

*sieć falkowa, falki, sieci neuronowe  
układy adaptacyjne, sterowanie napędem elektrycznym*

Piotr DERUGO\*, Krzysztof SZABAT\*

## **ZASTOSOWANIE ADAPTACYJNEJ SIECI FALKOWEJ DO REGULACJI PRĘDKOŚCI SILNIKA PRĄDU STAŁEGO**

W referacie zaprezentowano zagadnienia związane z zastosowaniem sieci falkowej jako adaptacyjnego regulatora prędkości silnika prądu stałego. Do badań wykorzystano powszechnie znaną kaskadową strukturę regulacji. W strukturze tej klasyczny regulator prędkości został zastąpiony siecią falkową o dziesięciu neuronach w warstwie aktywacji. W wykonanych badaniach sprawdzono działanie struktury układu w różnych warunkach pracy. Zaproponowano metody pozwalające na zachowanie stabilności układu w przypadku próby wymuszenia szybko zmieniającej się trajektorii prędkości.

### 1. WSTĘP

Ukłodom regulacji stawiane są coraz wyższe wymagania dotyczących ich właściwości dynamicznych i statycznych [1], [4]. W celu ich osiągnięcia w wielu ośrodkach naukowych w kraju i na świecie prowadzone są badania nad różnego rodzaju inteligentnymi układami sterowania. Oprócz szeroko obecnie rozpowszechnionych układów rozmytych [5], [6], [12] czy sieci neuronowych [2], [3], w ostatnich latach pojawiły się prace mające na celu wykorzystanie własności aproksymacyjnych funkcji falkowych [8] również w układach sterowania [7], [9], [10], [11]. Zastosowanie nieliniowych funkcji w warstwach rozmywania (aktywacji) i/lub konkluzji umożliwia, w porównaniu do funkcji liniowych, wprowadzenie do regulatora dodatkowych nieliniowości. Nieliniowości te z kolei pozwalają na lepsze odwzorowanie nieliniowych funkcji sterowania, dedykowanych obiektom nieliniowym.

W niniejszej pracy zdecydowano się na przyjęcie funkcji Falkowej opartej o pierwszą pochodną funkcji Gaussa, którą to można rozważać jako ciągły i różniczkowalny

---

\* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: piotr.derugo@pwr.wroc.pl

odpowiednik falki Haara [10]; tak jak popularna w sieciach neuronowych sigmoidalna funkcja aktywacji może być traktowana jako różniczkowalny odpowiednik funkcji skokowej.

Referat składa się z pięciu rozdziałów w których kolejno przedstawiono model matematyczny kaskadowej struktury sterowania silnikiem prądu stałego. Kolejno zamieszczono schemat wraz z opisem matematycznym sieci falkowej użytej jako regulator prędkości we wcześniej opisanym układzie sterowania. Następnie zamieszczono wyniki badań symulacyjnych układu. W czasie badań symulacyjnych przeanalizowano wpływ szybkości zmian sygnału zadanego na działanie układu. Zaproponowano rozwiązanie w postaci wyłączania bloków adaptacji w zdefiniowanej chwili czasowej. Wnioski podsumowujące zamieszczono na końcu pracy.

## 2. MODEL MATEMATYCZNY UKŁADU NAPĘDOWEGO

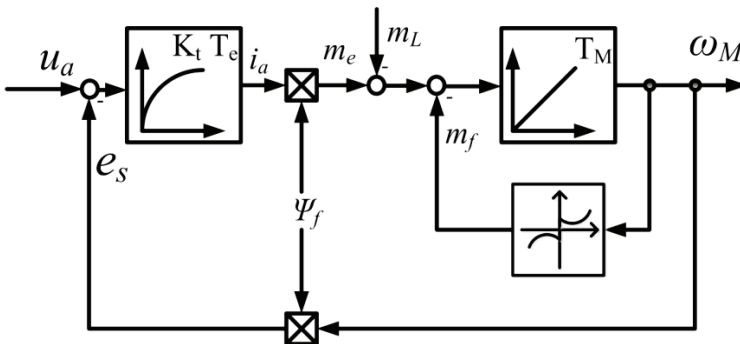
Do badań, w niniejszej pracy, użyty został model matematyczny obcowzbudnego silnika prądu stałego. Jako założenie upraszczające przyjęto stałą wartość strumienia wzbudzenia  $\psi_f$ . Obiekt taki daje się opisać równaniami w jednostkach względnych [6].

