

*sieci neuronowe, modele perceptronowe oraz radialne,
regulacja prędkości, układ dwumasowy*

Marcin KAMIŃSKI, Teresa ORŁOWSKA-KOWALSKA*

ANALIZA PORÓWNAWCZA WYBRANYCH NEUROREGULATORÓW DLA NAPĘDU Z POŁĄCZENIEM SPRĘŻYSTYM – WYNIKI BADAŃ

W artykule przedstawiono wyniki porównawczych badań struktur regulatorów neuronowych typu MLP i RBF, zastosowanych w napędzie elektrycznym z połączeniem elastycznym. Zbadano wpływ współczynników uczenia obu struktur sieci neuronowych na pracę układu z jednym sprzężeniem zwrotnym od prędkości silnika napędowego i na możliwości tłumienia drgań skrętnych, również w przypadku zmian parametrów napędu.

1. WPROWADZENIE

Regulatory neuronowe stosowane w układach napędowych trenowane *on-line* stanowią alternatywę dla regulatorów klasycznych PI/PID [1]. Ma to szczególne znaczenie w przypadku sterowania napędami elektrycznymi, w których połączenie mechaniczne pomiędzy silnikiem napędowym a maszyną roboczą charakteryzuje się występowaniem drgań skrętnych, ze względu na charakter połączenia za pomocą sprężystego wału [2]. Zastosowanie nieliniowych regulatorów adaptacyjnych, trenowanych *on-line* daje nowe możliwości [3]–[7], ponieważ adaptacja wag sieci neuronowej następuje w chwili uruchomienia układu sterowania, w trakcie pierwszych kilku cykli pracy napędu. Sposób aktualizacji współczynników determinuje możliwości aplikacyjne oraz proces projektowania układu opartego o sieć neuronową [8]. Ponadto, zastosowanie adaptacyjnych neuroregulatorów dla napędu z połączeniem sprężystym umożliwia eliminację estymatorów zmiennych stanu [9] i realizację struktur sterowania w oparciu o pomiar jedynie prędkości i prądu (momentu) silnika napędowego. Koncepcja takiego sterowania napędem z połączeniem sprężystym została przedsta-

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

wiona w pierwszej części niniejszego artykułu [8], natomiast w części drugiej zostaną przedstawione wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych napędu z dwoma rodzajami neuroregulatorów – bazujących odpowiednio na sieci typu MLP oraz sieci typu RBF. Wszystkie wyniki przedstawione w niniejszej pracy zostały wykonane dla modelu zrealizowanego w jednostkach względnych, dla napędu o parametrach przedstawionych w punkcie 3.

2. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH NAPĘDU Z POŁĄCZENIEM ELASTYCZNYM I NEUROREGULATORAMI PRĘDKOŚCI SILNIKA

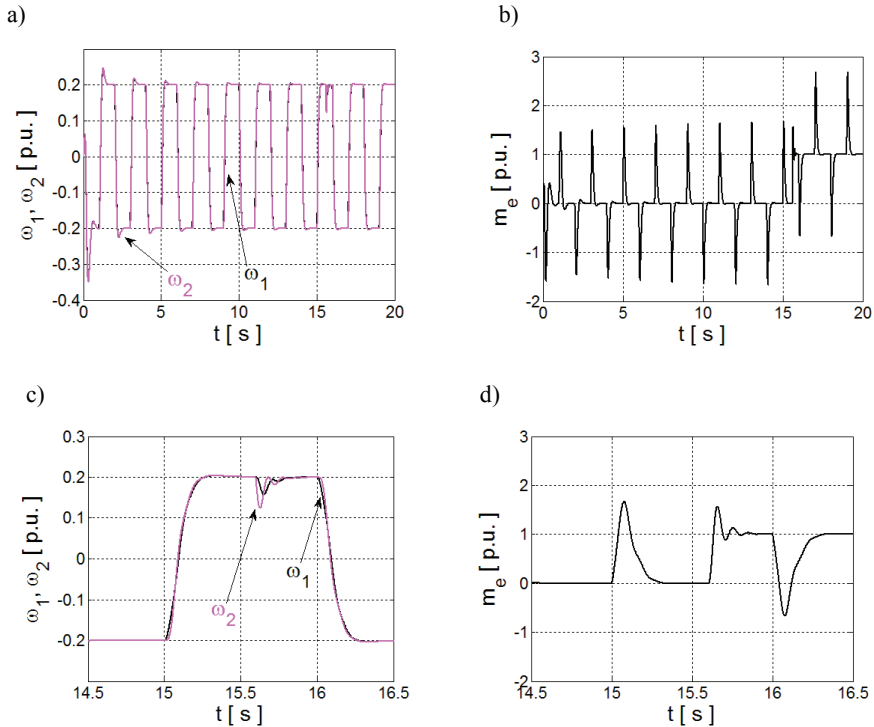
2.1. BADANIA SYMULACYJNE NAPĘDU Z NEUROREGULATOREM MLP

W strukturze sterowania prędkością z podporządkowaną zoptymalizowaną pętlą regulacji momentu silnika prądu stałego połączonego sprężystym wałem z maszyną roboczą zastosowano w pierw regulator oparty na sieci perceptronowej MLP, opisany w [8]. Regulator ten posiadał strukturę $\{2-5-1\}$, tzn. zawierał dwa wejścia (błąd prędkości oraz jego postać całkowaną, 5 neuronów ukrytych o sigmoidalnych funkcjach aktywacji oraz jeden liniowy neuron wyjściowy). Na wyjściu neuroregulatora prędkości otrzymano wartość zadaną momentu (prądu twornika silnika obcowzbudnego), którego obwód regulacji został zoptymalizowany zgodnie z kryterium modułu [2]. Przyjęto losowe wartości początkowe współczynników wagowych sieci perceptronowej. Adaptacja wag sieci MLP odbywała się z wykorzystaniem algorytmu wstecznej propagacji błędów, opisanego w [8]. Na kolejnych rysunkach przedstawiono wyniki badań symulacyjnych neuroregulatora wykorzystującego sieć MLP.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowe przebiegi prędkości silnika i prędkości obciążenia oraz momentu elektromagnetycznego silnika napędowego dla dłuższego przedziału czasu (20 s). Napęd wykonuje w tym czasie cykliczne nawroty; w chwili $t = 15,6$ s załączono moment obciążenia. Poza początkowym, bardzo krótkim przedziałem czasu, prędkość silnika oraz obciążenia podąża za trajektorią zadaną. Widoczne jest również redukowanie przeregulowania w kolejnych powtarzających się nawrotach napędu. W ten sposób zaprezentowano poprawność działania algorytmu adaptacyjnego.

