

*estymacja zmiennych stanu, systemy neuronowo-rozmyte,
napęd dwumasowy, tłumienie drgań*

Marcin KAMIŃSKI*, Than TRAN VAN*, Krzysztof SZABAT*

ROZMYTE ESTYMATORY MECHANICZNYCH ZMIENNYCH STANU UKŁADU NAPĘDOWEGO Z POŁĄCZENIEM SPRĘŻYSTYM

W niniejszej publikacji przedstawiono zagadnienia związane z projektowaniem estymatorów neuronowo-rozmytych mechanicznych zmiennych stanu układu napędowego z połączeniem sprężystym. W krótkim wprowadzeniu omówiono wady i zalety aktualnie stosowanych metod estymacji. Następnie przedstawiono model matematyczny obiektu badań. Kolejno omówiono zagadnienia związane z projektowaniem estymatorów neuronowo-rozmytych. Rozważania teoretyczne zostały potwierdzone przez badania symulacyjne. W testach symulacyjnych wykorzystano również próbki zarejestrowane na obiekcie rzeczywistym.

1. WPROWADZENIE

Logika rozmyta jest dynamicznie rozwijającą się dziedziną wiedzy znajdującą zastosowanie w różnych działach nauki, w tym w napędzie elektrycznym [1]–[5]. Układy bazujące na logice rozmytej stosuje się w zagadnieniach sterowania, estymacji i modelowania. Systemy rozmyte mogą być stosowane w dwojaki sposób. W pierwszym przypadku jako układy poprawiające jakość (odporność, niezawodność) działania klasycznych algorytmów sterowania czy estymacji. W takiej sytuacji prawa sterownia wyrażone są przez klasyczne równania a bloki rozmyte wspomagają działanie układów regulacji przez wprowadzenie do nich dodatkowej wiedzy wyrażonej za pomocą lingwistycznych reguł rozmytych. W kolejnym rozwiązaniu systemy rozmyte całkowicie zastępują klasyczne bloki sterowania i przejmują ich działanie [1]–[3]. Układy oparte na logice rozmytej pozwalają na aproksymację dowolnych nieliniowości, co oznacza, że możliwe jest idealne odwzorowanie charakterystyki modelowanego obiektu. Oznacza to, że układ rozmyty może być uniwersalnym aproksymatorem.

* Instytut Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: marcin.kaminski@pwr.wroc.pl, than.tran-van@pwr.wroc.pl, krzysztof.szabat@pwr.wroc.pl

Możliwość aproksymacji dowolnej charakterystyki decyduje o ciągle rosnącej popularności systemów rozmytych w różnego typu zastosowaniach.

W wielu przypadkach w procesie projektowania struktur sterowania napędów elektrycznych konieczne staje się uwzględnienie charakterystyki sprzęgła łączącego silnik napędowy z maszyną roboczą [6]–[14]. Jako typowe przykłady mogą służyć napędy walcarek, robotów, maszyn tekstylnych i papierniczych, elektrowni wiatrowych i innych. Skończona sztywność wału mechanicznego prowadzi do pogorszenia właściwości dynamicznych sterowanych obiektów, w skrajnych przypadkach może prowadzić do utraty stabilności całej struktury sterowania. W celu efektywnego tłumienia drgań skrętnych stosuje się różne metody, najbardziej efektywne bazują na zaawansowanych strukturach sterowania wykorzystujących dodatkowe sprzężenia zwrotne od wszystkich zmiennych stanu obiektu. Może to być struktura sterowania z regulatorem PI i dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi, z regulatorem stanu, z regulatorem ślizgowym czy predykcyjnym. W celu implementacji jednej z zaawansowanych struktur sterowania wymagana jest informacja o niemierzalnym wektorze stanu układu dwumasowego [9]–[12].

