależności opisanych na wejściach v i x .

$$\mu_{ix}(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - c_{ix}}{a_{ix}}\right)^{2b_{ix}}} \quad (4)$$

$$\mu_{iv}(v) = \frac{1}{1 + \left(\frac{v - c_{iv}}{a_{iv}}\right)^{2b_{iv}}} \quad (5)$$

a w_i będzie parametrem korygującym poprawność wyznaczenia wartości funkcji następnika y_i . Początkowo wartość ta będzie równa 1, co będzie odpowiadało sytuacji, w której po zakończonym procesie uczenia zakładamy, że model jest dokładny. W czasie pracy algorytmu współczynniki te będą strojone za pomocą różniczkowych praw adaptacji, tak aby wyeliminować błąd śledzenia trajektorii zadanej, wynikający z niedokładności początkowego wyznaczenia parametrów modelu lub zmienności warunków pracy, jaką może być zwiększenie tarcia bądź zmiana obciążenia.

Podczas wyprowadzania sterowania wykorzystywana będzie postać

$$T = \sum_{i=1}^N y_i \cdot w_i \quad (6)$$

w której y_i można potraktować jako odpowiedź pojedynczej reguły, równej

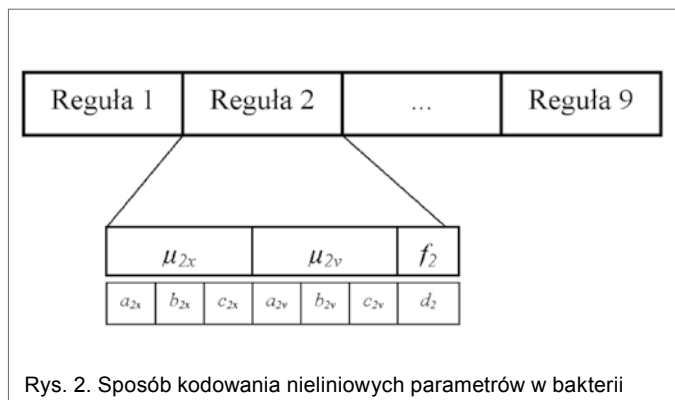
$$y_i = \frac{o_i \cdot f_i}{\sum_{i=1}^N o_i} \quad (7)$$

Do wstępnego strojenia modelu wykorzystano algorytm bakteryjny i metodę najmniejszych kwadratów.

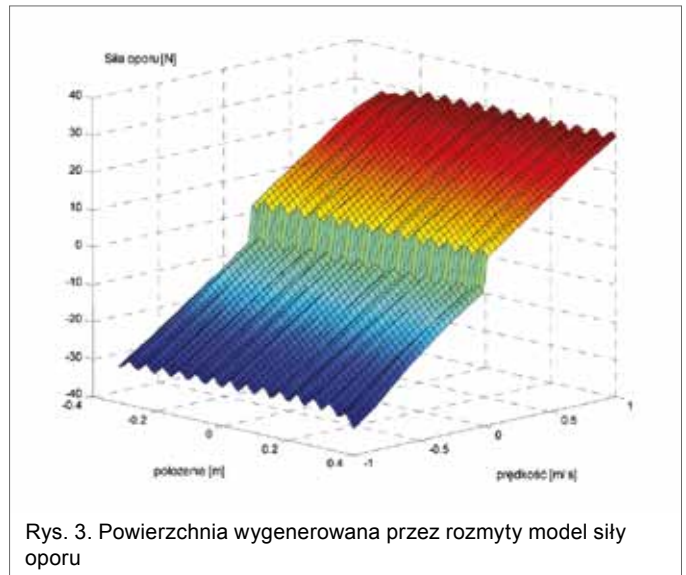
Strojenie modelu, algorytm bakteryjny

Algorytm bakteryjny jest jednym z ewolucyjnych algorytmów optymalizacji. Jego działanie jest inspirowane biologicznym mechanizmem genetycznego doskonalenia się bakterii. Z tego powodu zakodowany zbiór wszystkich zmiennych decyzyjnych optymalizowanych przez algorytm nazywa się powszechnie bakterią (rys. 2). Algorytmy te są znane już od ponad 15 lat [8]. Od tego czasu zostało opublikowanych kilkadziesiąt artykułów poświęconych tej tematyce. Większość prac dotyczy strojenia systemów rozmytych typu Mamdaniego. W niniejszej pracy zostanie on wykorzystany do strojenia modeli rozmytych typu TSK. Opracowany algorytm jest kombinacją algorytmu bakteryjnego, wykorzystywanego do strojenia parametrów nieliniowych, czyli parametrów funkcji przynależności a, b, c i parametrów d występujących w funkcjach następników reguł, oraz metody najmniejszych kwadratów do doboru parametrów $p_{ix}, p_{iv}, q_{iv}, g_{iv}, s_i$ funkcji następników. Dokładny opis użytego algorytmu bakteryjnego został zamieszczony w [4].