Na rysunku 2 przedstawiono działanie napędu w odpowiedzi na skok prędkości zadanej, w zależności od zmian współczynnika adaptacji α , który wpływa bezpośrednio na szybkość zmian zmiennych stanu w strukturze sterowania. W celu uzyskania tak dobrego śledzenia wartości zadanej prędkości już od początku działania napędu, wcześniej zostały dobrane wartości początkowe macierzy wag \mathbf{W}_i oraz \mathbf{W}_o . Wszystkie następane badania regulatora wykorzystującego sieć MLP wykonano dla identycznych początkowych wartości współczynników wagowych. Wszystkie przedstawione dalej

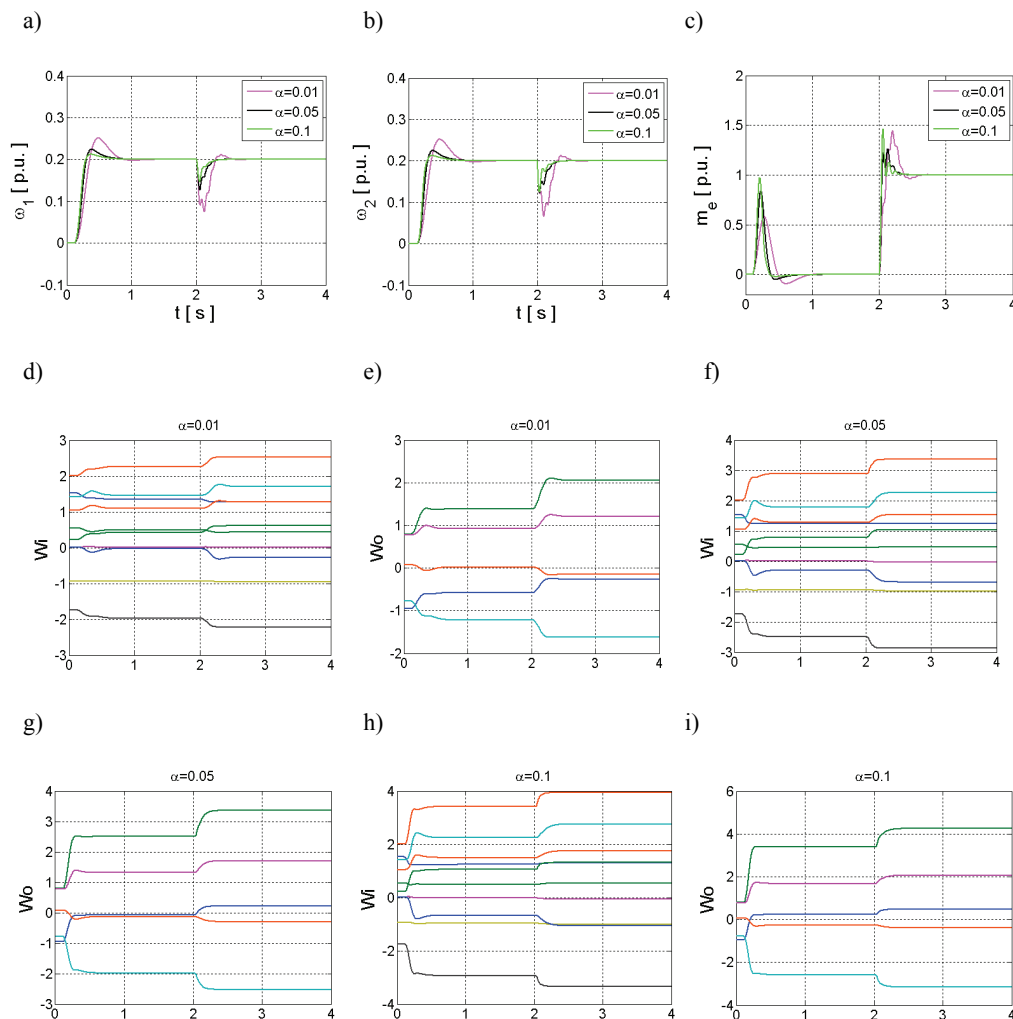
testy prezentują odpowiedź układu napędowego na skok prędkości zadanej o wartości 20% prędkości znamionowej. W chwili $t = 2$ s w układzie załączany jest moment obciążenia. Wykresy na rys. 2 d-i przedstawiają przebiegi adaptacji współczynników wagowych warstwy ukrytej i wyjściowej w zależności od wartości współczynnika α . Zmiany tych parametrów neuronowego regulatora prędkości wynikają z bezpośredniego oddziaływania algorytmu treningowego.



Rys. 1. Przebiegi prędkości układu dwumasowego (a, c) oraz momentu elektromagnetycznego (b, d) dla układu z regulatorem MLP; fragment przebiegów (c, d)

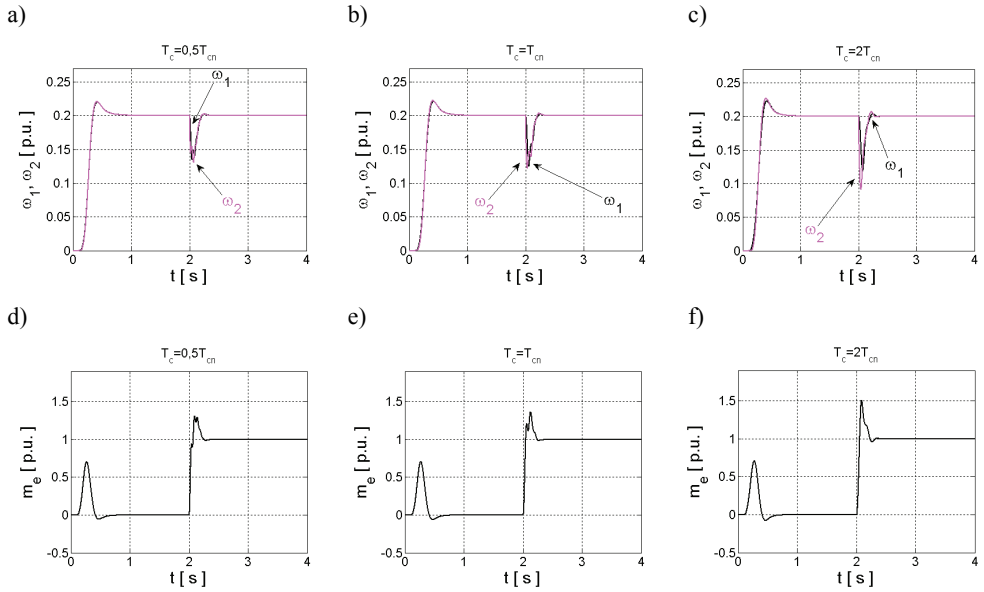
Następnie, dzięki tej adaptacji, kształtowane są właściwości regulatora, a w efekcie wymuszana jest określona (zależna od parametru α) dynamika zmian zmiennych stanu napędu. Wszystkie pozostałe testy, zaprezentowane dla regulatora adaptacyjnego opartego o model sieci perceptronowej, wykonano dla $\alpha = 0,05$.

W kolejnych testach, zmieniano parametry układu napędowego, w ten sposób zbadano wpływ zmian parametrów T_c , T_2 części mechanicznej na pracę układu napędowego z neuronowym regulatorem adaptacyjnym (rys. 3-4). Wprowadzano zmiany wymienionych parametrów w zakresie $\pm 50\%$.

