

*regulator neuronowo-rozmyty, warstwa Petriego,  
warstwa Tranzycji, prędkości ultra niskie*

Piotr DERUGO\*, Marcin PAWLAK\*

## **REGULATOR NEURONOWO-ROZMYTY Z WARSTWĄ TRANZYCJI W STEROWANIU SILNIKIEM PRĄDU STAŁEGO W ZAKRESIE PRĘDKOŚCI ULTRA NISKICH – WERYFIKACJA EKSPERYMENTALNA**

Głównym celem artykułu jest weryfikacja eksperymentalna możliwości wykorzystania regulatorów neuronowo-rozmytych do sterowania złożonym układem napędowym w zakresie prędkości niskich i ultra niskich. Artykuł jest uzupełnieniem i podsumowaniem wcześniejszych prac. Jako obiekt badawczy wybrano układ napędowy z dwoma silnikami prądu stałego. Silnik napędowy sterowany jest w strukturze kaskadowej. Zaproponowane układy regulatorów neuronowo-rozmytych użyto w nadrzędnej pętli sterowania prędkością napędu. Silniki połączono wałem sprężystym, otrzymując tym samym układ dwumasowy. W badaniach przebadano wpływ warstwy tranzycji na adaptacyjne regulatory neuronowo-rozmyte typu PD oraz PID. W początkowych rozdziałach przedstawiono adaptacyjny regulator neuronowo-rozmyty z warstwą tranzycji. Opisana została idea warstwy tranzycji, a także jej pozycja w układzie regulatora. Następnie opisano analizowane regulatory, dla których kolejno przeprowadzono analizę wpływu nastaw algorytmu adaptacji na wartości kryteriów jakości regulacji. Kolejno zaprezentowano przebiegi eksperymentalne potwierdzające możliwość stosowania układów regulacji prędkości z adaptacyjnymi regulatorami neuronowo-rozmytymi w zakresie prędkości ultra niskich. Ostatni rozdział zawiera podsumowanie oraz wnioski.

### 1. WSTĘP

W wielu zastosowaniach napędowych koniecznym jest precyzyjna kontrola napędu w zakresie prędkości niskich i ultra niskich [1]. Niestety w zakresie prędkości niskich i ultra niskich pojawiają się między innymi problemy wynikające ze znacznego wpływu tarcia czy też elastyczności połączenia na przebieg procesu. Zjawisko, które przy

---

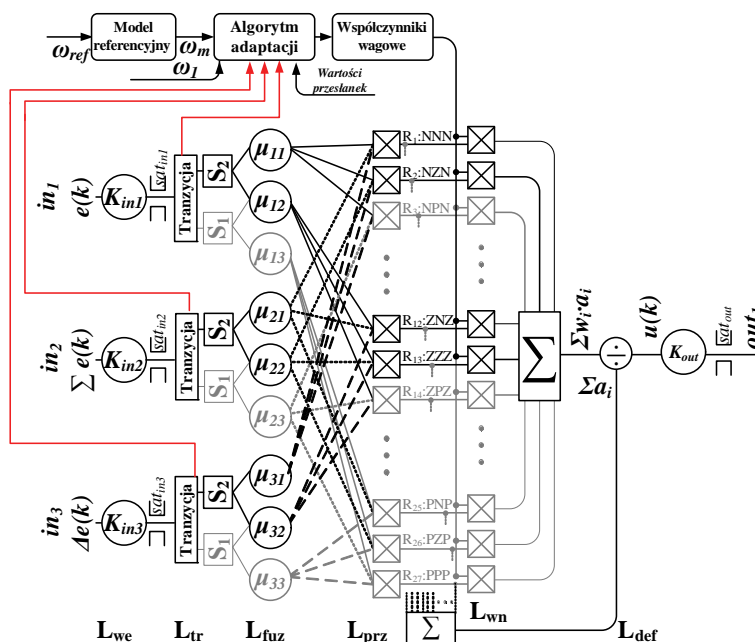
\* Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: piotr.derugo@pwr.edu.pl, marcin.pawlak@pwr.edu.pl

znacznych prędkościach może być pomijalne, w zakresie prędkości bliskich zeru zaczyna być istotne. Drugim z ważnych problemów jest prawidłowy pomiar prędkości, w przypadku cyfrowych układów pomiarowych wykorzystujących enkodery, w zakresie prędkości ultra niskich pojedyncze impulsy mają znaczny wpływ na odczytaną wartość prędkości. Istnieją w literaturze prace zajmujące się sterowaniem napędami z uwzględnieniem elastyczności połączenia i tarcia [9], czy też w zakresie prędkości ultra niskich [7], [8].