Zagadnienie estymacji zmiennych stanu w układach napędowych cieszy się stałym zainteresowaniem ośrodków naukowych i przemysłowych [15]–[19]. W przypadku układu napędowego z połączeniem sprężystym stosuje się następujące metody odtwarzania zmiennych stanu. Klasycznym układem rekonstrukcji wektora stanu jest obserwator Luenbergera [9]. Układ ten charakteryzuje się prostotą doboru parametrów systemu i łatwością w jego implementacji praktycznej. Nie jest on jednak w wystarczającym stopniu odporny na zakłócenia pomiarowe i parametryczne obiektu. Filtr Kalmana uważa się za układ estymujący w sposób bardzo dokładny niedostępny wektor stanu. Jednakże algorytm filtru Kalmana wymaga określonego charakteru szumów co nie zawsze jest spełnione w układach rzeczywistych [9]. W ostatnich latach można zauważyć wzrost zainteresowania metodami estymacji bazującymi na sztucznej inteligencji [17]–[19]. Najpopularniejszym podejściem jest zastosowanie różnych struktur sieci neuronowych. Estymatory te nie wymagają znajomości modelu matematycznego obiektu jedynie odpowiednich wektorów danych z próbkami uczącymi. Mogą być stosowane zarówno w przypadku obiektów liniowych, jak i nieliniowych. W literaturze występują jedynie pojedyncze prace ukazujące zastosowanie systemów rozmytych w zagadnieniach estymacji zmiennych stanu układu napędowego z połączeniem sprężystym.

Artykuł został podzielony na trzy sekcje. Po wprowadzeniu przedstawiono model matematyczny rozpatrywanego napędu. Kolejno omówiono zagadnienia związane z projektowaniem estymatorów opartych na rozmytych sieciach neuronowych. Następnie zaprezentowano wybrane wyniki badań symulacyjnych ukazujących właściwości dynamiczne i statyczne opracowanych estymatorów. W celu potwierdzenia poprawności rozważań estymatory zostały również przetestowane dla próbek pomiarowych zarejestrowanych na stanowisku rzeczywistym.

2. MODEL NAPĘDU I STRUKTURA STEROWANIA

Do badań przyjęto model układu dwumasowego z bezinercyjnym połączeniem sprężystym opisanego następującymi równaniami (1)–(3) [9].

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

gdzie:

ω_1, ω_2 – prędkości silnika i maszyny roboczej,

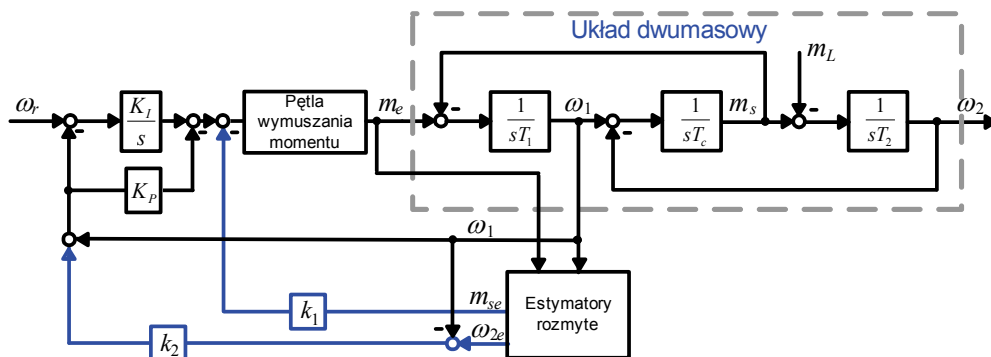
m_e, m_s, m_L – momenty: elektromagnetyczny, skrotny i obciążenia,

T_1, T_2 – mechaniczna stała czasowa silnika i obciążenia,

T_c – stała czasowa elementu sprężystego.

Ze względu na niewielką wartość współczynnika tłumienia wewnętrznego w typowych układach napędowych, został on pominięty w równaniach opisujących obiekt (1)–(3). W badaniach symulacyjnych nie uwzględniono również charakterystyki momentu tarcia i nieliniowości wału mechanicznego. W badaniach rzeczywistych przyjęto, że występujące nieliniowości napędu mają charakter zakłóceń parametrycznych. Opóźnienie układu generacji momentu elektromagnetycznego wynosiło 2 ms. Badany układ posiadał następujące wartości stałych czasowych: $T_1 = T_2 = 203$ ms $T_c = 2,6$ ms.

Do badań wykorzystano strukturę sterowania z regulatorem PI i z dwoma dodatkowymi sprzężeniami zwrotnymi od momentu skrotnego (k_1) i różnicy prędkości (k_2) [9]. Schemat rozważanego układu regulacji przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Struktura sterowania
Fig. 1. Scheme of the control structure

Wartości parametrów układu regulacji dobierane są za pomocą przedstawionych niżej wyrażen analitycznych [9]:

$$\begin{aligned}
 K_p &= 4\xi_r\omega_0^3T_1T_2T_c \\
 K_I &= \omega_0^4T_1T_2T_c \\
 k_2 &= \frac{1}{(\omega_0^2T_2T_c)} - 1 \\
 k_1 &= \frac{T_1(4\xi_r^2 - k_2)}{T_2(1 + k_2)} - 1
 \end{aligned}
 \tag{4-7}$$

Właściwości dynamiczne rozważanego układu zależą od przyjętej pulsacji rezonansowej i współczynnika tłumienia. W zakresie pracy liniowej, przy uwzględnieniu ograniczeń związanych z zasilaniem oraz właściwościami mechanicznymi układu, możliwe jest osiągnięcie dowolnej wartości czasu ustalania i przeregulowania prędkości maszyny roboczej.