$$T_e \frac{di_a}{dt} = -i_a + K_t(u_a - \psi_f \omega_M) \quad (1)$$

$$T_M \frac{d\omega_M}{dt} = \psi_f i_a - m_L - m_f \quad (2)$$

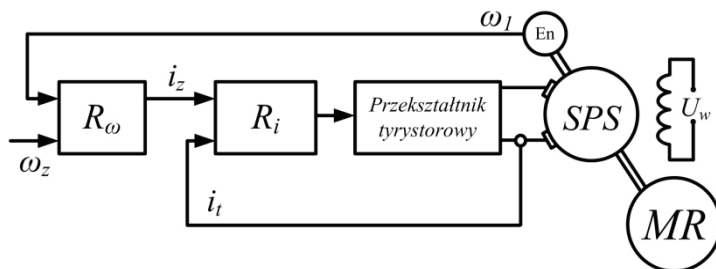
gdzie:  $T_e$  – stała elektromagnetyczna,  $T_M$  – stała mechaniczna,  $i_a$  – prąd twornika,  $\omega_m$  – prędkość,  $\psi_f$  – strumień wzbudzenia,  $m_L$  – moment obciążenia,  $m_f$  – tarcie.

Schemat blokowy silnika DC, opracowany na podstawie równa (1) i (2), przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat blokowy silnika prądu stałego

Układ sterowania składa się z dwóch kaskadowo połączonych regulatorów (rys. 2). W pętli zewnętrznej zastosowano proponowaną sieć falkową pełniącą rolę regulatora prędkości. W pętli wymuszenia momentu użyty został klasyczny regulator prądu typu PI.



Rys. 2. Schemat układu sterowania

### 3. MODEL SIECI FALKOWEJ PEŁNIĄCEJ ROLĘ REGULATORA PRĘDKOŚCI

Zgodnie z opisem proponowanym w [10], [11] sieć falkowa pełniąca rolę regulatora można opisać za pomocą czterech warstw. O numerze warstwy mówią wartości w nawiasach indeksów górnych w poniższych wzorach. Pierwsza warstwa jest warstwą wejściową. Normalizuje ona, w razie konieczności, sygnały wejściowe. W niniejszym przypadku węzły wejściowe są opisane równaniem (3).

$$y_i^{(1)} = f(x_i^{(1)}) = x_i^{(1)}, \quad i = 1, 2 \quad (3)$$

Wyjście warstwy pierwszej, jest wejściem warstwy drugiej. W warstwie tej odbywa się kolejno skalowanie oraz przesunięcie sygnału (4), wyznaczenie wartości funkcji aktywacji będącej funkcją Falkową bazująca na pierwszej pochodnej funkcji Gaussa (5) której argument jest wynikiem równania (6) co jest zgodne z [10], [11], a na końcu pomnożenie poprzez wagę tej funkcji. W przypadku układu adaptacyjnego wagi te mogą przyjąć wartości jedności, gdyż inne parametry ulegające adaptacji pozwolą układowi na dopasowanie. Parametry  $m$  i  $\sigma$  odpowiadają odpowiednio za przesunięcie i rozszerzenie funkcji Falkowej.

$$net_j^{(2)} = \frac{y_i^{(1)} - m_{ij}}{\sigma_{ij}} \quad (4)$$

$$\Phi_j(x) = -x \cdot e^{-x^2/2} \quad (5)$$

$$y_j^{(2)} = f = \Phi_j(net_j^{(2)}), \quad j = 1 \dots 10 \quad (6)$$

Trzecią z kolei jest warstwa iloczynów. W warstwie tej odpowiednio mnożone są wartości wyjściowe warstwy drugiej. Odbyna się to zgodnie ze wzorem (7)

$$y_k^{(3)} = y_{j_1}^{(2)} y_{j_2}^{(2)} \quad (7)$$

W warstwie wyjściowej wyznaczana jest ostateczna wartość sygnału wejściowego sieci. Odbyna się to zgodnie z równaniem (8)

