

*napęd elektryczny, DRFOC, sterowanie wektorowe,  
połączenie sprzężyste, regulator adaptacyjny, silnik indukcyjny*

Piotr DERUGO\*, Mateusz DYBKOWSKI\*, Krzysztof SZABAT\*

## **ADAPTACYJNE WEKTOROWE STEROWANIE UKŁADEM NAPĘDOWYM Z POŁĄCZENIEM SPRĘŻYSTYM**

W artykule przedstawiono analizę układu wektorowego sterowania DRFOC silnika indukcyjnego z połączeniem sprzężystym. Standardowy regulator typu PI w torze regulacji prędkości kątowej został zastąpiony adaptacyjnym neuronowo-rozmytym regulatorem, który umożliwia pełną adaptację do aktualnych warunków pracy napędu. Sprawdzono wpływ liczby reguł na jakość procesu adaptacji przy zmiennej mechanicznej stałej czasowej silnika i przy zmiennych parametrach schematu zastępczego silnika indukcyjnego.

### **1. WPROWADZENIE**

Nowoczesne układy napędowe z silnikami AC cechują coraz to lepsze właściwości regulacyjne i dynamiczne [1]. Nowoczesne techniki sterowania wektorowego, uzupełnione o zaawansowane systemy identyfikacji niedostępnych pomiarowo zmiennych stanu maszyny pozwalają na uzyskiwanie coraz to lepszych właściwości. Ponadto rozwój energoelektroniki i układów mikroprocesorowych spowodował, że w praktycznie wszystkich gałęziach przemysłu dominują dzisiaj silniki prądu przemiennego sterowane z przekształtników częstotliwości [3]. Bez wątpienia trend ten zostanie zachowany a najnowsze algorytmy sterowania cechować się będą, poza wspomnianymi właściwościami, zwiększoną odpornością na zmiany parametrów maszyny jak i całego układu napędowego [3].

Jednym z problemów występujących w zaawansowanych układach napędowych jest sposób połączenia silnika z maszyną roboczą [1], [3–6]. Z reguły nie jest to idealne połączenie sztywne, chociaż czasami tak się je traktuje ze względów upraszczających, lecz jest to połączenie charakteryzujące się określoną sprzężystością i luzami. Niekontrolowane oscylacje występujące na wale maszyny spowodowane sprzężysto-

---

\* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, mateusz.dybkowski@pwr.wroc.pl, krzysztof.szabat@pwr.wroc.pl

ścią mogą w skrajnym wypadku doprowadzić do utraty stabilności napędu. Istotne jest opracowanie takich systemów, które w bezpieczny sposób będą eliminowały wpływ połączenia silnika z maszyną roboczą, a jednocześnie będą charakteryzowały się prostą konstrukcją bazującą na powszechnie znanych technikach sterowania.

Jedną z metod kompensacji wpływu połączenia maszyn jest wykorzystanie regulatorów adaptacyjnych [1], [3] w torze regulacji prędkości kątowej. Ich zmienność korzystnie wpływa na odporność układu na zmienne warunki pracy napędu, zwiększa jego stabilność i zapewnia tłumienie oscylacji na prędkości maszyny roboczej.

W niniejszej pracy zaprezentowano badania układu wektorowego sterowania silnika indukcyjnego DFOC z adaptacyjnym regulatorem neuronowo-rozmytym z połączeniem sprężystym.

## 2. DWUMASOWY UKŁAD NAPĘDOWY

W artykule wykorzystano powszechnie wykorzystywany model matematyczny układu napędowego z połączeniem sprężystym, który można opisać za pomocą równań [1]:

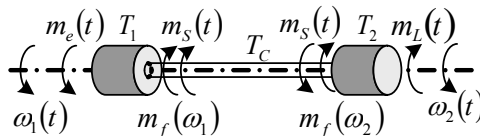
$$T_1 \frac{d\omega_1}{dt} = m_e - m_s - m_f \quad (1)$$

$$T_2 \frac{d\omega_2}{dt} = m_s - m_L - m_f \quad (2)$$

$$T_c \frac{dm_s}{dt} = \omega_1 - \omega_2 \quad (3)$$

gdzie:  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_c$  – stałe czasowe mechaniczne silnika i maszyny,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – prędkości silnika i maszyny obciążającej,  $m_e$ ,  $m_s$ ,  $m_f$  – momenty elektromagnetyczny, skrętny i nieliniowe tarcie.