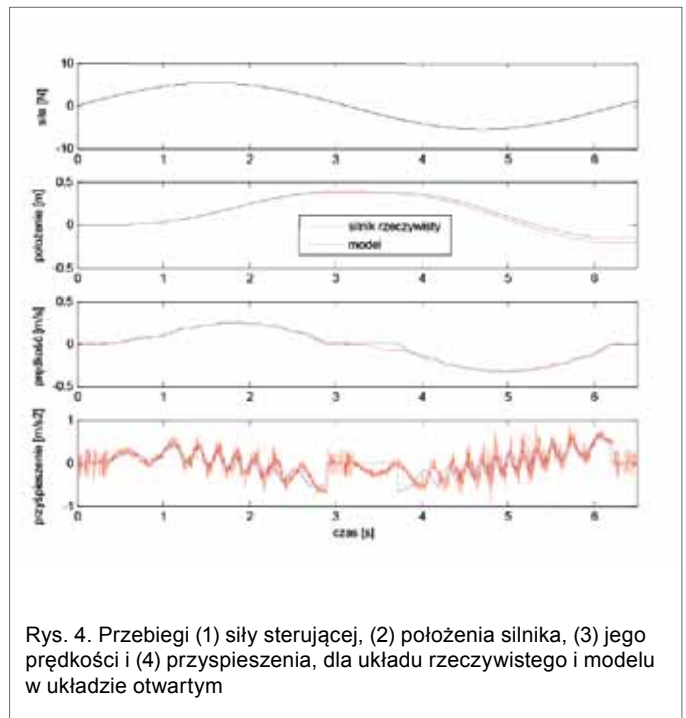
Powierzchnia wygenerowana za pomocą nastrojonego modelu została pokazana na rys. 3.



Rys. 2. Sposób kodowania nieliniowych parametrów w bakterii



Rys. 3. Powierzchnia wygenerowana przez rozmyty model siły oporu



Rys. 4. Przebiegi (1) siły sterującej, (2) położenia silnika, (3) jego prędkości i (4) przyspieszenia, dla układu rzeczywistego i modelu w układzie otwartym

Aby ocenić dokładność otrzymanego modelu, porównano na jednym wykresie przebiegi otrzymane w układzie rzeczywistym i przebiegi modelu silnika danego równaniami (8) i (9), przy współczynnikach korygujących $w_i = 1$. Wyniki zaprezentowane na rys. 4 potwierdzają dużą dokładność otrzymanego modelu siły oporowej.

Prawo sterowania silnikiem liniowym

Rozpatrywany silnik liniowy jest opisany równaniami:

$$\dot{x} = v \quad (8)$$

$$\dot{v} = \frac{F}{m} - \frac{T}{m} \quad (9)$$

gdzie x – położenie silnika; v – prędkość; m – masa silnika wraz z wózkiem, czujnikami i okablowaniem; F – siła generowana przez twornik (sterowanie); T – suma wszystkich oporów ruchu silnika.

Przy idealnie określonym modelu siły oporu współczynniki w_i modelu rozmytego (3, 6) byłyby równe jeden. W układzie rzeczywistym ich estymaty będą podlegać różniczkowym prawom adaptacji.