$$y_o^{(4)} = \sum_k w_{ko}^{(4)} \cdot y_k^{(3)}, \quad o = 1 \quad (8)$$

Analizowana sieć jest siecią adaptacyjną. Adaptowane są w niej trzy zmienne. Wagi warstwy wyjściowej, oraz parametry funkcji Falkowych. Adaptacje tych współczynników odbywają się zgodnie ze wzorami (9)–(14) [3a]

$$w_{ko}^{(4)}(N+1) = w_{ko}^{(4)}(N) + \Delta w_{ko}^{(4)} \quad (9)$$

$$\Delta w_{ko}^{(4)} = \eta_w \delta_o^{(4)} x_k^{(4)} \quad (10)$$

$$m_{ij}(N+1) = m_{ij}(N) + \Delta m_{ij} \quad (11)$$

$$\Delta m_{ij} = -\eta_m \frac{\delta_j^{(2)}}{\sigma_{ij}} \quad (12)$$

$$\sigma_{ij}(N+1) = \sigma_{ij}(N) + \Delta \sigma_{ij} \quad (13)$$

$$\Delta \sigma_{ij} = \eta_\sigma \delta_j^{(2)} \frac{(m_{ij} - x_i^{(2)})}{(\sigma_{ij})^2} \quad (14)$$

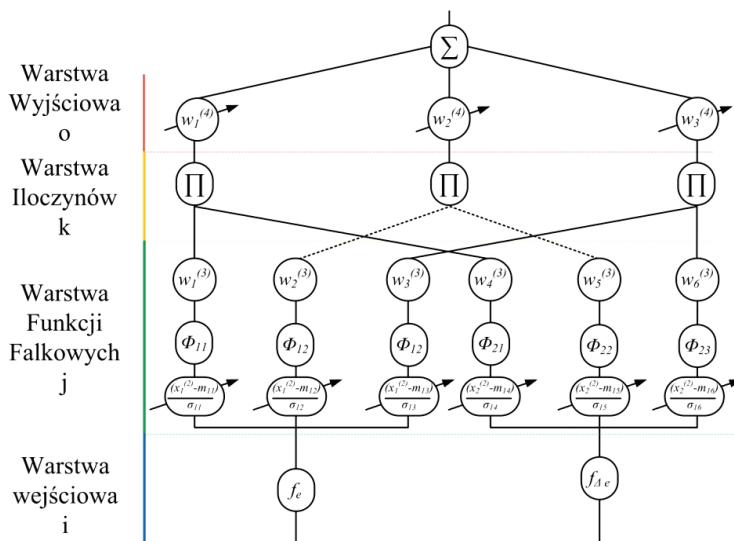
gdzie  $\eta_w$ ,  $\eta_m$ ,  $\eta_\sigma$  równe odpowiednio 0,01, 0,01, 0,2/5 [5a] natomiast zmienne  $\delta$  są wartościami sprzężeń pomiędzy warstwami [3a], takimi że:

$$\delta_j^{(2)} = \sum_k \delta_k^3 y_k^3 \quad (15)$$

$$\delta_k^{(3)} = \delta_o^4 w_{ko}^4 \quad (16)$$

$$\delta_o^{(4)} \cong e + \Delta e \quad (17)$$

Schemat ideowy analizowanego regulatora zaprezentowano na rysunku 3, dla przejrzystości przedstawia on regulator o 6 funkcjach falkowych oraz 3 blokach mnożenia, w badaniach wykorzystano analogiczny układ o 10 funkcjach Falkowych, a tym samym 5 blokach mnożenia w warstwie iloczynów  $k$ .