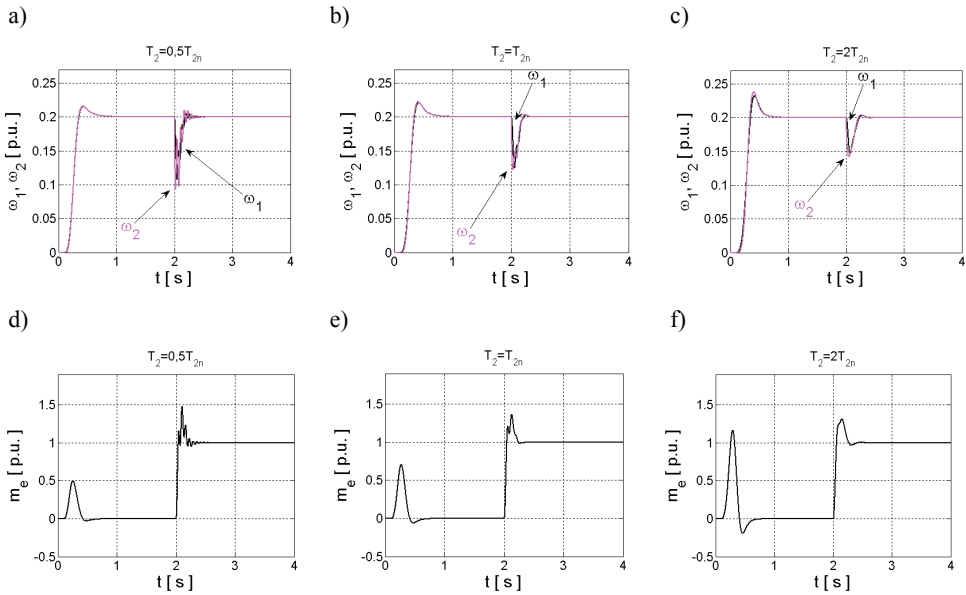


Rys. 2. Przebiegi prędkości: silnika (a) i obciążenia (b), momentu elektromagnetycznego (c) oraz wag sieci MLP (d-i) dla różnych wartości współczynnika α

Regulator umożliwia uzyskanie szybkiej odpowiedzi układu napędowego na skok prędkości zadanej, jak również na zmiany momentu obciążenia, przy czym jest praktycznie niewrażliwy na zmiany stałej czasowej połączenia mechanicznego (proporcjonalnej do współczynnika sprężystości wału). Niewielkie różnice występują tylko podczas odpowiedzi układu na zmianę momentu obciążenia, natomiast czas narastania prędkości podczas rozruchu nie ulega zmianie (rys. 3a-c). Również w przypadku zmian wartości stałej czasowej T_2 (momentu bezwładności maszyny roboczej), nieznaczne zakłócenia obserwowane są w trakcie przełączenia momentu obciążenia.

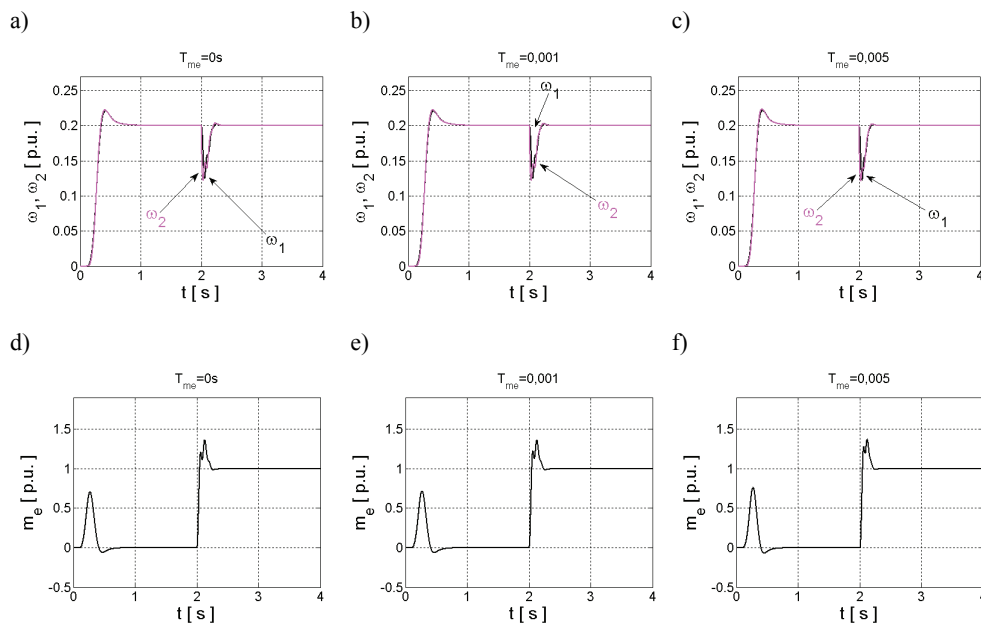


Rys. 3. Przebiegi zmiennych stanu struktury sterowania z regulatorem MLP: prędkości silnika oraz obciążenia (a, b, c), momentu elektromagnetycznego (d, e, f) dla różnych wartości stałej czasowej wału elastycznego T_c



Rys. 4. Przebiegi zmiennych stanu struktury sterowania z regulatorem MLP: prędkości silnika oraz obciążenia (a, b, c) i momentu elektromagnetycznego (b, d, e) dla różnych wartości mechanicznej stałej czasowej obciążenia

W badanym zakresie zmian T_2 , wzrost tej stałej praktycznie nie powoduje zmian w szybkości osiągania wartości zadanej przez prędkość silnika i maszyny roboczej. Jest to związane z pobieraniem większego prądu w trakcie rozruchu dla testów ze zwiększoną wartością T_2 , jednocześnie przeregulowanie wzrasta w bardzo niewielkim stopniu, zatem układ regulacji dopasowuje się do obiektu.



Rys. 5. Przebiegi zmiennych stanu struktury sterowania z regulatorem MLP: prędkości silnika oraz obciążenia (a, b, c), momentu elektromagnetycznego (d, e, f) dla różnych wartości stałej czasowej T_{me}

Zbadano również wpływ zmian opóźnienia T_{me} w pętli kształtowania momentu elektromagnetycznego na pracę układu napędowego z neuronowym regulatorem adaptacyjnym (rys. 5). Układ regulacji neuronowej praktycznie nie wykazuje wrażliwości na wielkość opóźnienia w pętli kształtowania momentu silnika, przy założonych realnych wartościach stałej czasowej regulacji momentu (prądu). Regulator adaptacyjny pozwala na uzyskanie szybkiej odpowiedzi układu napędowego na skok prędkości zadanej, jak również na zmiany momentu obciążenia (rys. 5).