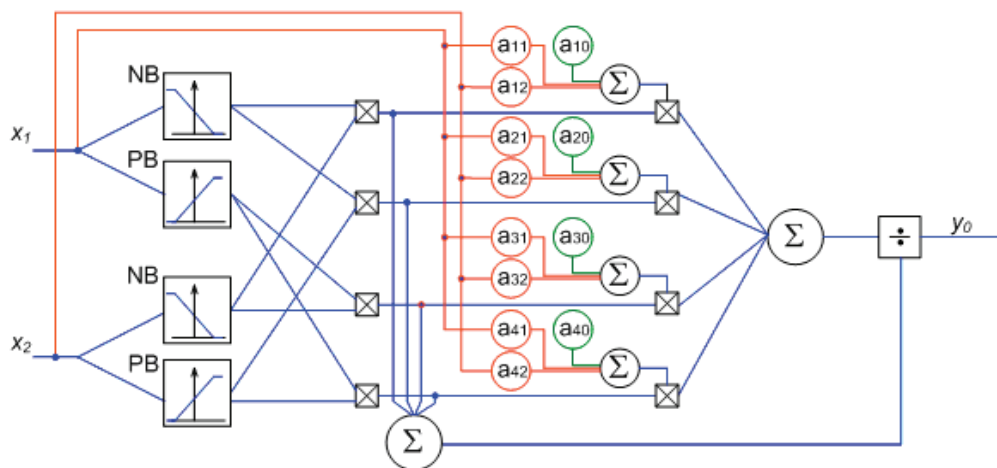
W niniejszej pracy struktura z rys. 1 (przy założeniu dostępności pomiarowej wektora stanu) posłużyła do wygenerowania wektorów uczących i testujących, które zostały wykorzystane w procesie projektowania estymatorów rozmytych. W kolejnych badaniach przetestowano przedstawioną strukturę sterownia, w której informacja o momencie skrętnym i prędkości obciążenia pochodziła z estymatorów rozmytych.

3. ESTYMATORY ROZMYTE

W literaturze naukowej prezentowane są różne typy modeli rozmytych. Do najpopularniejszych należą: klasyczny system Mamdaniego oraz system Takagi–Sugeno–Kang (w skrócie TSK) [1]–[3]. Mniej popularne są systemy Tsukamoto czy systemy z parametrycznymi konkluzjami. Kolejne modyfikacje modeli rozmytych uzyskuje się wprowadzając nieliniowe funkcje w konkluzjach (uzyskując w ten sposób np. falkowe systemy neuronowo-rozmyte), funkcje oparte na zbiorach typu drugiego czy też różnego rodzaju sprzężenia zwrotne (lokalne, hierarchiczne; liniowe, nieliniowe). Wprowadzenie bardziej zaawansowanych modeli rozmytych i wymienionych wyżej modyfikacji zwiększa dokładność modelowania. Utrudnia jednak w znacznym stopniu dobór parametrów tych modeli. Skomplikowana struktura modelu stwarza również problemy podczas implementacji praktycznej ze względu na wymóg większej mocy obliczeniowej procesora. Wybór modelu rozmytego do konkretnych zastosowań jest więc kompromisem pomiędzy dokładnością otrzymanego rozwiązania a złożonością obliczeniową modelu [1], [3].

W niniejszej pracy jako model estymatora wybrano system rozmyty typu TSK. W odróżnieniu od najpopularniejszego modelu Mamdaniego, w system TSK posiada

konkluzje złożone. Oprócz wartości stałej (singletonu) występują w nim człony opisujące wpływ wektora wejściowego na wartość konkluzji co zwiększa znacząco zdolności aproksymujące systemu TSK. Na rysunku 2 przedstawiono przykładowy system TSK o dwóch wejściach, jednym wyjściu opisany za pomocą czterech reguł [1]–[4].