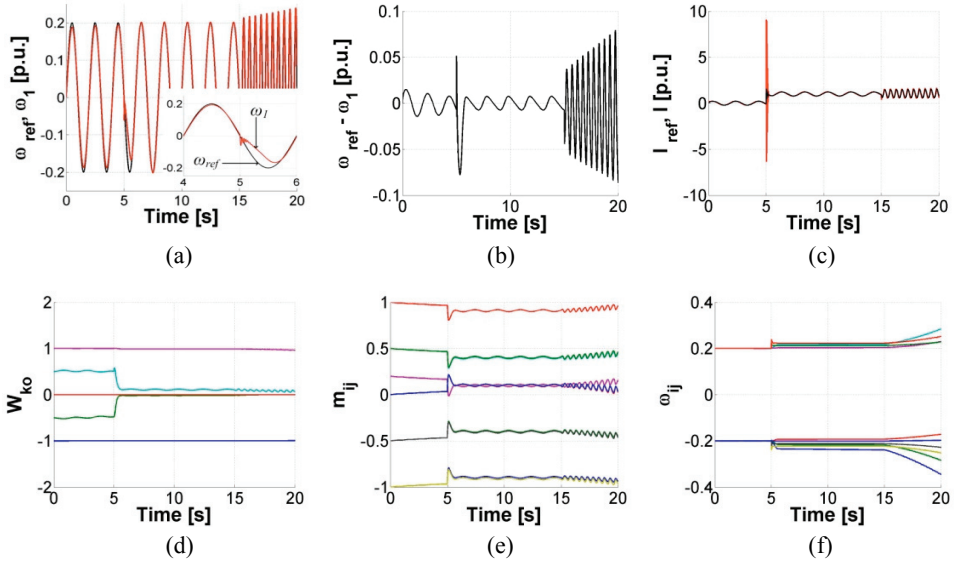
Rys. 3. Schemat ideowy sieci Falkowej

Tak zdefiniowana sieć nie może zostać zainicjalizowana w sposób losowy, jak to ma miejsce w przypadku niektórych sieci neuronowych, inicjalizacji dokonano na podstawie [7].

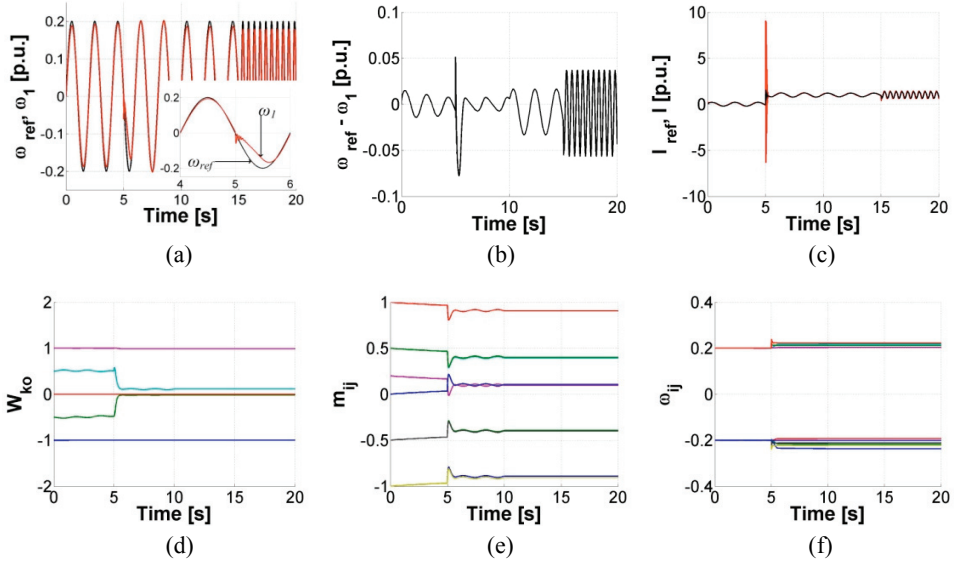
#### 4. BADANIA SYMULACYJNE

W trakcie badań symulacyjnych zadano na układ trajektorię w postaci sygnału sinusoidalnego o amplitudzie 0,2 wartości znamionowej. Przez pierwsze 15 sekund częstotliwość wymuszenia wynosiła 0,5 Hz, kolejno częstotliwość zwiększono skokowo do 2 Hz. Dodatkowo w chwili czasowej  $t = 5$  s załączono znamionowe obciążenie które utrzymano na tym poziomie do końca badań.