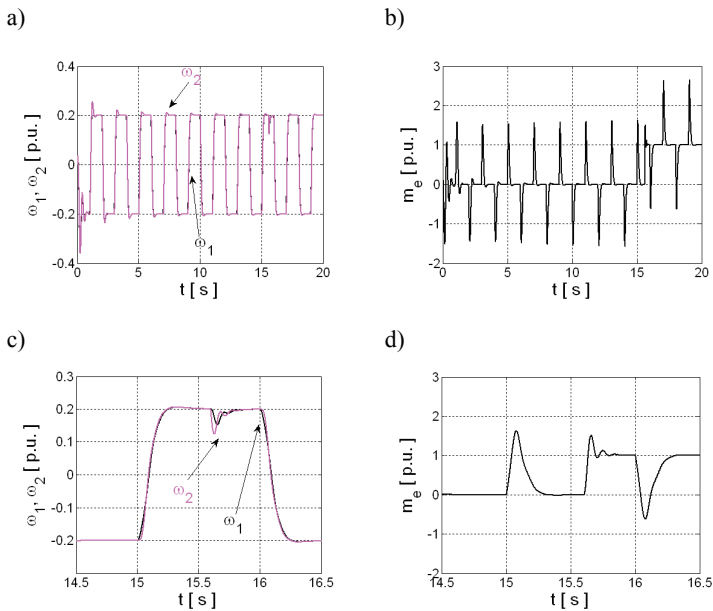
2.2. BADANIA SYMULACYJNE NAPĘDU Z NEUROREGULATOREM RBF

Adaptacja regulatora prędkości typu RBF realizowana była na podstawie błędu regulacji, obliczanego jako różnica aktualnych wartości prędkości silnika oraz prędkości zadanej z modelu referencyjnego [8]. Informacja o błędzie regulacji jest wykorzystyw-

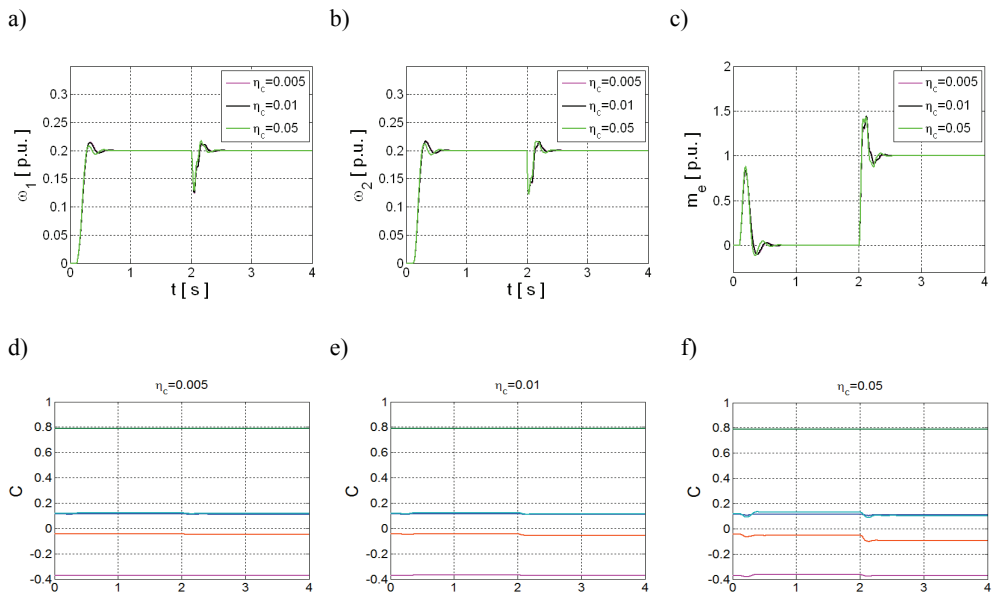
wana w dwóch elementach regulatora: na wejściu sieci neuronowej oraz w obliczeniach algorytmu adaptacji. Na rys. 6 przedstawiono przebiegi prezentujące cykliczne nawroty napędu dla prędkości zadanej równej 20% prędkości znamionowej; w chwili $t = 15,6$ s załączono moment obciążenia. Wartości początkowe wag oraz centrów zostały wyznaczone losowo. W związku z tym obserwowane są pewne niedokładności na początku pracy struktury sterowania (związane z dostrajaniem regulatora), jednak są one szybko korygowane poprzez układ adaptacyjny.

W dalszej części tego podrozdziału przedstawiono wyniki badań symulacyjnych napędu z regulatorem prędkości typu RBF podczas zmian parametrów regulatora oraz układu napędowego.

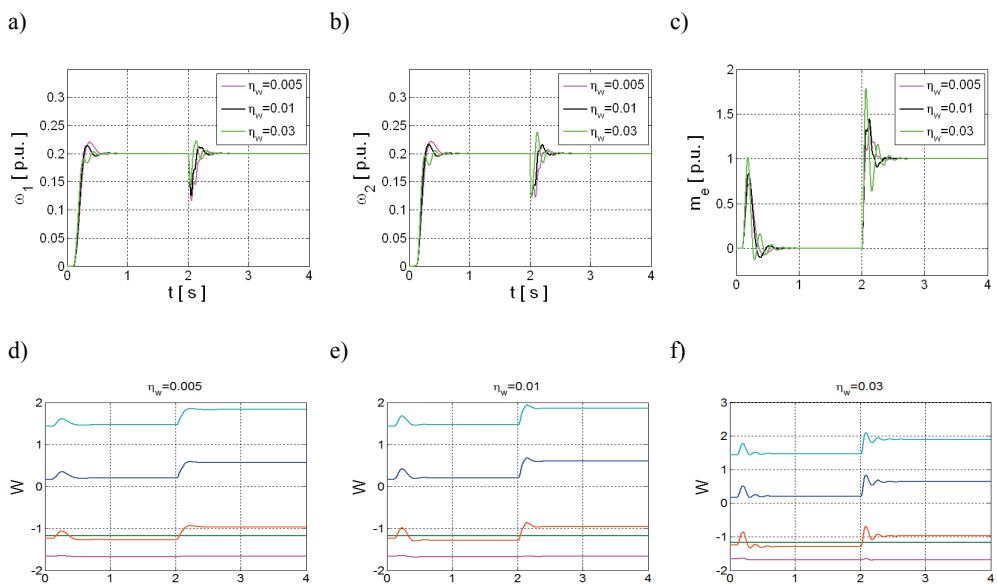
W pierwszej kolejności zbadano wpływ parametrów regulatora na otrzymywane przebiegi zmiennych stanu napędu. Te parametry to współczynniki algorytmów adaptacji zastosowane w obliczeniach wag – η_w oraz centrów – η_c sieci radialnej. Na rysunku 7 przedstawiono wpływ zmian parametru η_c , wartość drugiego ze współczynników przyjęto stałą, $\eta_w = \text{const} = 0,01$. Wraz ze wzrostem wartości η_c zwiększa się dynamika zmiennych stanu napędu dwumasowego. W takim przypadku czasy ustalania są krótsze, reakcja układu regulacji na zakłócenia (zmianę momentu obciążenia) szybsza. Przyczyną takiego zachowania całej struktury jest zwiększona reakcja (większa dynamika oraz amplitudy zmian) w macierzy centrów regulatora na zmiany sygnałów wejściowych (rys. 7d–f).