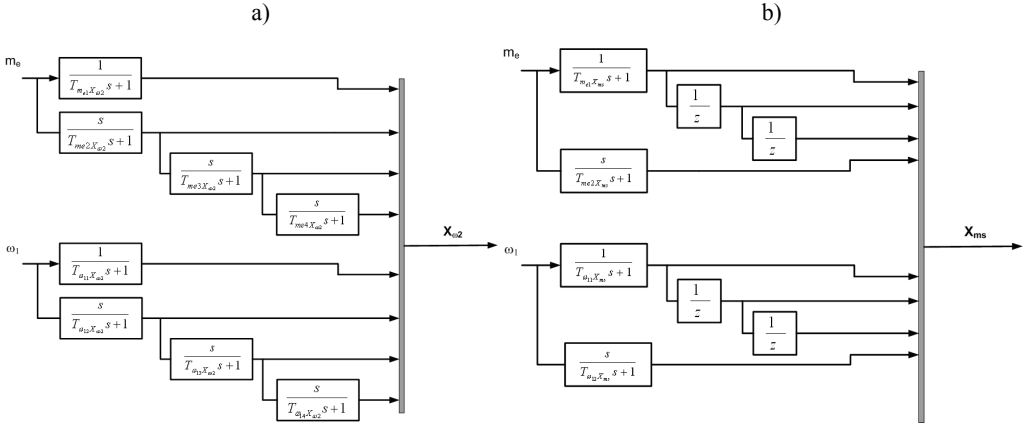


Rys. 2. Przykładowy system rozmyty typu TSK
Fig. 2. Exemplary TSK-fuzzy system

W badaniach przedstawionych w niniejszej pracy przyjęto jednakowy typ struktury modelu neuronowo-rozmytego dla estymatorów obu analizowanych zmiennych stanu. Zastosowano po dwie trójkątne funkcje przynależności dla każdego z wejść estymatora. Przykładowa baza reguł estymatora neuronowo-rozmytego zawierała 256 elementów. Powstała ona w wyniku połączenia przyjętych funkcji przynależności z poszczególnymi wejściami we wszystkich możliwych kombinacjach. W opisywanej aplikacji nie zastosowano algorytmu optymalizacyjnego w celu redukcji znaczącej liczby elementów bazy reguł. Wartości współczynników warstw wyjściowych zostały wyznaczone za pomocą algorytmu hybrydowego łączącego metodę najmniejszych kwadratów oraz gradientową [5]. Modele bloków kształtowania sygnałów wejściowych badanych estymatorów przedstawiono na rysunku 3. W prezentowanych estymatorach struktura elementów kształtujących wektory wejściowe została wyznaczona eksperymentalnie. Zastosowanie członów inercyjnych pierwszego rzędu, pochodnych oraz próbek historycznych umożliwia zwiększenie dokładności estymacji w stanach dynamicznych układu. Wektory wejściowe formowane w tych elementach są wprowadzane do systemu neuronowo-rozmytego.

W przedstawionych na rysunku 3 blokach kształtowania sygnałów wejściowych zastosowano następujące wartości stałych czasowych. Dla estymatora prędkości obciążenia – $T_{me1X\omega 2} = 5$ ms, $T_{me2X\omega 2} = 1$ ms, $T_{me3X\omega 2} = 5$ ms, $T_{me4X\omega 2} = 10$ ms, $T_{\omega 11X\omega 2} = 5$ ms, $T_{\omega 12X\omega 2} = 1$ ms, $T_{\omega 13X\omega 2} = 5$ ms, $T_{\omega 14X\omega 2} = 10$ ms. W przypadku estymatora mo-

mentu skrętnego wartości stałych czasowych wynosiły odpowiednio $T_{me1Xms} = 5$ ms, $T_{me2Xms} = 0,1$ ms, $T_{\omega1Xms} = 1$ ms, $T_{\omega2Xms} = 0,1$ ms. Stałe czasowe filtrów wejściowych zostały dobrane eksperymentalnie.



Rys. 3. Bloki kształtowania sygnałów wejściowych estymatorów neuronowo-rozmytych: prędkości obciążenia (a) oraz momentu skrętnego (b)

Fig. 3. Schemes of the input signal preconditioning for the neuro-fuzzy estimators of the torsional torque (a) and load machine speed (b)

Badania zrealizowano przy wykorzystaniu programu Matlab. W symulacjach przyjęto krok obliczeń równy 0,1 ms. W celu oceny uzyskiwanych rezultatów odtwarzania prędkości obciążenia oraz momentu skrętnego układu dwumasowego za pomocą modeli neuronowo-rozmytych wyznaczono błąd estymacji zgodnie z następującą zależnością:

$$Err = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i|}{n} \cdot 100\% \quad (8)$$