Niniejsza praca ma na celu przebadanie możliwości wykorzystania regulatora neuronowo-rozmytego z warstwą tranzycji Petriego w sterowaniu układem napędowym w zakresie prędkości ultra niskich. Jest kontynuacją i uzupełnieniem o weryfikację eksperymentalną wcześniejszych prac nad wykorzystaniem regulatorów neuronowo-rozmytych w zakresie prędkości niskich i ultra niskich.

## 2. ADAPTACYJNY REGULATOR NEURONOWO-ROZMYTY Z WARSTWĄ TRANZycji PETRIEGO

Na rysunku 1 zaprezentowano schemat regulatora neuronowo-rozmytego typu PID o trzech funkcjach przynależności na wejście z warstwą tranzycji.



Rys. 1. Adaptacyjny regulator neuronowo-rozmyty PID o trzech funkcjach przynależności przyporządkowanych każdemu z trzech wejść, z warstwą tranzycji

W zaprezentowanym przypadku pokazano 3 funkcje przynależności na każde z trzech wejść, podczas badań wykorzystano regulatory o dwóch wejściach (PD) oraz trzech wejściach (PID) z 3, 5, 7 oraz 9 funkcjami przynależności na każde z wejść. Modyfikacje te są łatwe do wyobrażenia, w przypadku regulatorów typu PD w stosunku do PID należy jedynie usunąć tor I odpowiadający za wejście sygnału całki, oraz odpowiadające mu funkcje przynależności, a dalej reguły.

Sygnalami wejściowymi regulatora są kolejno uchyb sterowania, jego pochodna oraz całka. Uchyb sterowania rozumiany jest, jako różnica pomiędzy sygnałem referencyjnym oraz mierzonym. Zastosowanie trzech wejść wynika z chęci uzyskania poprawy jakości sterowania zarówno w stanach statycznych jak i dynamicznych. Zaproponowany neuronowo-rozmyty system wnioskowania składa się z 6 warstw. Rysunek 1 przedstawia schemat użytego regulatora o  $m = 3$  funkcji przynależności dla każdego z  $n = 3$  wejść, co skutkuje istnieniem  $3^3$  reguł w bazie.

W warstwie pierwszej następuje normalizacja sygnałów wejściowych. Sygnały wejściowe są skalowane oraz ograniczane do rozważanej przestrzeni sterowań.

$$L_{we\_out\_n} = \min(\max((in_n \cdot K_{in_n}), -1), 1) = L_{tr\_in\_n} \quad (1)$$

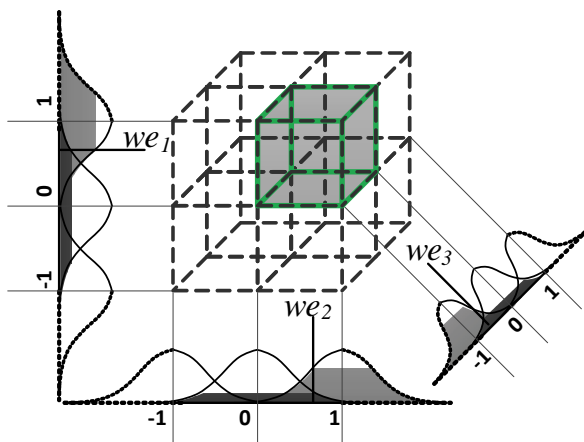
Wprowadzenie Warstwy Tranzycji pozwalającej na wybór sektora zostało poddyktowane chęcią zmniejszenia złożoności numerycznej algorytmu przy jednoczesnym zastosowaniu znacznej liczby reguł. Na rys. 2. pokazano przykładową przestrzeń sterowania i następstwa zastosowania WT dla systemu neuronowo-rozmytego o trzech wejściach i trzech gaussowskich funkcjach przynależności dla każdego z wejść. W przypadku gaussowskich funkcji przynależności w dowolnej chwili czasowej dla dowolnej wartości sygnału wejściowego standardowo każda z funkcji przynależności przyjmowałaby niezerową wartość aktywacji. W przypadku wykorzystania WT jedynie dwie z trzech funkcji przynależności dla danego wejścia są aktywne, pozostałe są natomiast zerowane. Zasada działania WT została szerzej opisana w [5], [6]. W przypadku rozważania trzech równomiernie rozłożonych funkcji przynależności na wejście i przestrzeni zmiennej normowanej do zakresu  $\pm 1$ , funkcja odpowiedzialna za odwrotny znak niż aktualny znak sygnału wejściowego będzie minimalnie aktywna. Zgadza się to z intuicją, nie ma bowiem sensu rozważać ujemnej półpłaszczyzny sterowań dla przypadku dodatniej wartości wejściowej.