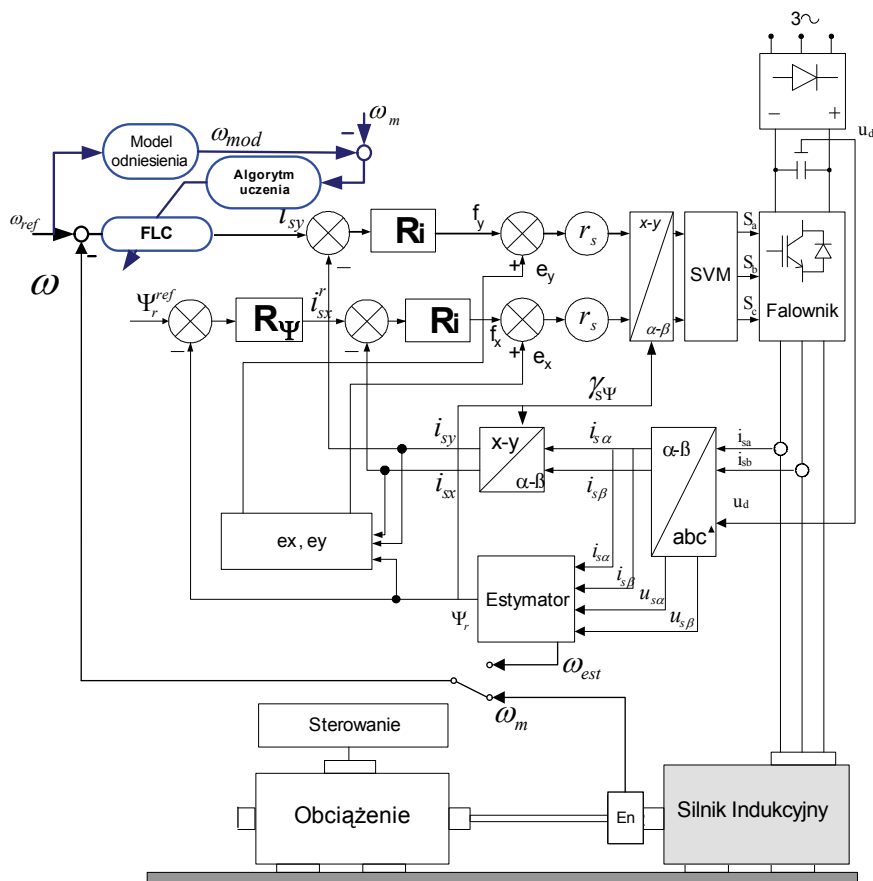
Schemat układu dwumasowego przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat układu dwumasowego  
Fig. 1. The schematic diagram of the two-mass system

Jako strukturę sterowania wykorzystano układ bezpośredniego sterowania polo-wo zorientowanego, w którym jako regulator prędkości wykorzystano adaptacyjny

regulator neuronowo-rozmyty. Schemat ideowy układu sterowania przedstawiono na rys. 2.

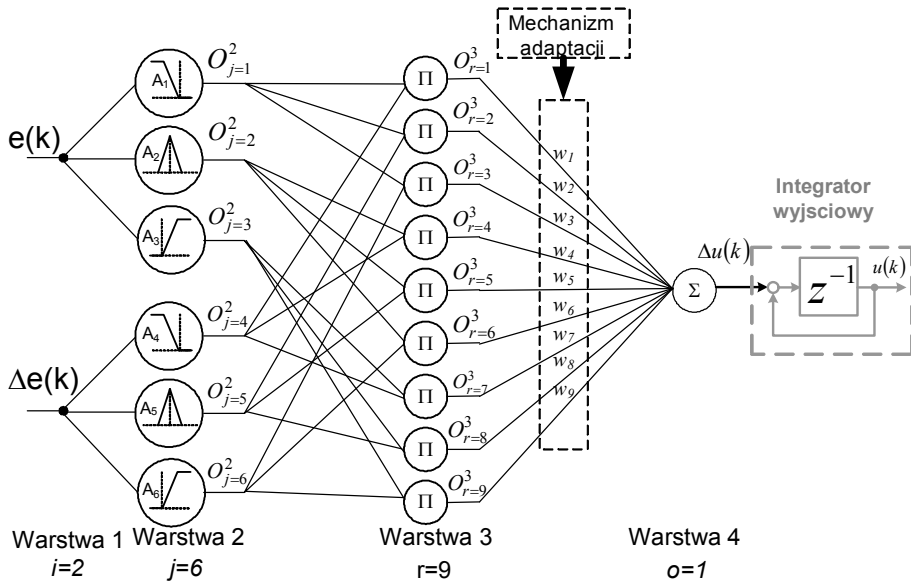


Rys. 2. Struktura sterowania DFOC z neuronowo-rozmytym regulatorem adaptacyjnym  
Fig. 2. Structure of adaptive speed control loop for the field oriented control of the IM drive with on-line tuned FL controller

W analizowanej strukturze klasyczny regulator PI znajdujący się w torze adaptacji prędkości kątowej zastąpiony został adaptacyjnym regulatorem neuronowo-rozmytym o 9, 25 i 49 regułach. Schemat ideowy takiego regulatora przedstawiono na rys. 3.