Rys. 6. Przebiegi prędkości układu dwumasowego (a, c) oraz momentu elektromagnetycznego (b, d) dla układu z regulatorem RBF; fragment przebiegów (c, d)

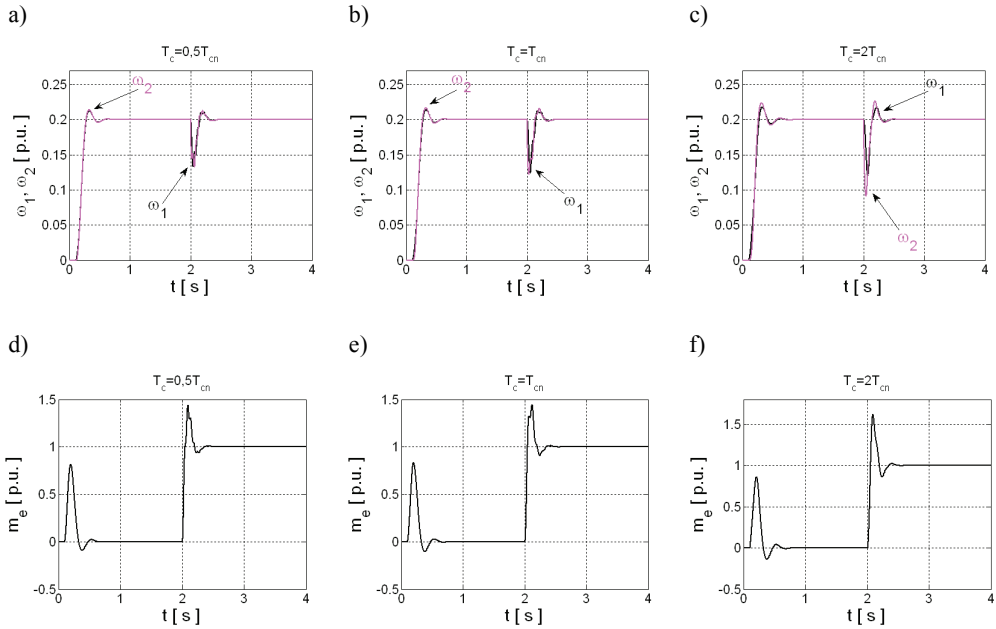


Rys. 7. Przebiegi prędkości silnika i obciążenia (a, b, c) oraz centrów sieci neuronowej RBF (d, e, f) dla różnych wartości współczynnika η_c



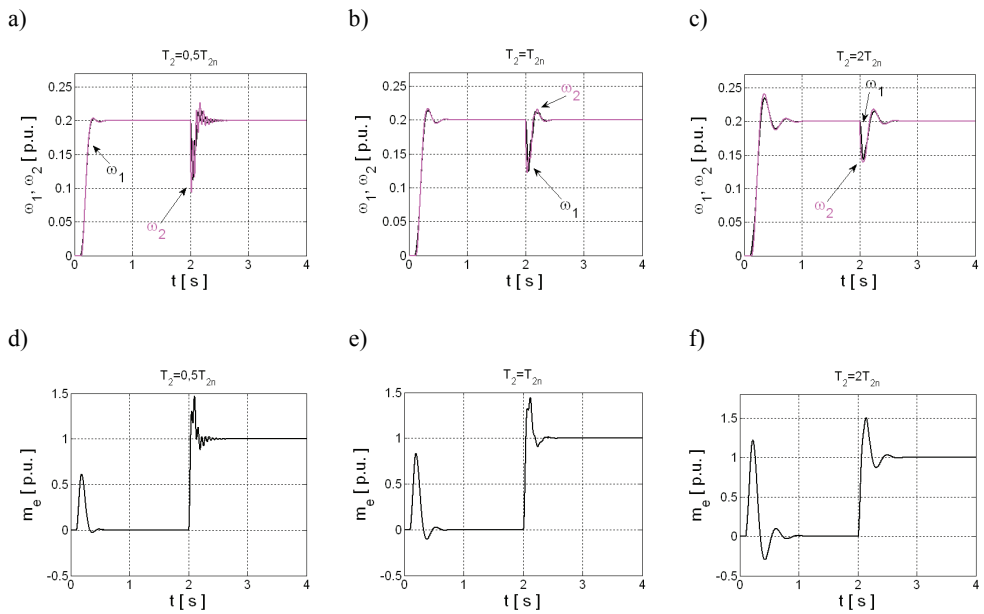
Rys. 8. Przebiegi prędkości silnika i obciążenia (a, b, c) oraz współczynników wagowych warstwy wyjściowej sieci neuronowej RBF (d, e, f) dla różnych wartości współczynnika η_w

W kolejnych badaniach testowano wpływ zmian parametru η_w na działanie regulatora RBF oraz struktury sterowania (rys. 8). Przy zmianach η_w wartość η_c pozostawała stała $\eta_c = \text{const} = 0,01$. Wpływ tego parametru na działanie struktury sterowania jest podobny jak w poprzednim przypadku. Jednak należy zaznaczyć, że zmiany η_w wpływają zdecydowanie bardziej na dynamikę przebiegów. We wszystkich kolejnych badaniach przyjęto: $\eta_c = \eta_w = \text{const} = 0,01$.

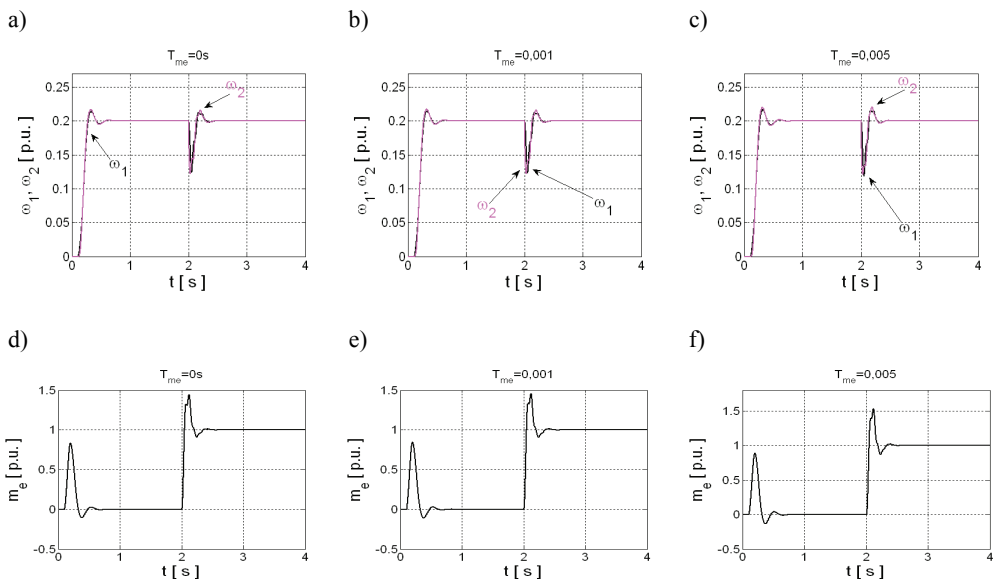


Rys. 9. Przebiegi zmiennych stanu struktury sterowania z regulatorem RBF: prędkości silnika oraz obciążenia (a, b, c) oraz momentu elektromagnetycznego (d, e, f) dla różnych wartości stałej czasowej elementu łączącego T_c