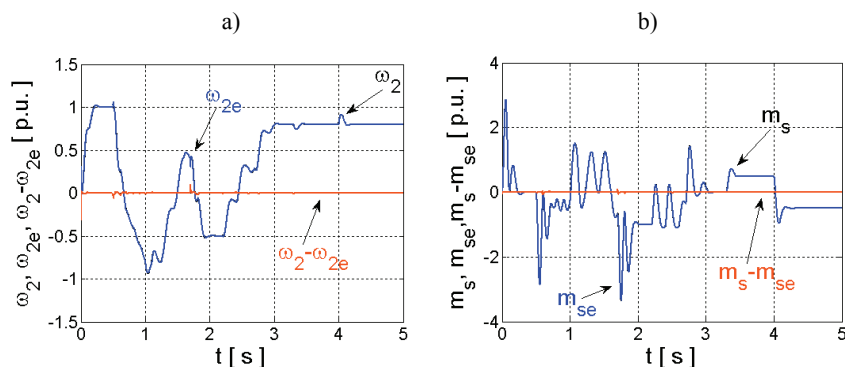
gdzie:

- x_i – wartość rzeczywista,
- \hat{x}_i – wartość estymowana,
- n – liczba próbek.

Wstępne badania przeprowadzono dla estymatorów pracujących w otwartej pętli sterowania, realizujących obliczenia na podstawie danych z działającego niezależnie układu napędowego. Uzyskane wyniki zamieszczono na rysunku 4.

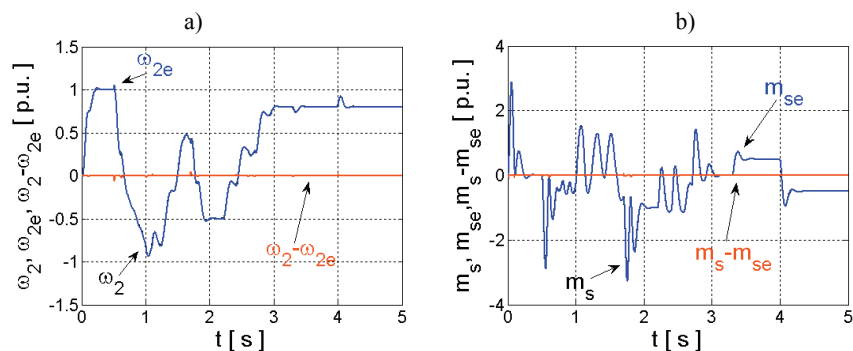
Jak wynika z analizy przebiegów przedstawionych na rys. 4 rzeczywiste i estymowane zmienne stanu pokrywają się bez widocznych błędów. W przebiegu błędu estymacji obu zmiennych można zauważyć nieznaczne odstępstwa od wartości zerowej. Wyliczony błąd odtwarzania prędkości obciążenia wynosi $E_{rr\omega_2} = 0,20\%$, natomiast

momentu skrętnego $E_{rms} = 0,22\%$. Zgodnie z przyjętą definicją (8) jest to średni błąd estymacji na próbkę.



Rys. 4. Przebiegi rzeczywiste, estymowane oraz chwilowe różnice dla: prędkości obciążenia (a) oraz momentu skrętnego (b) dla estymatorów testowanych w otwartej pętli sterowania
 Fig. 4. Transients of the real and estimated variables and their differences for the load speed (a) and the torsional torque (b) for estimators tested in open control loop