Widoczne są relacje pomiędzy błędem odtwarzania prędkości  $e(k)$ , zmianą błędu  $\Delta e(k)$  i sygnałami sterującymi  $\Delta u(k)$  lub  $u(k)$ .

Regulator ten jest układem typu PI jeżeli istnieje w nim integrator na wyjściu obiektu (zaznaczony przerywaną linią). W przypadku braku bloku całkowania jest to regulator typu PD [1], [2], [3], [4].



Rys. 3. Schemat ideowy regulatora neuronowo-rozmytego  
Fig. 3. A general structure of a fuzzy controller

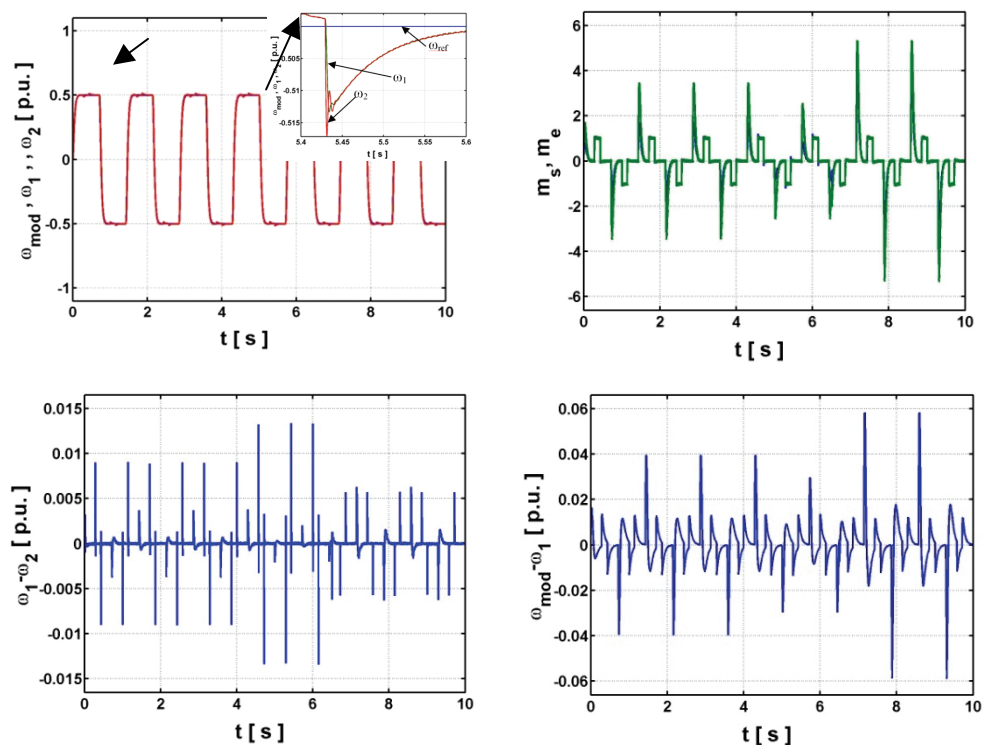
W niniejszej pracy wykorzystano regulator neuronowo-rozmyty, w którym wagi są dostrajana na podstawie błędu odtworzenia prędkości silnika indukcyjnego. Szczegółowo mechanizm ten opisano w [3].

### 3. BADANIA SYMULACYJNE

Jakość adaptacji prędkości kątowej do aktualnych warunków pracy zależy od prawidłowego doboru parametrów zarówno samego regulatora neuronowo-rozmytego jak i odpowiednich nastaw parametrów w torze adaptacji wag  $k_d$  i  $k_p$ . Zbyt duża wartość tych parametrów powoduje szybszy spadek błędu prędkości jednak zbyt duże wartości mogą doprowadzić do oscylacji o dużej częstotliwości a w skrajnym przypadku nawet do utraty stabilności napędu. Wartości te oszacowano za pomocą algorytmu genetycznego.