W dalszej części badań testowano wpływ zmian mechanicznej stałej czasowej elastycznego wału T_c oraz stałej czasowej obciążenia T_2 na działanie układu regulacji, a także wprowadzano opóźnienia T_{me} w pętli kształtowania momentu elektromagnetycznego. W badanym zakresie zmian parametrów adaptacyjny regulator neuronowy RBF, podobnie jak wcześniej testowany regulator MLP, zapewnia odporne sterowanie prędkością układu dwumasowego. Uzyskiwane czasy narostów prędkości do poziomu zadanego są identyczne, nieznaczne różnice są obserwowane w stanach przejściowych spowodowanych załączeniem momentu obciążenia. Obie struktury sterowania, z regulatorem MLP i RBF, wykazują pewną wrażliwość na istotne obniżenie wartości stałej czasowej maszyny roboczej, jednak taki przypadek w praktyce nie występuje.



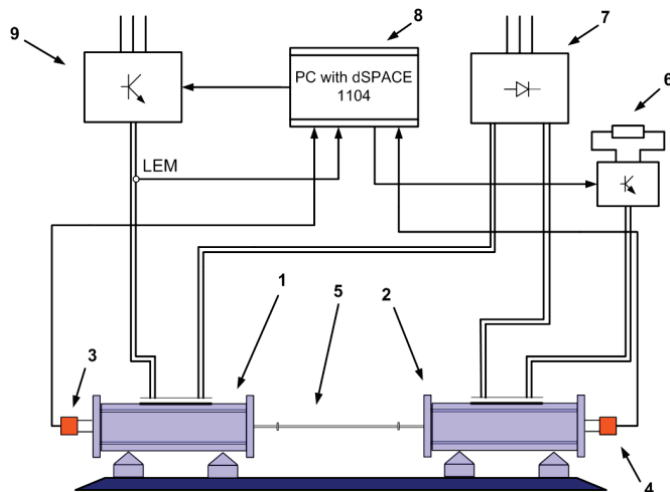
Rys. 10. Przebiegi zmiennych stanu struktury sterowania z regulatorem RBF: prędkości silnika oraz obciążenia (a, b, c) oraz momentu elektromagnetycznego (d, e, f) dla różnych wartości mechanicznej stałej czasowej T_2



Rys. 11. Przebiegi zmiennych stanu struktury sterowania z regulatorem RBF: prędkości silnika oraz obciążenia (a, b, c) oraz momentu elektromagnetycznego (d, e, f) dla różnych wartości stałej czasowej T_{me}

3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH NAPĘDU Z POŁĄCZENIEM ELASTYCZNYM I NEUROREGULATORAMI PRĘDKOŚCI SILNIKA

Opracowane regulatory neuronowe zostały przetestowane w badaniach eksperymentalnych na stanowisku laboratoryjnym, którego schemat przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Schemat stanowiska laboratoryjnego:

- 1 – silnik, 2 – maszyna obciążająca, 3, 4 – enkodery, 5 – wał łączący, 6 – rezystor hamujący,
7 – prostownik diodowy, 8 – układ sterujący, 9 – przekształtnik tranzystorowy

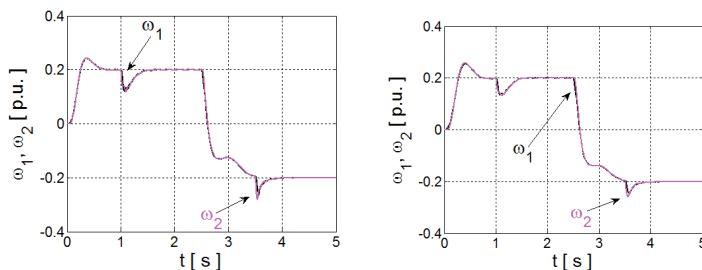
Część wykonawcza zestawu testowego zawiera dwa silniki prądu stałego o mocy 0,5 kW każdy, połączone długim, elastycznym wałem (ok. 0,7 m). Stała czasowa elementu sprężystego zależy od średnicy zamontowanego wału, mechaniczna stała czasowa obciążenia może być modyfikowana (jedynie zwiększana) poprzez montowanie dodatkowych tarcz obciążających wał silnika obciążającego. W analizowanym przypadku współczynnik sprężystości wału łączącego maszyny wynosił $K_c = 22,15$ Nm/rad. Część obliczeniowa (rejestracja danych z czujników pomiarowych, algorytm sterowania oraz sterowanie układem zasilania) jest realizowana w procesorze sygnałowym karty dSPACE 1104. Pomiar prądu jest realizowany za pomocą czujnika LEM, a pomiar prędkości obu maszyn jest realizowany poprzez zastosowanie enkoderów (36000 impulsów na obrót).

Część energoelektroniczna zawiera trzy układy prostownikowe, w tym dwa sterowane. Obwody wzbudzenia obu silników są połączone wspólnie do napięcia zasilania o stałej wartości. Natomiast regulacja napięciami uzwojeń tworników obu maszyn

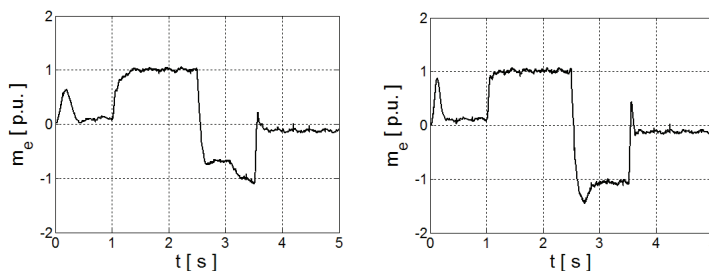
umożliwia sterowanie silnikiem napędowym oraz obciążeniem. Stałe czasowe badanego napędu są następujące: $T_1 = 230$ ms, $T_2 = 230$ ms, $T_c = 1,2$ ms.