Na rysunku 4 zaprezentowano wybrane przebiegi układu dla przypadku adaptacji wszystkich współczynników ( $w$ ,  $m$ ,  $\sigma$ ) w czasie całej symulacji. Jak widać na przebiegu różnicy prędkości zadanej oraz odtwarzanej przez silnik, amplituda uchybu sterowania po zwiększeniu częstotliwości wymuszenia wzrasta. Należy jednak podkreślić, że w specyficznych warunkach pracy układ może stracić stabilność. Fakt ten wynika z ciągłej adaptacji poszczególnych współczynników sieci w celu lepszego śledzenia zadanej prędkości, przy jednoczesnym występowaniu fizycznych ograniczeń w układzie. W związku z powyższym, jako pierwsze rozwiązanie, zaproponowano wyłączenia adaptacji wszystkich współczynników układu w zadanej chwili czasowej (rys. 5) oraz (kolejny przypadek) wyłączenia adaptacji parametrów funkcji Falkowych ( $m$ ,  $\sigma$ ) przy zachowaniu adaptacji wartości współczynników wagowych w warstwie wyjściowej (rys. 6). Należy jednak podkreślić, że wartości wag wyjściowych posiadają górne ograniczenie.

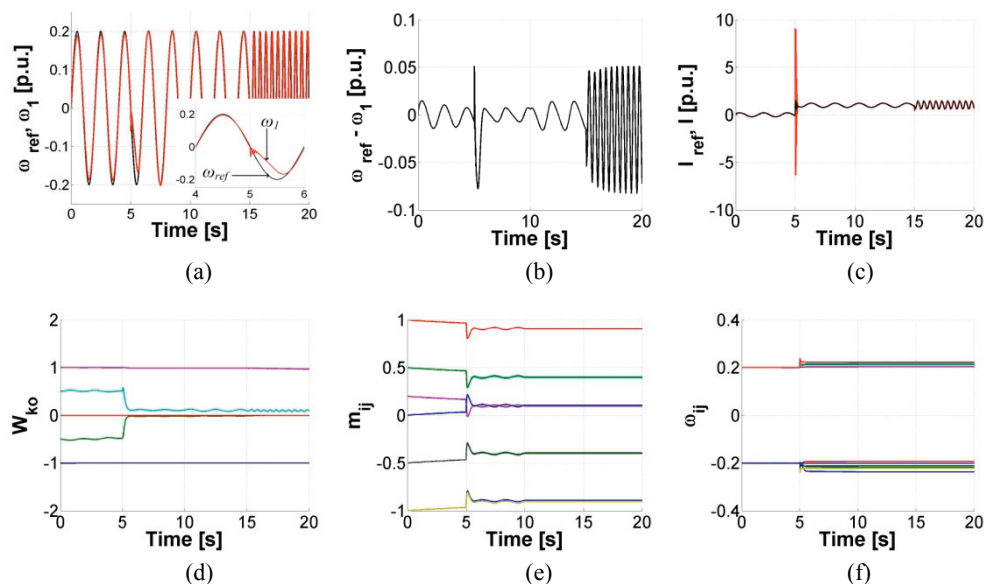


Rys. 4. Wybrane przebiegi zmiennych dla przypadku układu z adaptacyjną siecią falkową z adaptacją w czasie całej symulacji. Prędkość zadana i odtwarzana (a), różnica tych prędkości (b), prąd zadany i odtwarzany (c), przebiegi zmienności parametrów adaptowanych  $w$  (d),  $m$  (e),  $\sigma$  (f)



Rys. 5. Wybrane przebiegi zmiennych dla przypadku układu z adaptacyjną siecią falkową z odłączeniem bloków adaptacji w chwili czasowej  $t=10$  s. Prędkość zadana i odtwarzana (a), różnica tych prędkości (b), prąd zadany i odtwarzany (c), przebiegi zmienności parametrów adaptowanych  $w$  (d),  $m$  (e),  $\sigma$  (f)