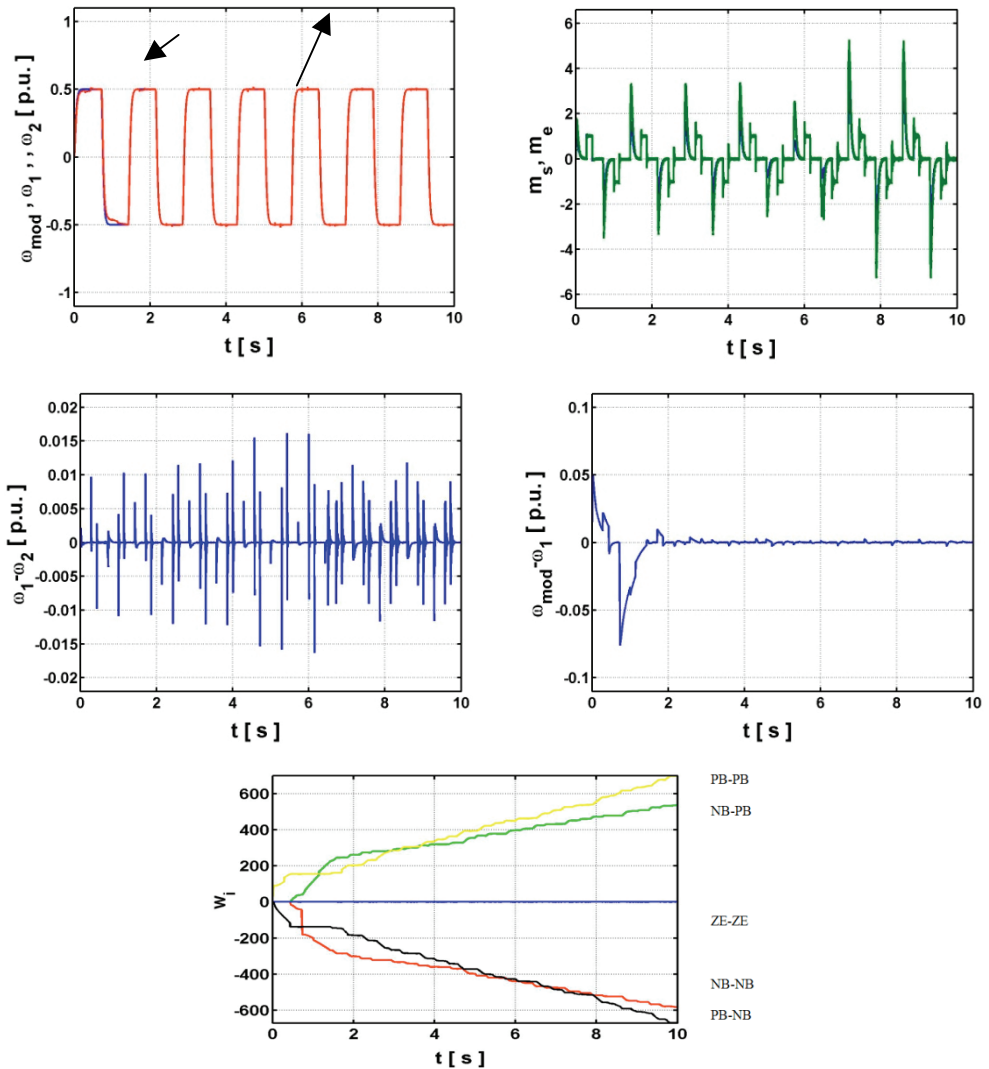
W celu poprawnej oceny jakości działania układu adaptacyjnego w pierwszej kolejności sprawdzono działanie klasycznego układu wektorowego sterowania polowozorientowanego z regulatorem liniowym typu PI. Wykonano testy zmian momentu bezwładności maszyny roboczej. Wyniki tych badań przedstawiono na rys. 4.

Aby ograniczyć wpływ ograniczeń momentu elektromagnetycznego badania przeprowadzono dla prędkości  $\omega_z = 0,5$ . Układ pracuje w trybie pracy nawrotnej. Strumień zadany został na stałym poziomie  $0,75 \Psi_m$  natomiast obciążenie zadawane było impulsowo.