Takie podejście pozwala dla przypadku regulatora o 3 regułach na każde wejście w każdej chwili czasowej rozważać jedynie 1/8 całej przestrzeni sterowań. Dalej w każdym kroku obliczeniowym rozważanych jest jedynie 8 ( $2^3$ ) z pośród 27 ( $3^3$ ) reguł. W przypadku regulatora o większej liczbie funkcji przynależności stosunek ten jeszcze bardziej się zmniejsza, przykładowo dla 5 funkcji na wejście rozważanych jest jedynie 8 ( $2^3$ ) z pośród 125 ( $5^3$ ) reguł.

Warstwa trzecia to warstwa rozmywania. Na podstawie przeskalowanych sygnałów wejściowych wyznaczane są poziomy aktywacji poszczególnych funkcji przynależności. Dla przejrzystości ograniczono się do przypadku układu o  $j2 = 3$  regułach

przynależności na każde z wejść. Reguły przynależności zdefiniowano jako  $\mu_{j1j2}$  gdzie  $j1$  to numer wejścia jakiemu jest przyporządkowana dana reguła, natomiast  $j2$  to numer funkcji w danym  $m$  licznym zestawie przyporządkowanym każdemu z  $n$  wejść.

$$(L_{fuz\_out})_{j1j2} = (\mu_{j1j2}(L_{fuz\_in\_j1})) = (L_{prz\_in})_{j1j2} \quad (2)$$



Rys. 2. Przestrzeń sterowań dla 3 wejść i funkcji gaussowskich

Warstwa czwarta to warstwa wyznaczania poziomów aktywacji przesłanek poszczególnych reguł. W niniejszym przypadku wykorzystana została jedna z najpopularniejszych  $T$ -norma typu *product*. Odpowiada to rozwiązaniu znanemu z regulatorów typu TSK gdzie  $R_n = f(\mu_{i1j1}, \mu_{i2j2})$ .

$$(L_{prz\_out})_{\substack{z1,y1, \\ z2,y2, \\ z3,y3}} = (\mu_{j1j2} \Big|_{\substack{j1=z1 \\ j2=y1}} \cdot \mu_{j1j2} \Big|_{\substack{j1=z2 \\ j2=y2}} \cdot \mu_{j1j2} \Big|_{\substack{j1=z3 \\ j2=y3}}) = (L_{wn\_in})_{\substack{z1,y1, \\ z2,y2, \\ z3,y3}} \quad (3)$$

Przy czym współrzędne  $z1$ ,  $z2$  oraz  $z3$  odpowiadające numerom wejść systemu wnioskowania nie mogą być sobie równe ( $z1 = 1$ ,  $z2 = 2$ ,  $z3 = 3$ ) natomiast zmienne  $y1$ ,  $y2$  odpowiadające numerom funkcji przynależności mogą przyjmować dowolne wartości z dostępnego zakresu.

W warstwie piątej następuje aplikacja współczynników wagowych zgodnie ze wzorem (4).

$$(L_{wn\_out})_{\substack{z1,y1, \\ z2,y2, \\ z3,y3}} = (L_{4in\_z1,y1,z2,y2,z3,y3} \cdot w_{y1,y2,y3}) = (L_{def\_in})_{\substack{z1,y1, \\ z2,y2, \\ z3,y3}} \quad (4)$$

Jak widać jedynie drugie współrzędne funkcji przynależności, mówiące o ich numerze w konkretnym zestawie funkcji przynależących kolejnym wejściom, są potrzebne do zidentyfikowania odpowiedniego współczynnika wagowego.