Na rysunkach 12 i 13 przedstawiono wyniki badań napędu z regulatorem MLP o strukturze identycznej jak w badaniach symulacyjnych. Testowano wpływ współczynnika adaptacji α na dynamikę prędkości układu napędowego, przy różnych wartościach stałej czasowej maszyny roboczej.

a) b)



c) d)

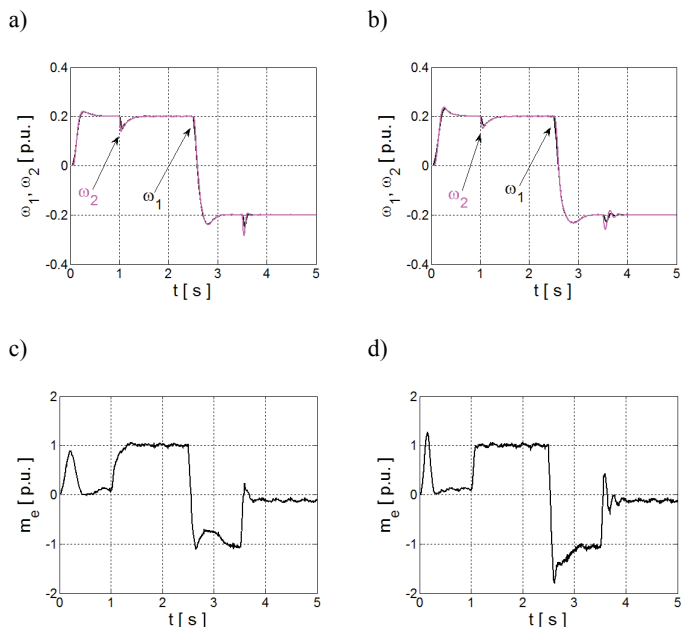


Rys. 13. Przebiegi eksperymentalne prędkości silnika i maszyny roboczej (a, b) oraz momentu elektromagnetycznego (c, d) w strukturze z regulatorem MLP dla znamionowej (a, c) i dwukrotnie większej (b, d) wartości stałej czasowej T_2 dla współczynnika adaptacji dla $\alpha = 0,1$

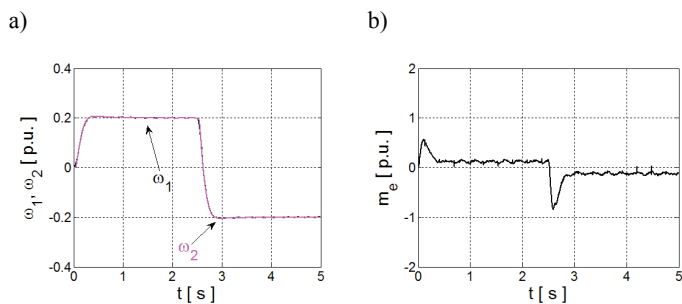
W obu przypadkach okazało się, że w trakcie nawrotu dla parametru adaptacji $\alpha = 0,1$ dynamika regulatora MLP jest zbyt mała i regulator nie wymusza momentu elektromagnetycznego zapewniającego osiągnięcie zadanej wartości prędkości w krótkim czasie (przed ustaleniem prędkości następuje przełączenie momentu obciążenia). Zwiększenie wartości parametru adaptacji umożliwiło wyeliminowanie tego zjawiska (rys. 14).

Następnie przeprowadzono testy eksperymentalne struktury sterowania z regulatorem RBF. Zastosowano parametry adaptacji identyczne jak w badaniach symulacyjnych: $\eta_c = \eta_w = 0,01$. Otrzymane rezultaty dla niewielkiego momentu obciążenia (równego momentowi tarcia) prezentują szybkie ustalanie się prędkości na poziomie zadanym. Napęd w czasie $t = 2,5$ s wykonuje nawrót. Prędkość obciążenia ω_2 śledzi

prędkość silnika napędowego ω_1 , co świadczy o tym, że regulator adaptacyjny tłumi drgania skrętne. Obie prędkości mają praktycznie identyczne trajektorie. Wartości momentu elektromagnetycznego po ustaleniu prędkości nie maleją do zera (jak w symulacjach), jest to spowodowane stosunkowo dużym momentem tarcia występującym w rzeczywistym napędzie.

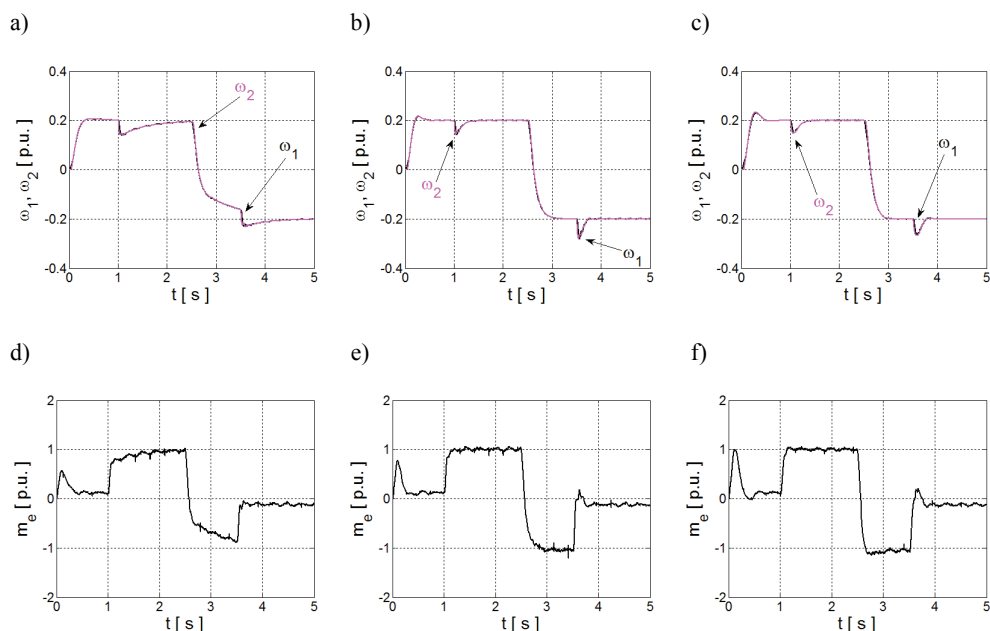


Rys. 14. Przebiegi eksperymentalne prędkości silnika i maszyny roboczej (a, b) oraz momentu elektromagnetycznego (c, d) w strukturze z regulatorem MLP dla znamionowej (a, c) i dwukrotnie większej (b, d) wartości stałej czasowej T_2 dla współczynnika adaptacji dla $\alpha = 0,5$



Rys. 15. Przebiegi eksperymentalne prędkości silnika i maszyny roboczej (a) oraz momentu elektromagnetycznego (b) w strukturze z regulatorem RBF dla $\eta_c = \eta_w = 0,01$

Na rysunku 16 przedstawiono wyniki badań dla napędu, w którym po rozpedzeniu silnika do prędkości zadanej, przełączano moment obciążenia ($t_1 = 1$ oraz $t_2 = 3,5$ s). Obciążony silnik wykonuje nawrót w chwili $t = 2,5$ s. Testy wykonane, dla układu regulacji z parametrami obwodu adaptacyjnego przyjętymi na poziomie: $\eta_c = \eta_w = 0,01$, zaprezentowano na rys. 16a, d. Dla tych wartości zaobserwowano stosunkowo długi czas reakcji na zmianę momentu obciążenia. Jednym z wniosków z badań symulacyjnych był większy wpływ parametru η_w na dynamikę napędu, w związku z czym zdecydowano o nieznacznym zwiększeniu wartości tego współczynnika – przyjęto wartość $\eta_w = 0,05$. Umożliwiło to osiągnięcie znacznie lepszej dynamiki regulacji prędkości układu napędowego (rys. 16b, e).