Rys. 4. Wyniki badań symulacyjnych układu napędowego DFOC z regulatorem PI przy zmianach momentu bezwładności maszyny roboczej (dla  $t = 0 - 4,5$  sek.  $J_2 = J_{2N}$  dla  $t = 4,5 - 6,5$  sek.  $J_2 = 0,5 J_{2N}$  dla  $t = 6,5 - 10$  sek.  $J_2 = 2 J_{2N}$ )  
 Fig. 4. Simulation results of the DFOC with PI controller for different moment of inertia (for  $t = 0 - 4,5$  sek.  $J_2 = J_{2N}$  for  $t = 4,5 - 6,5$  sek.  $J_2 = 0,5 J_{2N}$  for  $t = 6,5 - 10$  sek.  $J_2 = 2 J_{2N}$ )

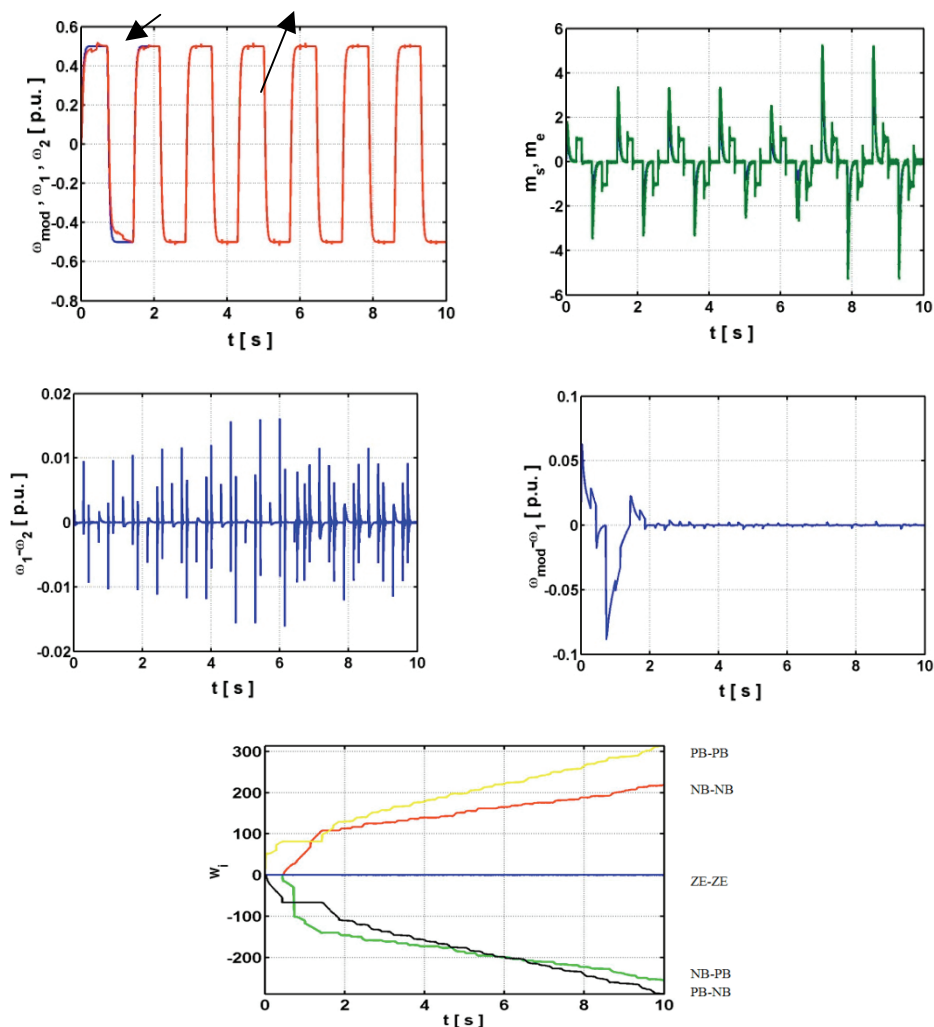
W dalszych rozważaniach zastosowane zostały regulatory rozmyte o różnej ilości reguł wnioskowania. W pierwszej kolejności przedstawiono wyniki dla układu z regulatorem neuronowo-rozmytym o 9 regułach (rys. 5). Układ regulatora adaptacyjnego zaczyna pracę z zerowymi wagami. Obserwuje się znaczne oscylacje w pierwszym okresie pracy, wynikają one z czasu potrzebnego na dopasowanie się wag do obiektu. Po około 3 okresach pracy układ regulacji dopasowuje się do zadanych warunków pracy i prędkość z bardzo dużą dokładnością podąża za prędkością modelu. Zmiany momentu bezwładności nie powodują znacznych zmian w jakości regulacji. Wzrasta moment elektromagnetyczny, moment skrętny, a różnica pomiędzy prędkością silnika i maszyny roboczej oscyluje wokół zera – inaczej niż to miało miejsce w przypadku układu z regulatorem PI.