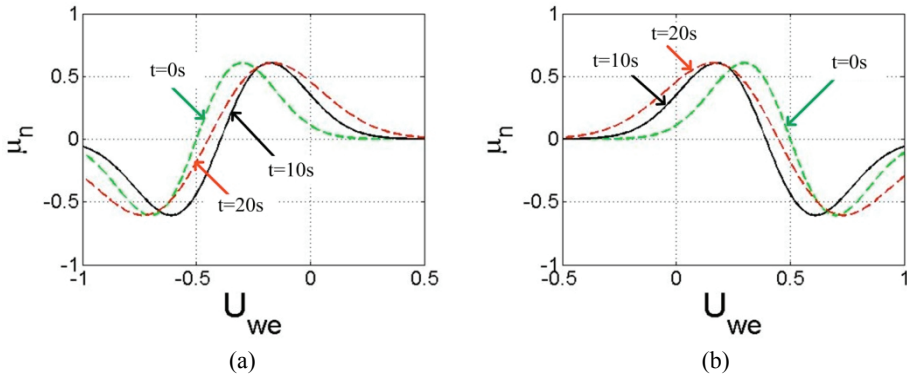
Jak wynika z przedstawionych przebiegów oba proponowane rozwiązania pozwalają na zachowanie stabilności układu regulacji. Po zatrzymaniu procesu adaptacji zarówno w pierwszym, jak i drugim przypadku zwiększenie częstotliwości wymuszenia nie spowodowało wzrostu uchybu sterowania i utraty stabilności przez układ. Warto zauważyć, iż odłączenie wszystkich bloków adaptacji (rys. 5) w porównaniu do wyłączenia adaptacji jedynie parametrów funkcji falkowych (rys. 6) poskutkowało większymi uchybami regulacji w czasie wymuszenia o pierwotnej częstotliwości.



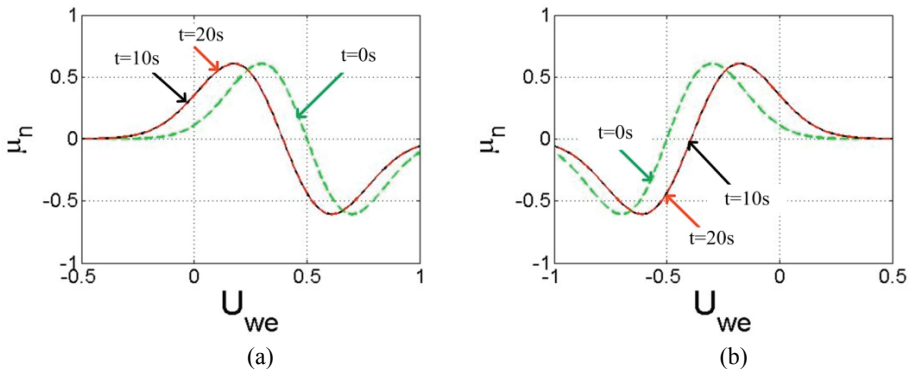
Rys. 6. Wybrane przebiegi zmiennych dla przypadku układu z adaptacyjną siecią falkową z odłączeniem bloków adaptacji parametrów funkcji falkowych w chwili czasowej  $t = 10$  s. Prędkość zadana i odtwarzana (a), różnica tych prędkości (b), prąd zadany i odtwarzany (c), przebiegi zmienności parametrów adaptowanych  $w$  (d),  $m$  (e),  $\sigma$  (f)

Na kolejnych rysunkach 7 i 8 przedstawiono kształt wybranych falkowych funkcji aktywacji w chwilach czasowych  $t = 0$ , 10 i 20 s. Rysunki przedstawiają odpowiednio przypadki układu gdzie adaptacja trwała w czasie całej symulacji (rys. 7) oraz przypadku gdzie w chwili czasowej  $t = 10$  s wyłączono adaptacje parametrów funkcji falkowych.

Jak można zauważyć na poniższych rysunkach, falka w pierwszej fazie ( $t = 0-10$  s) ulega głównie przesunięciu w kierunku zera. W fazie drugiej ( $t = 10-20$  s) falka ta zaczyna ulegać rozszerzeniu. W przypadku układu gdzie adaptacja jest wyłączana, parametry kształtu funkcji przestają ulegać zmianom w czasie dalszych symulacji, a tym samym kształt fałek się nie zmienia, widoczne jest to na rys. 8.