Ostatnią warstwą dającą się wyróżnić w strukturze regulatora jest warstwa wnioskowania (defuzyfikacji). Zastosowano tu blok sumowania oraz bloki dzielenia oraz saturacji.

$$out_1 = L_{def\_out} = \min \left( \max \left( \left( \frac{\sum_{i=1...n} (L_{4\_out})}{\sum_{j=1...m} (L_{3\_out})} \cdot K_{out} \right), -sat_{out} \right), sat_{out} \right) \quad (5)$$

Algorytm adaptacji współczynników wagowych opisuje równanie (6):

$$w_{j_1 j_2 j_3}(k+1) = w_{j_1 j_2 j_3}(k) + R_{j_1 j_2 j_3} \cdot \gamma(e(k)) \quad (6)$$

gdzie:  $R_{j_1 j_2 j_3}$  – wartość aktywacji reguły,  $\gamma$  – współczynnik uczenia,  $e$  – błąd śledzenia modelu ( $e = \omega_{modelu} - \omega_{silnika}$ ). Współczynnik uczenia bazuje na wartości błędu śledzenia modelu oraz jego pochodnej.

$$\gamma(e_m(t)) = (AD_P e(t) + AD_D \Delta e(t)) \quad (7)$$

Model referencyjny zdefiniowano jako obiekt oscylacyjny drugiego rzędu [3]:

$$G(s) = \omega_r^2 / (s^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_r \cdot s + \omega_r^2) \quad (8)$$

gdzie  $\omega_r$  – pulsacja rezonansowa,  $\xi$  – współczynnik tłumienia.

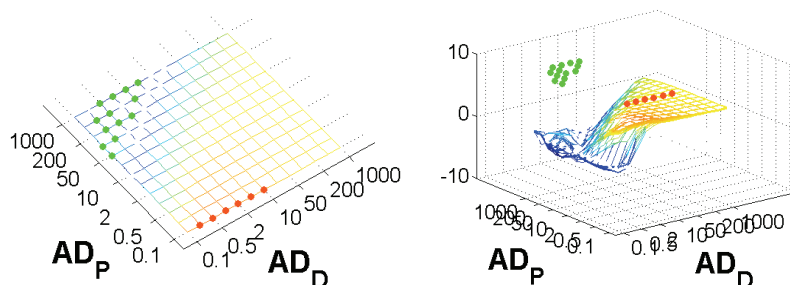
### 3. SIATKI NASTAW ORAZ WYNIKI OPTYMALIZACJI NASTAW ARNR Z WTP DLA PRĘDKOŚCI ULTRANISKICH

Chcąc sprawdzić czy zakres działania obiektu ma wpływ na optymalne wartości nastaw postanowiono przeprowadzić serie badań optymalizacyjnych dla przypadków trajektorii o różnych amplitudach, dla różnych regulatorów.

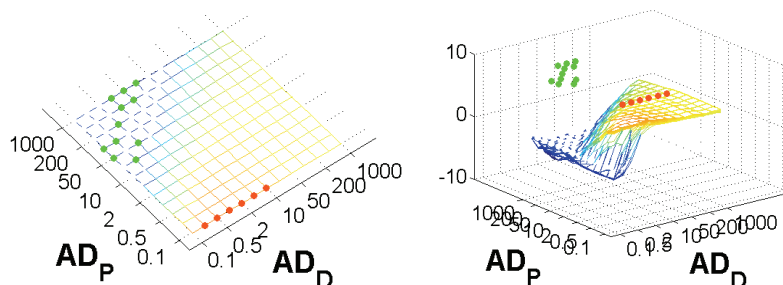
Jak wiadomo, zmiana amplitudy wymuszenia powoduje zmianę zakresu wartości zmiennych jakie mogą pojawić się na wejściu regulatora. Trajektoria badawcza charakteryzuje się dynamicznymi skokowymi zmianami prędkości referencyjnej z częstotliwością 0,25 Hz. Moment obciążenia załączany jest w sposób okresowy. Nawroty odbywają się bez obciążenia. Badaniu poddano 16 przypadków regulatorów neuronowo rozmytych o różnej liczbie funkcji przynależności na każde z wejść. Rozważano przypadki regulatorów o dwóch (PD) oraz trzech (PID) wejściach, oraz wpływ implementacji Warstwy Tranzycji.