Rys. 5. Wyniki badań symulacyjnych układu napędowego DFOC z adaptacyjnym regulatorem neuronowo-rozmytym o 9 regułach przy zmianach momentu bezwładności maszyny roboczej (dla  $t = 0-4,5$  sek.  $J_2 = J_{2N}$  dla  $t = 4,5-6,5$  sek.  $J_2 = 0,5 J_{2N}$  dla  $t = 6,5-10$  sek.  $J_2 = 2 J_{2N}$ )

Fig. 5. Simulation results of the DFOC with adaptive neuro fuzzy controller (9 rules) for different moment of inertia (for  $t = 0-4.5$  sek.  $J_2 = J_{2N}$  for  $t = 4.5-6.5$  sek.  $J_2 = 0.5 J_{2N}$  for  $t = 6.5-10$  sek.  $J_2 = 2 J_{2N}$ )

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono analogiczne badania dla układu wektorowego sterowania SI z regulatorem neuronowo rozmytym o 25 i 49 regułach. Trajektoria zmian prędkości i momentu oraz zmiany momentu bezwładności były takie same jak w poprzednich badaniach.

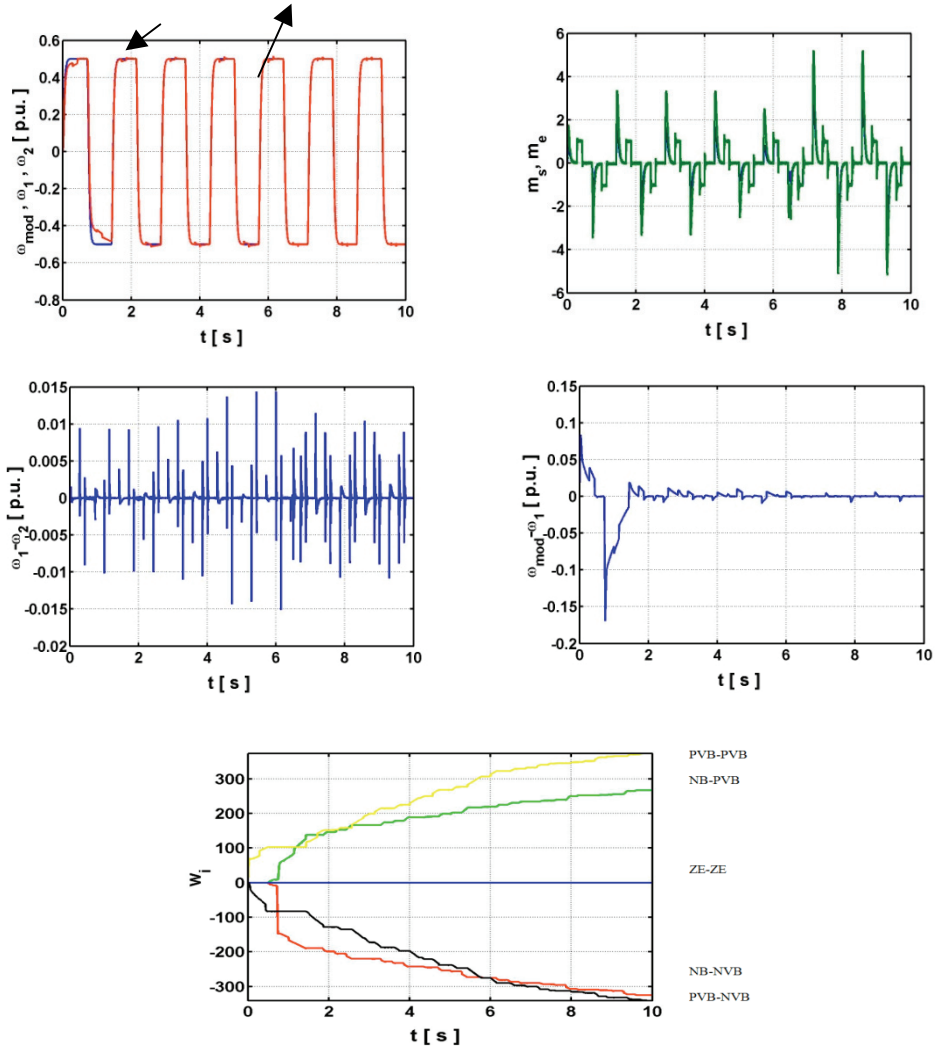


Rys. 6. Wyniki badań symulacyjnych układu napędowego DFOC z adaptacyjnym regulatorem neuronowo-rozmytym o 25 regułach przy zmianach momentu bezwładności maszyny roboczej roboczej (dla  $t = 0-4,5$  sek.  $J_2 = J_{2N}$  dla  $t = 4,5-6,5$  sek.  $J_2 = 0,5 J_{2N}$  dla  $t = 6,5-10$  sek.  $J_2 = 2 J_{2N}$ )