Rys. 7. Kształty falek  $j = 2$  (a) i  $j = 4$  (b) w chwilach czasowych  $t = 0, 10, 20$  s bez wyłączenia bloków adaptacji



Rys. 8. Kształty falek  $j = 4$  (a) i  $j = 2$  (b) w chwilach czasowych  $t = 0, 10, 20$  s dla przypadku układu z wyłączeniem bloków adaptacji w chwili czasowej  $t = 10$  s

## 5. PODSUMOWANIE

W trakcie badań symulacyjnych sprawdzono możliwość wykorzystania sieci Falkowej jako regulatora prędkości układu napędowego. Układ taki wykazał się bardzo dobrym śledzeniem prędkości zadanej w przypadku szybko zmieniającej się, ale możliwej do osiągnięcia przez napęd wartości wymuszenia.

W przypadku trajektorii o większej dynamice układ wykazuje cechy niestabilności. Zaproponowane rozwiązania w postaci zatrzymywania procesu adaptacji wszystkich zmiennych parametrów oraz zatrzymywania procesu adaptowania jedynie parametrów odpowiadających za kształt funkcji falkowych pozwoliły na zachowanie stabilności układu. Przyszłe badania będą obejmowały modyfikacje zastosowanego prawa adaptacji oraz implementację praktyczną układu na stanowisku laboratoryjnym.



Praca finansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu: *Adaptacyjne sterowanie rozmyte złożonego układu napędowego o zmiennych parametrach*, 2011/03/B/ST7/02517.

#### LITERATURA

- [1] BROCK S., ZAWIRSKI K., *New approaches to selected problems of precise speed and position control of drives*, IECON 2012, 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, 2012, 6291–6296.
- [2] KAMIŃSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *FPGA Implementation of ADALINE-Based Speed Controller for the Drive System with Elastic Joint*, IEEE Trans. Ind. Informat., Vol. 9, No. 3, Aug. 2013, 1301–1311.
- [3] KAMIŃSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T. *FPGA Implementation of the Multilayer Neural Network for the Speed Estimation of the Two-Mass Drive System*”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 7, No. 3, Aug. 2011, 436–445.
- [4] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [5] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., DYBKOWSKI M., *Neuro-Fuzzy Adaptive Control of the IM Drive with Elastic Coupling*”, EPE – PEMC 2008, Poznań, Poland (on CD).
- [6] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., SZABAT K., JASZCZAK K., *The influence of parameters and structure of PI-type fuzzy-logic controller on DC drive system dynamics*, Fuzzy Sets and Systems, 131, 2002, 251–264.
- [7] OUSSAR Y., RIVALS I., PERSONNAZ L., DREYFUS G., *Training wavelet networks for nonlinear dynamic input-output modeling*, Neurocomputing, 20, 1998, 173–188.
- [8] QINGHUA ZHANG, ALBERT BENVENISTE, *Wavelet Networks*, IEEE Transactions on Industrial Electronics Neural Networks, Vol. 3, No. 6, Nov. 1992, 889–898.
- [9] RAHIB HIDAYAT ABIYEV, OKYAY KAYNAK, *Fuzzy Wavelet Neural Networks for Identification and Control of Dynamic Plants – A Novel Structure and a Comparative Study*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 8, Aug. 2008, 3133–3140.
- [10] RONG-JONG WAI, JIA-MING CHANG, *Intelligent control of induction servo motor drive via wavelet neural Network*, Electric Power Systems Research, 61, 2002, 67–76.
- [11] RONG-JONG WAI, ROU-YONG DUAN, JENG-DAO LEE, HAN-HSIANG CHANG, *Wavelet Neural Network Control for Induction Motor Drive Using Sliding-Mode Design Technique*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 50, No. 4, Aug. 2003, 733–748.
- [12] ZAWIRSKI K., URBAŃSKI K., *Application of fuzzy control technique to thyristor DC drive*. Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Vol. 3, 1997, 1173–1178.

#### APPLICATION OF THE WAVELET NETWORK TO SPEED CONTROL OF DC MOTOR

This paper presents the possibility of using Wavelet network as DC motor speed controller in a cascade control structure. For this purpose cascade control structure has been modeled in MATLAB Simulink package. Possible to achieve dynamic has been tested during simulations. Methods allowing structure to remain stable under high trajectory has been proposed.