W pierwszym kroku określa się funkcje Lapunowa jako kwadrat błędu e_x między wartością zadaną położenia x_z a wartością aktualną x

$$V = \frac{1}{2} e_x^2 \quad (10)$$

Pochodna systemowa będzie równa

$$\dot{V} = e_x \dot{e}_x = e_x (\dot{x}_z - \dot{x}) = e_x (\dot{x}_z - v) \quad (11)$$

Wprowadza się wirtualne sterowanie v_z (prędkość zadana silnika) i uchyb prędkości

$$e_v = v_z - v \quad (12)$$

wtedy

$$\dot{V} = e_x (\dot{x}_z - v + v_z - v_z) = e_x e_v + e_x (\dot{x}_z - v_z) \quad (13)$$

Wybierając sterowanie

$$v_z = k_1 e_x + \dot{x}_z \quad (14)$$

otrzymuje się

$$\dot{V} = -k_1 e_x^2 + e_x e_v \quad (15)$$

W drugim kroku definiuje się funkcję Lapunowa jako

$$V = \frac{1}{2} e_x^2 + \frac{1}{2} e_v^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\gamma_i} \tilde{w}_i^2 \quad (16)$$

w którym γ_i jest parametrem odpowiadającym za szybkość adaptacji i -tej reguły, a

$$\tilde{w}_i = w_i - \hat{w}_i \quad (17)$$

jest błędem między wartością rzeczywistą współczynnika w_i a jego estymatą \hat{w}_i .

Pochodna systemowa będzie równa

$$\dot{V} = -k_1 e_x^2 + e_x e_v + e_v \dot{e}_v + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\gamma_i} \tilde{w}_i \dot{\tilde{w}}_i \quad (18)$$

Wstawiając równania (6), (9), (12) i (17) do (18), otrzymuje się

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -k_1 e_x^2 + e_v(e_x + \dot{v}_z - \dot{v}) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\gamma_i} \tilde{w}_i \dot{\tilde{w}}_i = \\ &= -k_1 e_x^2 + e_v(e_x + \dot{v}_z - \frac{F}{m} + \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot w_i}{m}) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\gamma_i} \tilde{w}_i \dot{\tilde{w}}_i = \\ &= -k_1 e_x^2 + e_v(e_x + \dot{v}_z - \frac{F}{m} + \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot \tilde{w}_i}{m}) + e_v \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot \tilde{w}_i}{m} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\gamma_i} \tilde{w}_i \dot{\tilde{w}}_i = \\ &= -k_1 e_x^2 + e_v(e_x + \dot{v}_z - \frac{F}{m} + \frac{\hat{T}}{m}) + e_v \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot \tilde{w}_i}{m} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\gamma_i} \tilde{w}_i \dot{\tilde{w}}_i \end{aligned} \quad (19)$$

w którym \hat{T} jest estymatą siły oporu, wyznaczoną przez adaptacyjny model rozmyty.

Jeżeli wybierze się sterowanie postaci

$$F = m(e_x + v_z + k_2 e_v) + \hat{T} \quad (20)$$

to pochodna systemowa przyjmie postać

$$\dot{V} = -k_1 e_x^2 - k_2 e_v^2 + e_v \frac{\sum_{i=1}^N y_i \cdot \tilde{w}_i}{m} + \sum_{i=1}^N \frac{1}{\gamma_i} \tilde{w}_i \dot{\tilde{w}}_i \quad (21)$$

Przy założeniu stałości parametrów w_i (lub przyjęciu, że zmieniają się wolno), z czego wynika $\dot{\tilde{w}}_i = -\dot{w}_i$, i określeniu prawa adaptacji estymaty $\dot{\tilde{w}}_i$ jako

$$\dot{\tilde{w}}_i = \frac{\gamma_i}{m} e_v \cdot y_i \quad (22)$$

otrzymuje się pochodną systemową

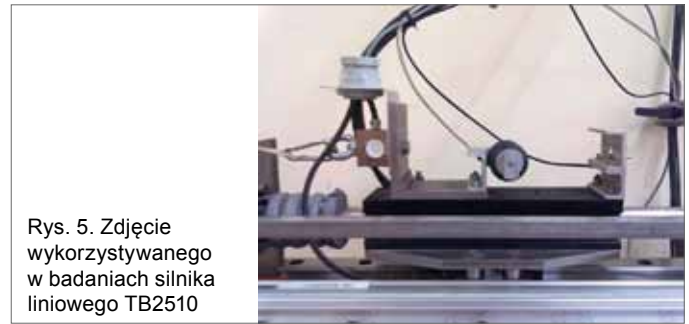
$$\dot{V} = -k_1 e_x^2 - k_2 e_v^2 \quad (23)$$

której postać zapewnia stabilność układu sterowania. Podsumowując, algorytm sterowania będzie określony wzorami (20), (14) i (22), w których k_1 i k_2 są dodatnimi wzmocnieniami, a γ_i jest parametrem określającym szybkość adaptacji estymaty. Parametry te wymagają strojenia.