Fig. 6. Simulation results of the DFOC with adaptive neuro fuzzy controller (25 rules) for different moment of inertia (for  $t = 0-4.5$  sek.  $J_2 = J_{2N}$  for  $t = 4.5-6.5$  sek.  $J_2 = 0.5 J_{2N}$  for  $t = 6.5-10$  sek.  $J_2 = 2 J_{2N}$ )

Zarówno układ sterowania z 25 regułami, jak i ten z 49 regułami adaptuje się precyzyjnie do aktualnych warunków pracy. Zmiany momentu bezwładności maszyny roboczej w żadnym przypadku nie powodują utraty stabilności napędu. Błędy pomiędzy prędkością modelu a silnika oscylują wokół zera. Moment niezbędny do prawidłowego działania napędu wzrasta. Wagi regulatora zmieniają się od wartości zero do

wartości przy których działanie układu jest optymalne (przedstawiono tylko wybrane wagi).



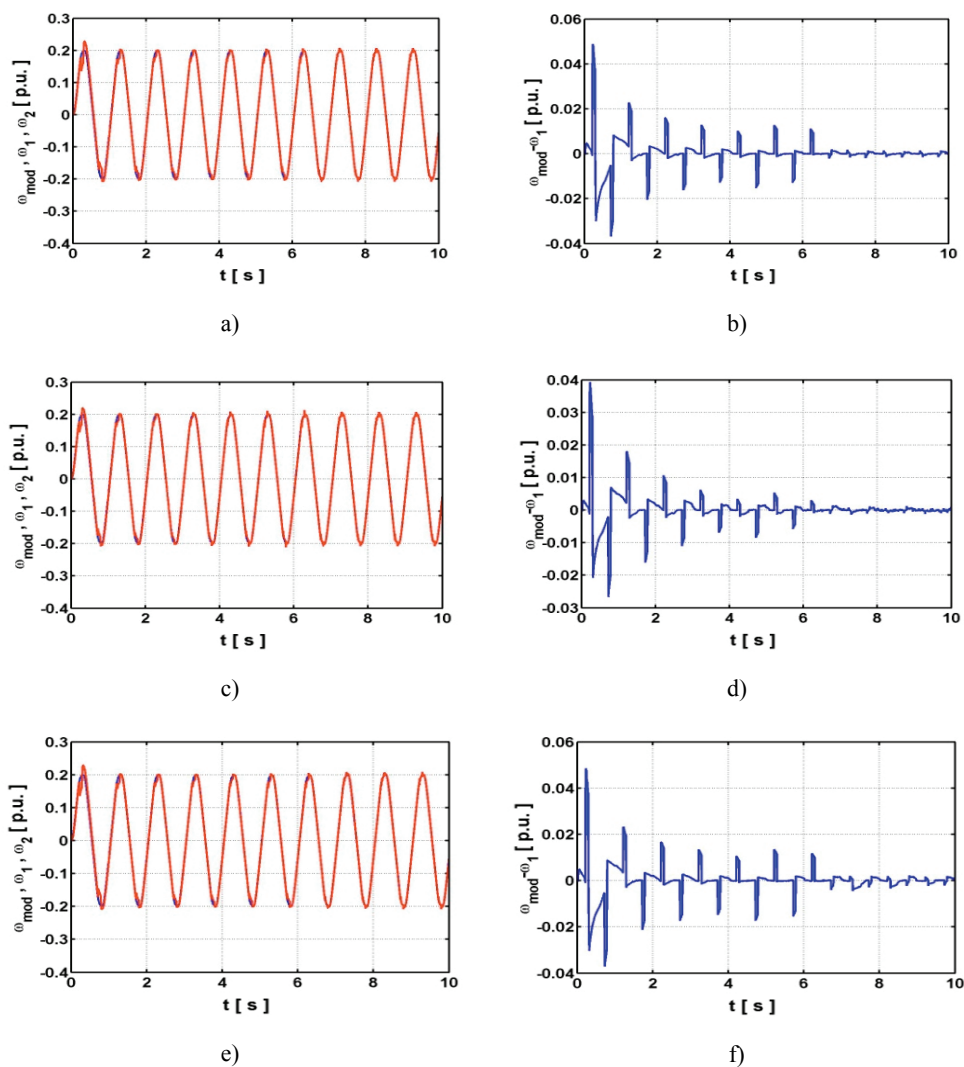
Rys. 7. Wyniki badań symulacyjnych układu napędowego DFOC z adaptacyjnym regulatorem neuronowo-rozmytym o 49 regułach przy zmianach momentu bezwładności maszyny roboczej (dla  $t = 0-4,5$  sek.  $J_2 = J_{2N}$  dla  $t = 4,5-6,5$  sek.  $J_2 = 0,5 J_{2N}$  dla  $t = 6,5-10$  sek.  $J_2 = 2 J_{2N}$ )