Rys. 16. Przebiegi eksperymentalne prędkości silnika i maszyny roboczej (a, b, c) oraz momentu elektromagnetycznego (d, e, f) w strukturze z regulatorem RBF dla $\eta_c = \eta_w = 0,01$ (a, d) oraz $\eta_c = 0,01, \eta_w = 0,05$ (a, b, d, e); przy czym (a, b, d, e) – $T_2 = T_{2n}$, (c, f) – $T_2 = 2T_{2n}$

Następnie układ z tak nastrojonym regulatorem RBF przetestowano dla zwiększonej wartości mechanicznej stałej czasowej obciążenia T_2 . Uzyskane przebiegi pokazano na rysunku 16c, f. Trajektorie zarejestrowano dla analogicznego przypadku jak zaprezentowano na rysunku 16b, e. Przebieg obu prędkości jest zbliżony do przebiegu dla znamionowej wartości T_2 . Dla zwiększonej wartości T_2 w badaniach eksperymentalnych obserwowane jest nieco większe przeregulowanie w trakcie narostu prędkości

do wartości zadanej, ponieważ moment elektromagnetyczny osiąga w trakcie rozruchu większą wartość (rys. 16f).

4. PODSUMOWANIE

Adaptacyjne regulatory neuronowe wykorzystujące sieć MLP oraz RBF zostały przetestowane w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych, których wyniki potwierdzają ich dobre właściwości w zastosowaniu do tłumienia drgań skrętnych napędu z połączeniem sprzężystym, w przypadku zastosowania jedynie sprzężenia zwrotnego od prędkości silnika napędowego. Jest to związane z adaptacją neuronowego regulatora prędkości do sterowanego obiektu, która jest wykonywana w trakcie działania napędu. Dopasowywanie modelu neuronowego jest realizowane na podstawie błędu regulacji prędkości. Parametry regulatora są dobierane w celu minimalizacji różnicy pomiędzy prędkością zadaną a rzeczywistą. Taki mechanizm zapewnia uzyskanie właściwości regulatora umożliwiających precyzyjne sterowanie układem dwumasowym, dla dynamiki zmian sygnałów zadanych (prędkości oraz obciążenia) jak w testowanym przypadku. Dynamikę uzyskiwanych przebiegów prędkości można kształtować za pomocą współczynników algorytmu uczenia zastosowanego w obliczeniach współczynników wagowych (oraz centrów sieci radialnych w przypadku regulatora RBF) regulatorów neuronowych. Wpływają one bezpośrednio na szybkość zmian współczynników wagowych sieci neuronowych, a w efekcie na dynamikę kształtowania sygnału sterującego.

Wykazano również, że testowane neuroregulatory zapewniają odporność struktury sterowania na zmiany parametrów mechanicznych napędu oraz są niewrażliwe na opóźnienie w pętli sterowania momentem silnika elektrycznego (w rozważanym zakresie, spotykanym w praktyce).

Na podkreślenie zasługuje fakt, że badania eksperymentalne wymagały jedynie niewielkich zmian współczynników adaptacji sieci neuronowych MLP oraz RBF. Wymienione wartości determinują dynamikę układu, w rzeczywistości zależą od parametrów napędu. Obserwowane niedokładności mogą świadczyć o ograniczonej precyzji identyfikacji obiektu rzeczywistego, występujących nieliniowościach oraz wadach konstrukcyjnych stanowiska laboratoryjnego. Jednak z drugiej strony przedstawiają stopień wrażliwości zaprojektowanych regulatorów.

W przypadku regulatorów wykorzystujących sieci neuronowe MLP oraz RBF zastosowano pięć neuronów warstwy ukrytej (dla takich struktur uzyskano poprawne działanie regulatorów). Jednak należy zauważyć, że ich liczba może być znacznie większa. Złożoność struktury jest jednak istotna w trakcie realizacji sprzętowej regulatora, gdyż wpływa na czas obliczeń algorytmu. Ponadto należy pamiętać o wartościach początkowych, które w wymienionych przypadkach są losowane. Większa ich liczba komplikuje (zwiększa przypadkowość przebiegów w początkowej fazie rozru-

chu napędu) realizację praktyczną neuroregulatora. W takich przypadkach należy rozważyć zastosowanie wstępnego treningu dla zastosowanych modeli neuronowych lub inne metody nie bazujące na losowaniu parametrów początkowych.

Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu UMO-2011/01/B/ST7/04632.

LITERATURA

- [1] BOSE B.K., *Neural Network Applications in Power Electronics and Motor Drives – An Introduction and Perspective*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, No. 1, 14–33.
- [2] SZABAT K., OROWSKA-KOWALSKA T., *Vibration suppression in two-mass drive system using PI speed controller and additional feedbacks – comparative study*, IEEE Trans. Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, No. 2, 1193–1206.
- [3] CHEN T.C., SHEU T.T., *Model Reference Neural Network Controller for Induction Motor Speed Control*, IEEE Trans. Energy Conversion, 2002, Vol. 17, No. 2, 157–162.
- [4] BOSE B.K., CHIO K.M., KIM H.J., *Self Tunning Neural Network Controller for Induction Motor Drives*, IEEE Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, 2002, Vol. 1, 152–156.
- [5] KAMINSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Adaline – based Speed Controller of the Drive System with Elastic Joint*, 13th Int. Conf. OPTIM, 2012, 1052–1057.
- [6] KAMINSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *FPGA Implementation of ADALINE-based Speed Controller for Two-mass System*, IEEE Trans. on Industrial Informatics, 2013, Vol. 9, No. 3, 1301–1311.
- [7] KAMIŃSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Adaptive neural speed control of the induction motor drive*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, Vol. 89, No. 2A, 21–24.
- [8] KAMIŃSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Analiza porównawcza wybranych neuroregulatorów dla napędu z połączeniem sprężystym – opis zastosowanych modeli*, Prace Naukowe IMNiPE, 2013, Nr 69, Ser.: Studia i Materiały, Nr 33, 3–13.
- [9] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., KAMIŃSKI M., SZABAT K., *Mechanical state variable estimation of drive system with elastic coupling using optimized feed-forward neural networks*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences, 2008, Vol. 56, No. 3, 239–246.

COMPARATIVE ANALYZIS OF CHOSEN NEUROCONTROLLERS FOR THE DRIVE SYSTEM WITH ELASTIC JOINT – TESTS RESULTS

In the paper the comparative study of the MLP and RBF neurocontrollers, applied in the drive system with elastic joint are presented. The influence of the adaptation coefficients of both tested neurocontrollers to the dynamic performance and torsional vibration damping of the control structure, with only one feedback from the driven motor speed, is analyzed. This influence was tested for nominal as well as for changed parameters of the drive system.