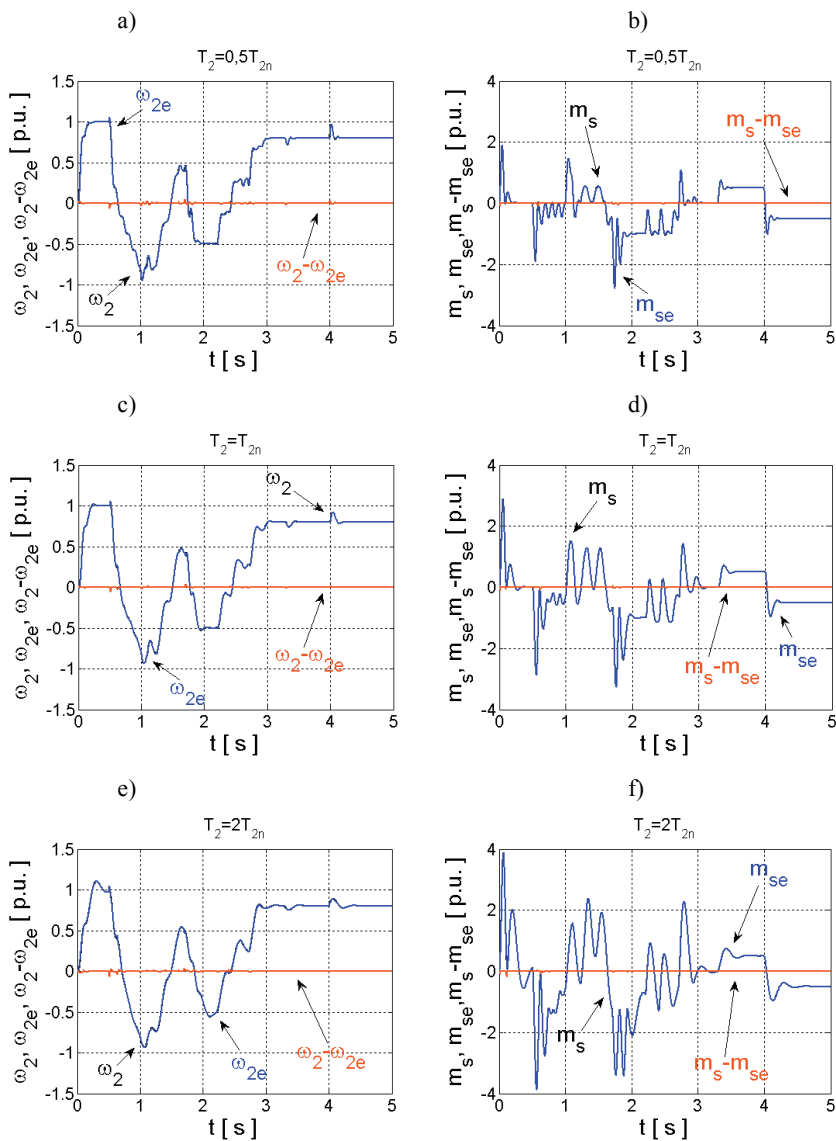
Kolejno przetestowano strukturę sterowania w której estymatory pracowały w układzie zamkniętym tj. informacja o momencie skrętnym i prędkości obciążenia pochodziły z estymatorów rozmytych (rys. 1). Przebiegi estymowanych zmiennych stanu układu napędowego zaprezentowano na rys. 5.



Rys. 5. Przebiegi rzeczywiste, estymowane oraz chwilowe różnice dla: prędkości obciążenia (a) oraz momentu skrętnego (b) dla estymatorów testowanych w zamkniętej pętli sterowania
 Fig. 5. Transients of the real and estimated variables and their differences for the load speed (a) and the torsional torque (b) for estimators tested in closed control loop

Jak wynika z porównania rys. 4 i rys. 5, przebiegi zmiennych stanu na nich przedstawionych są identyczne. Włączenie estymatorów neuronowych do struktury sterowania nie

pogorszyło działania zamkniętego układu regulacji. Błąd odtwarzania prędkości obciążenia wynosi $E_{rr\omega 2} = 0,13\%$, natomiast dla momentu skrętnego wynosi $E_{rrm_s} = 0,25\%$.



Rys. 6. Przebiegi rzeczywiste i estymowane oraz chwilowe różnice dla: prędkości obciążenia (a, c, e); momentu skrętnego (b, d, f) dla estymatorów pracujących w układzie zamkniętym przy różnych wartościach mechanicznej stałej czasowej T_2

Fig. 6. Transients of the real and estimated variables and their differences for the load speed (a, c, e); the torsional torque (b, d, f) for estimators tested in the closed loop control structure for different time constant T_2

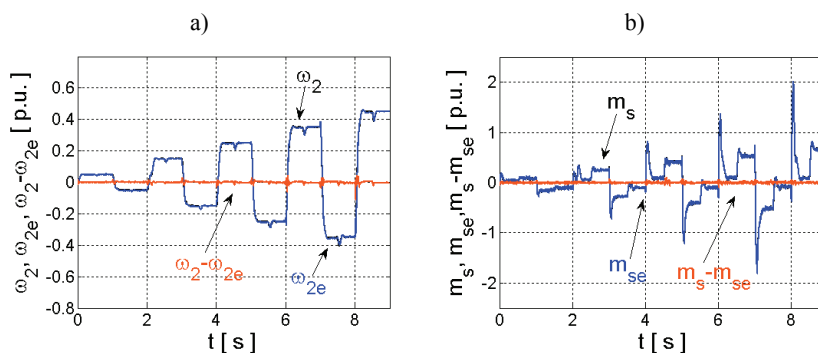
W następnym etapie testów sprawdzono odporność estymatorów neuronowo-rozmytych na zmiany mechanicznej stałej czasowej T_2 . W czasie badań nie zmieniano nastaw układu regulacji, analizowano jedynie dokładność estymacji prędkości obciążenia i momentu skrętnego za pomocą estymatorów rozmytych. Należy podkreślić, że wszystkie przeprowadzone testy zostały zrealizowane dla zadanych trajektorii prędkości oraz momentu obciążenia różniących się od danych treningowych. Również zmiany parametru T_2 nie były uwzględniane w procesie treningu. Przebiegi analizowanych zmiennych stanu układu napędowego przedstawiono na rys. 6.