Fig. 7. Simulation results of the DFOC with adaptive neuro fuzzy controller (49 rules) for different moment of inertia (for  $t = 0-4.5$  sek.  $J_2 = J_{2N}$  for  $t = 4.5-6.5$  sek.  $J_2 = 0.5 J_{2N}$  for  $t = 6.5-10$  sek.  $J_2 = 2 J_{2N}$ )

Porównano działanie regulatorów adaptacyjnych w innych warunkach pracy to jest przy innych zadanych trajektoriach. Wyniki przedstawiono na rys. 8.



Na rysunku 8 przedstawiono przykład gdy napęd pracuje przy sinusoidalnym wymuszeniu prędkości kątovej o amplitudzie 1 i częstotliwości 0,7 Hz. Na przebiegach przedstawiono odpowiednio prędkości modelu odniesienia, maszyny roboczej oraz silnika napędowego oraz różnicę prędkości pomiędzy modelem odniesienia a prędkością maszyny napędzającej dla układu sterowania z adaptacyjnym regulatorem rozmytym o 9 (a, b) 25(c, d) oraz 49(e, f) regułach.



Rys. 8. Porównanie regulatorów o 9,25 oraz 49 regułach przy zadanej trajektorii w kształcie rampy  
 Fig. 8. Comparison of regulators with rules 9.25 and 49 at ramp shaped trajectory

#### 4. PODSUMOWANIE

W niniejszej pracy przedstawiono analizę pracy układu napędowego z silnikiem indukcyjnym połączonym z maszyną roboczą za pomocą elastycznego wału. Do kompensacji momentu skrętnego wykorzystano adaptacyjne regulatory neuronowo Rozmyte o 9, 25 i 49 regułach. Wszystkie przebadane układy miały zerowe wagi, przez co w pierwszym okresie były znaczne różnice między wartością zadaną a mierzoną. Badania wykazały, że dobór regulatora ma wpływ nie tylko na prędkość maszyny roboczej ale także na różnicę pomiędzy prędkością maszyny napędzającej oraz roboczej. W przypadku regulatorów rozmytych dla momentu bezwładności  $J = 0,5 J_n$  różnica prędkości maszyny roboczej i napędzającej jest większa niż w przypadku  $J = J_n$  i  $J = 2 J_n$ . Wynika to z większej dynamiki sterowania.

Adaptacyjna struktura sterowania pozwala na efektywne tłumienie wpływu połączenia sprężystego. Osiągane wartości wag dla regulatora o 9 regułach są niemalże dwukrotnie większe niż dla regulatorów o 25 i 49 regułach.

#### LITERATURA

- [1] ORŁOWSKA-KOWALSKA T., DYBKOWSKI M., SZABAT K., *Adaptive neuro-fuzzy control of the sensorless induction motor drive system*, 12th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC, 2006, 1836–1841.
- [2] YAGER R.R., FILEV D.P., *Essentials of Fuzzy Modeling and Control*, Wiley, 1994.
- [3] 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.
- [4] ZHANG G., FURUSHO J., *Speed Control of Two-Inertia System by PI/PID Control*, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2000, Vol. 47, No. 3, 603–609.
- [5] 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, 162–168.
- [6] LIN F.J., FUNG R.F., WAI R.J., *Comparison of Sliding-Mode and Fuzzy Neural Network Control for Motor-Toggle Servomechanism*, IEEE Trans. on Mechatronics, 1998, Vol. 3, No. 4, 302–318.

#### ADAPTATIVE VECTOR CONTROL DRIVE SYSTEM WITH ELASTIC JOINT

In the paper the analysis of vector controlled induction motor DRFOC elastic joint control system is described. The standard PI-controller in speed control loop has been replaced by the adaptive neuro-fuzzy controller with 9, 25 and 49 rules, which allows complete adaptation to current work state. The impact of the number of rules on the quality of the adaptation was tested, while moment of inertia was changed.