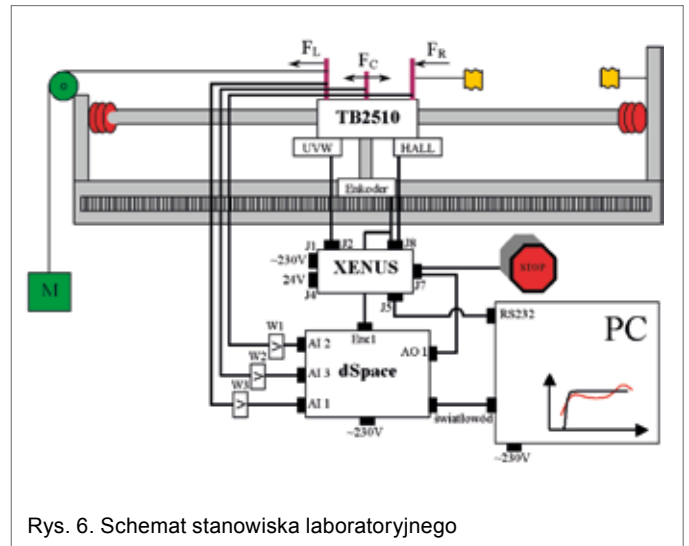
Stanowisko badawcze

Działanie adaptacyjnego algorytmu wstecznego całkowania z adaptacją reguł rozmytego modelu siły oporu zostało sprawdzone w rzeczywistym układzie sterowania położeniem silnika liniowego. W skład stanowiska wchodził:

- silnik liniowy TB2510 (rys. 5) o całkowitej masie 7,04 kg, długotrwałej sile 104 N, wyposażony w enkoder o rozdzielczości 1 μm i tensometryczne czujniki do pomiaru sił obciążenia i ugięcia;
- falownik ze wzmacniaczem XTL-230-18 i z wbudowanym regulatorem prądu, w którym realizacja obliczonej siły (20), proporcjonalnej do prądu, zachodzi z inercją $T = 4,9 \cdot 10^{-4}\text{s}$;



Rys. 5. Zdjęcie wykorzystywanego w badaniach silnika liniowego TB2510



Rys. 6. Schemat stanowiska laboratoryjnego

- modułowy zestaw kontrolno-pomiarowy oparty na karcie dSpace DS1106, z ustawionym czasem próbkowania równym 50 μs .

Schemat stanowiska laboratoryjnego został przedstawiony na rys. 6.

Wyniki badań eksperymentalnych

W pierwszej części prowadzonych badań sprawdzono wpływ adaptacji reguł na wartość błędu śledzenia wielkości zadanej określonej wzorem

$$x_z = 0.3 \sin(0.5t) \quad (24)$$

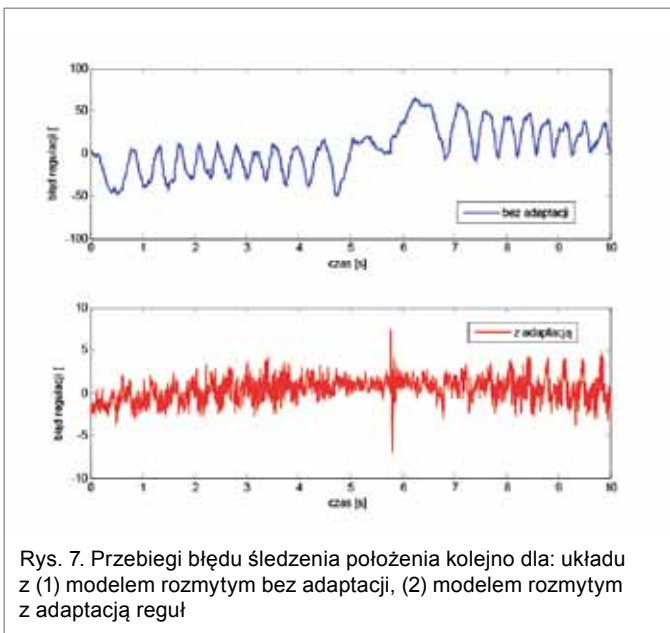
Wzmocnienia k_1 i k_2 wynosiły odpowiednio 80 i 120.