Jak wynika z zaprezentowanych na rys. 6 przebiegów zmiana mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej nie powoduje pogorszenia jakości estymowanych zmiennych stanu. We wszystkich przypadkach błędy estymacji są niezauważalne – przebiegi rzeczywiste pokrywają się z estymowanymi. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zmiany stałej czasowej T_2 nie wpływają na dokładność odtwarzania prędkości obciążenia oraz momentu skrętnego. W tabeli 1 zamieszczono zestawienie błędów estymacji dla poszczególnych przypadków.

Tabela 1. Zestawienie błędów estymacji dla różnych wartości stałej czasowej T_2
Table 1. Summary of estimation errors for different time constant T_2

	$E_{rr\omega_2}$ [%]	E_{rrm_s} [%]
$T_2 = 0,5 T_{2n}$	0,28	0,23
$T_2 = T_{2n}$	0,13	0,25
$T_2 = 2 T_{2n}$	0,27	0,29

Zgodnie z danymi zamieszczonymi w tabeli 1, zmiana T_2 w obiekcie powoduje około dwukrotne zwiększenie błędów estymacji prędkości obciążenia. Natomiast błędy estymacji momentu skrętnego są na zbliżonym poziomie dla wszystkich analizowanych przypadków.



Rys. 7. Przebiegi rzeczywiste, estymowane oraz chwilowe różnice dla: prędkości obciążenia (a) oraz momentu skrętnego (b) realizowane dla przebiegów rzeczywistych

Fig. 7. Transients of the real and estimated variables and their differences for the load speed (a) and the torsional torque (b) obtained for real signals

Następnie przetestowano opracowane estymatory dla danych zarejestrowanych na stanowisku rzeczywistym. Sygnał prędkości obciążenia rejestrowany był za pomocą przetwornika obrotowo-impulsowego. Wobec braku przetwornika momentu skrętnego informacja o tej zmiennej pochodziła z filtra Kalmana. Przebiegi rzeczywistych i estymowanych zmiennych stanu oraz błędu estymacji przedstawiono na rys. 7.

Jak wynika z analizy przebiegów zamieszczonych na rys. 7 zaprojektowane estymatory rozmyte działają poprawnie. Wartości estymowane pokrywają się z wartościami rzeczywistymi. Błąd estymacji prędkości obciążenia wynosi $E_{rr\omega} = 0,40\%$, natomiast momentu skrętnego $E_{rrms} = 1,12\%$. Większa wartość błędu estymacji (niż w badaniach symulacyjnych) jest spowodowana zakłóceniami sygnałów wejściowych związanych z przetwornikami pomiarowymi, nieuwzględnionymi w procesie projektowania nieliniowościami obiektu itp.

4. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono wstępne badania związane z projektowaniem estymatorów neuronowo-rozmytych. Na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych i testów można wyciągnąć następujące wnioski:

- Możliwe jest zaprojektowanie estymatorów rozmyto-neuronowych odtwarzających zmienną stanu układu dwumasowego (moment skrętny, prędkość obciążenia) z niewielkim błędem.

- Włączenie zaprojektowanych estymatorów do struktury zamkniętej nie pogarsza właściwości dynamicznych układu regulacji.

- Opracowane estymatory są odporne na zmiany mechanicznej stałej czasowej maszyny roboczej.

- Zaprojektowane estymatory pracowały poprawnie również dla danych zarejestrowanych na stanowisku rzeczywistym.

W kolejnych pracach planuje się implementację struktury sterowania współpracującej z estymatorami rozmytymi na stanowisku laboratoryjnym. Należy zaznaczyć dużą złożoność struktury zastosowanych modeli estymatorów. Topologia układów neuronowo-rozmytych może mieć znaczenie dla uzyskiwanych rezultatów estymacji, jednocześnie jest bardzo istotna dla nakładów obliczeniowych koniecznych w praktycznej implementacji testowanych estymatorów. W związku z czym wskazana jest również optymalizacja struktury, mająca na celu redukcję złożoności zaprojektowanych estymatorów. Również dalsze zwiększenie odporności układów będzie jednym z głównych zadań.

LITERATURA

- [1] DRIANKOV D., HELLENDORRN H., REINFRANK M., *An Introduction to Fuzzy Control*, Springer, 1996.
- [2] PEDRYCZ W., *Fuzzy control and fuzzy systems*, Research Studies Press, Ltd., 1993.

- [3] PIEGAT A., *Fuzzy Modeling and Control*, Springer, 2001.
- [4] TAKAGI T., SUGENO M., *Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control*, IEEE Transactions on System Man and Cybernetics, 1985, pp. 116–132.
- [5] JANG J.-S.R., SUN C.-T., MIZUTANI E., *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice Hall, 1997.
- [6] HACE A., JEZERNIK K., SABANOVIC A., *Improved Design of VSS Controller for a Linear Belt-Driven Servomechanism*, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2005, Vol. 10, No. 4, pp. 385–390.
- [7] VAŠAK M., BAOTIĆ M., PETROVIĆ I., PERIĆ N., *Hybrid Theory-Based Time-Optimal Control of an Electronic Throttle*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2007, Vol. 43, No. 3, pp. 1483–1494.
- [8] MUSZYNSKI R., DESKUR J., *Damping of Torsional Vibrations in High-Dynamic Industrial Drives*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, No. 2, pp. 544–552.
- [9] SZABAT K., *Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej nr 61, Wrocław 2008.
- [10] VALENZUELA M.A., BENTLEY J.M., LORENZ R.D., *Evaluation of Torsional Oscillations in Paper Machine Sections*, IEEE Trans. on Industry Applications, 2005, Vol. 41, No. 2, pp. 493–501.
- [11] HORI Y., SAWADA H., CHUN Y., *Slow resonance ratio control for vibration suppression and disturbance rejection in torsional system*, IEEE Trans. on Ind. Electronics, 1999, Vol. 46, No. 1, pp. 162–168.
- [12] SERKIES P.J., SZABAT K., *Przybliżone sterowanie pozycją w napędzie elektrycznym z połączeniem sprężystym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2011, Vol. 87, No. 2, pp. 276–279.
- [13] GUZINSKI J., ABU-RUB H., DIGUET M., KRZEMINSKI Z., LEWICKI A., *Speed and Load Torque Observer Application in High-Speed Train Electric Drive*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, No. 2, pp. 565–574.
- [14] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., KAMINSKI M., SZABAT K., *Implementation of the Sliding Mode Controller with an Integral Function and Fuzzy Gain Value for Electrical Drive with Elastic Joint*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, Vol. 57, No. 4, pp. 1309–1317.
- [15] YOSHIOKA Y., HANAMOTO T., *Estimation of a Multimass System Using the LWTLs and a Co-efficient Diagram for Vibration-Controller Design*, IEEE Trans. on Industrial Applications, 2008, Vol. 44, No. 2, pp. 566–574.
- [16] SZABAT K., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Performance Improvement of Industrial Drives with Mechanical Elasticity Using Nonlinear Adaptive Kalman Filter*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2008, Vol. 55, No. 3, pp. 1075–1084.
- [17] ERENTURK K., *Gray-fuzzy control of a nonlinear two-mass system*, Journal of the Franklin Institute, 2010, Vol. 347, No. 7, pp. 1171–1185.
- [18] KAMIŃSKI M., *Implementacja neuronowego estymatora prędkości napędu dwumasowego w układzie FPGA*, Przegląd Elektrotechniczny, 2010, Vol. 86, No. 2, pp. 225–230.
- [19] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., KAMINSKI M., *Application of the OBD method for optimization of neural state variable estimators of the two-mass drive system*, Neurocomputing, Elsevier Science, 2009, Vol. 72, No. 13–15, pp. 3034–3045.

MECHANICAL STATE VARIABLES FUZZY ESTIMATORS FOR THE TWO-MASS SYSTEM

In the paper the issues related to the design of fuzzy estimators for the state variable estimation of the two-mass system are presented. In the introduction the estimation method are presented and their properties described. Next the two-mass system model and the considered control structure are presented. The design aspects of the fuzzy estimators are discussed. The theoretical consideration are confirmed by the simulation tests. In the study the samples obtained in the laboratory set-up are also used.