Dla przypadku braku adaptacji reguł ($\gamma_i = \gamma = 0$) błąd średniokwadratowy RMSE (*Root Mean Square Error*) określony wzorem (25)

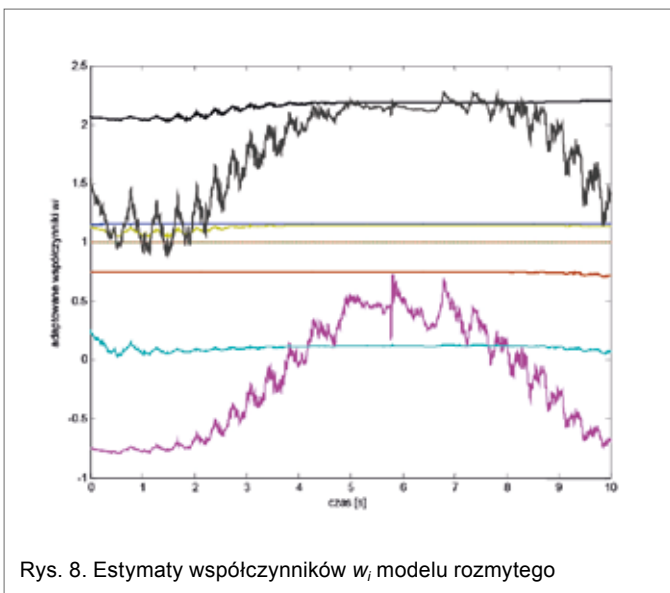
$$RMSE = \sqrt{\int_0^5 e(t)^2 dt} \quad (25)$$

wyniósł 38 μm . Po włączeniu mechanizmu adaptacji ($\gamma = 40000$) błąd ten spadł do wartości 1,4 μm . Uchyb regulacji dla obydwu przypadków pokazano na rys. 7. Maksymalna wartość błędu śledzenia trajektorii związana jest z nawrotem silnika. Na rys. 8 przedstawiono zmiany estymat współczynników w_i modelu rozmytego.

Druga seria eksperymentów dotyczyła pracy z obciążeniem zawieszonym na sprężystej linie. W chwili czasowej $t = 0$ ob-



Rys. 7. Przebiegi błędów śledzenia położenia kolejno dla: układu z (1) modelem rozmytym bez adaptacji, (2) modelem rozmytym z adaptacją reguł



Rys. 8. Estymaty współczynników w_i modelu rozmytego

reklama

ciążenie zostało zmienione skokowo. Sprawdzone zostało działanie czterech układów:

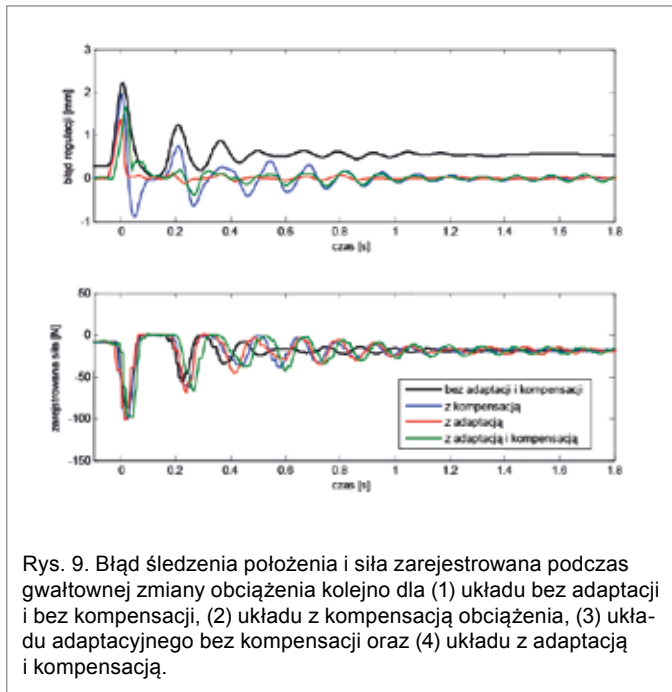
- układu bez adaptacji ($\gamma = 0$) i bez kompensacji siły obciążającej;
- układu bez adaptacji ($\gamma = 0$), z kompensacją siły obciążającej, mierzonej za pomocą mostka tensometrycznego;
- układu z adaptacją reguł ($\gamma = 40\,000$), bez kompensacji;
- układu z algorytmem adaptacyjnym ($\gamma = 40\,000$), z kompensacją siły obciążającej.

Przebiegi błędów regulacji położenia i zarejestrowanej siły dla wymienionych wariantów sterowania zostały pokazane na rys. 9.

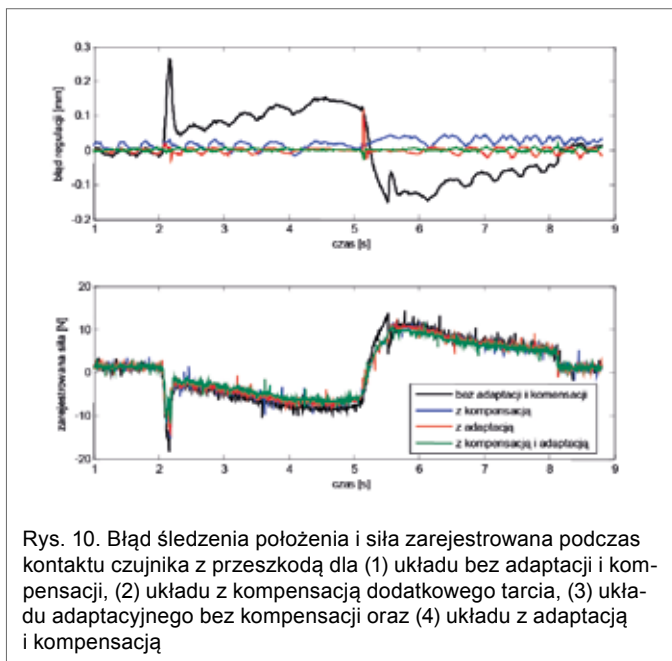
W przypadku realizacji najprostszego sterowania (wariant 1, kolor czarny) uchyb quasiustalony znajduje się znacznie powyżej zera. Dołożenie w sposób gwałtowny kolejnej masy wywołuje oscylacje, po zaniku których błąd ustala się na poziomie 0,6 mm. Po wprowadzeniu do sterowania zmierzonej wartości siły obciążającej (wariant 2, kolor niebieski) udaje się zniwelować uchyb ustalony. Modyfikacja ta zwiększa jednak oscylacje w stanie przejściowym. Błąd ustalony został także sprowadzony do zera przy wykorzystaniu sterowania adaptacyjnego (wariant 3, kolor czerwony) z rozmytym modelem siły oporu. Ponadto rozwiązanie to w znacznym stopniu pozwoliło na stłumienie niepożądanych oscylacji. Wprowadzenie do algorytmu adaptacyjnego kompensacji obciążenia w oparciu o pomiar przy pomocy czujnika siły (wariant 4, kolor zielony) pogorszyła przebiegi, wprowadzając niewielkie oscylacje.

Trzecia seria eksperymentów dotyczyła pracy silnika w warunkach zmieniającego się tarcia. Do czujnika siły ugięcia zostało zamontowane ramię, przesuwające się po przeszkodzie zamontowanej równoległe do bieżni. Sytuacja taka może odzwierciedlać kontakt narzędzia obrabiarki z materiałem obrabianym. Podobnie jak poprzednio sprawdzone zostało działanie czterech układów:

- układu bez adaptacji ($\gamma = 0$) i bez kompensacji siły tarcia;
- układu bez adaptacji ($\gamma = 0$), z kompensacją siły tarcia, mierzonej za pomocą czujnika;
- układu z adaptacją reguł ($\gamma = 40\,000$), bez kompensacji;
- układu z adaptacją reguł ($\gamma = 40\,000$) i z kompensacją siły tarcia.



Rys. 9. Błąd śledzenia położenia i siła zarejestrowana podczas gwałtownej zmiany obciążenia kolejno dla (1) układu bez adaptacji i bez kompensacji, (2) układu z kompensacją obciążenia, (3) układu adaptacyjnego bez kompensacji oraz (4) układu z adaptacją i kompensacją.



Rys. 10. Błąd śledzenia położenia i siła zarejestrowana podczas kontaktu czujnika z przeszkodą dla (1) układu bez adaptacji i kompensacji, (2) układu z kompensacją dodatkowego tarcia, (3) układu adaptacyjnego bez kompensacji oraz (4) układu z adaptacją i kompensacją

Przebiegi błędów regulacji położenia i zarejestrowanej siły dla wymienionych wariantów sterowania zostały pokazane na rys. 10.

Największy błąd zarejestrowany został dla przypadku sterowania najprostszego, tzn. bez adaptacji i bez kompensacji (wariant 1, kolor czarny). Zastosowanie kompensacji (wariant 2, kolor niebieski) w oparciu o pomiar dodatkowej siły tarcia spowodowało kilkukrotne zmniejszenie błędów śledzenia trajektorii. Jeszcze lepszym rozwiązaniem, biorąc pod uwagę błąd średni, okazało się zastosowanie algorytmu adaptacyjnego (wariant 3, kolor czerwony). W momencie nawrotu silnika błąd regulacji gwałtownie wzrasta. Eliminacja tego błędów została osiągnięta poprzez wprowadzenie sygnału kompensującego (wariant 4, kolor zielony).

Podsumowanie

W artykule zaproponowano wykorzystanie algorytmu wstecznego całkowania wraz z adaptacją reguł nieciągłego, rozmytego modelu siły oporu ruchu. Otrzymane wyniki badań eksperymentalnych, przeprowadzonych w pierwszej części, pokazały korzyści płynące z zastosowania zaproponowanego rozwiązania. W drugiej części badań eksperymentalnych pokazano skuteczność zaproponowanego algorytmu w tłumieniu oscylacji wynikających ze skokowej zmiany obciążenia. Wyniki eksperymentów prowadzonych z użyciem czujnika siły ugięcia, wykorzystanego do identyfikacji tarcia, pozwalają stwierdzić, że skuteczne może być jednocześnie wykorzystanie mechanizmu adaptacji i kompensacji w algorytmach sterowania napędami.

Literatura

- [1] YAOLONG T., JIE C., HUALIN T.: *Adaptive backstepping control and friction compensation for AC servo with inertia and load uncertainties*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50 (2003), p. 944–952.
- [2] HAN ME K., SEONG IK H., JONG SHIK K.: *Precision position control of servo systems using adaptive back-stepping and recurrent fuzzy neural networks*. „*Journal of Mechanical Science and Technology*”, vol. 23 (2009), p. 2873–2890.
- [3] KABZIŃSKI J.: *Experimental identification of disturbance forces effecting permanent magnet linear motors*. *International Conference on Power Electronics and Intelligent Control for Energy Conservation Proceedings (2005)* [Dokument elektroniczny].
- [4] JASTRZĘBSKI M.: *Rozmyta kompensacja sił oporu w układzie napędowym silnika liniowego z magnesami trwałymi*. *Konferencja Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE (2007)*, tom 1, s. 195–200.
- [5] KRSTIC M., KANELAKOPOULOS I., KOKOTOVIC P.: *Nonlinear and adaptive control design*. John Wiley and Sons (1995).
- [6] KABZIŃSKI J.: *Zastosowanie algorytmu wstecznego całkowania do regulacji prędkości silnika z zagłębionymi magnesami trwałymi*. „*Przegląd Elektrotechniczny*” 2/2010, s. 215–220.
- [7] KABZIŃSKI J.: *Adaptacyjne sterowanie manipulatorem z ograniczeniem momentu*. *X Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym SENE 2011 (2011)*, [Dokument elektroniczny].
- [8] HASHIYAMA T., FURUHASHI T., UCHIKAWA Y.: *A study on finding fuzzy rules for semi-active suspension controllers with genetic algorithm*. *IEEE International Conference on Evolutionary Computation (1995)*, p. 279–284.

dr inż. Marcin Jastrzębski – Instytut Automatyki, Politechnika Łódzka, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, e-mail: marcin.jastrzebski@p.lodz.pl

dr inż. Marcin Jastrzębski jest pracownikiem naukowo-dydaktycznym Instytutu Automatyki Politechniki Łódzkiej. W 2007 r. obronił pracę doktorską pt. „Algorytmy bakteryjne w zadaniach strojenia modeli rozmytych typu Takagi-Sugeno-Kanga stosowanych w układach sterowania”. Zainteresowania naukowe: teoria sterowania, modelowanie i symulacja komputerowa, inteligencja obliczeniowa, przetwarzanie sygnałów.