Na rysunkach 3–5 zaprezentowano ogólne siatki wpływu nastaw adaptacji na wartości kryteriów jakości sterowania. Dla każdego z regulatorów z tabeli 1. Przeprowadzono serie badań symulacyjnych mających na celu określenie wartości wskaźnika jakości sterowania (ISE) w funkcji wartości współczynników adaptacji. Zdecydowano

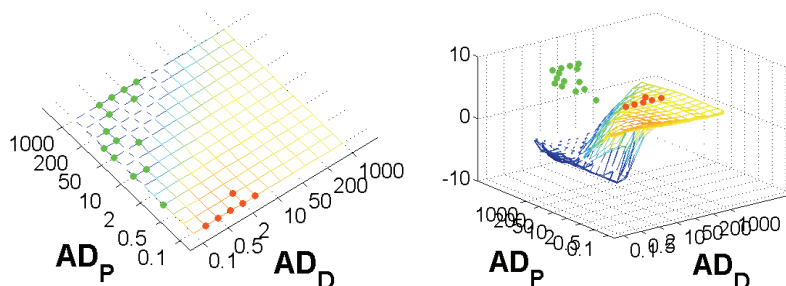
się na trzy amplitudy dla zaproponowanej trajektorii  $0,2 \omega_n$ ,  $0,01 \omega_n$  oraz  $1/(100 \pi) \omega_n$ . Za pomocą kropek oznaczono najmniejsze (zielone) oraz największe (czerwone) używane wartości kryteriów. W celu poprawy czytelności zdecydowano się na skalę logarymiczną dla osi  $z$  (wartości kryterium). Porównując powierzchnie wynikowe można stwierdzić, iż zakres sygnału wejściowego, będący następstwem amplitudy sygnału zadanego nie ma znacznego wpływu na obszar nastaw współczynników adaptacji skutkując najmniejszymi wartościami kryterium jakości sterowania.



Rys. 3. Siatka wartości  $\log[ISE(e_{\omega_1})]$  w funkcji wartości współczynników adaptacji dla przypadku trajektorii o amplitudzie  $0.2 \omega_n$



Rys. 4. Siatka wartości  $\log[ISE(e_{\omega_1})]$  w funkcji wartości współczynników adaptacji dla przypadku trajektorii o amplitudzie  $0.01 \omega_n$



Rys. 5. Siatka wartości  $\log[ISE(e_{\omega_1})]$  w funkcji wartości współczynników adaptacji dla przypadku trajektorii o amplitudzie  $1/(100 \pi) \omega_n$

Tabela 1 Wyniki optymalizacji nastaw adaptacji poszczególnych regulatorów

Lp.	$AD_P$	$AD_D$	ISE	Typ	WT	L. Fp. / We
1	499,98	0,532	0,176	PD	NIE	3
2	547,98	0,750	0,182			5
3	710,00	3,750	0,183			7
4	500,00	0,500	0,478			9
5	564,00	0,719	0,174	PID		3
6	495,75	0,633	0,181			5
7	660,00	0,656	0,238			7
8	821,00	0,258	0,184			9
9	756,20	1,000	0,171	PD	TAK	3
10	645,38	0,875	0,200			5
11	503,94	0,238	0,189			7
12	758,00	4,000	0,222			9
13	499,98	0,500	<b>0,168</b>	PID		3
14	628,09	3,002	0,186			5
15	596,50	0,283	0,181			7
16	913,31	4,998	0,219			9

Co istotne, analizując wyniki można wysunąć wnioski o zależności pomiędzy współczynnikami adaptacji, aby osiągnąć dobrą jakość sterowania, współczynnik proporcjonalny ( $AD_P$ ) powinien być większy niż współczynnik dla pochodnej ( $AD_D$ ).

Następnie przeprowadzono optymalizację nastaw algorytmu adaptacji za pomocą metody Pattern Search dla przypadku trajektorii o amplitudzie 0,2  $\omega_n$ . Zestawienie tych przypadków pokazuje tabela 1.

Podczas jej analizy widać, iż fakt wprowadzenia Warstwy Tranzycji w pewnych przypadkach skutkuje poprawą wartości kryterium jakości sterowania ISE. Co ważne implementacja WT pozwala jednocześnie na ograniczenie złożoności obliczeniowej, a tym samym implementację regulatorów o większej liczbie reguł bez znaczącego zwiększania obciążenia mikroprocesora.

Najmniejszą wartość kryterium ISE uzyskano dla przypadku regulatora typu PID z Warstwą Tranzycji o 3 funkcjach przynależności na każde z wejść.

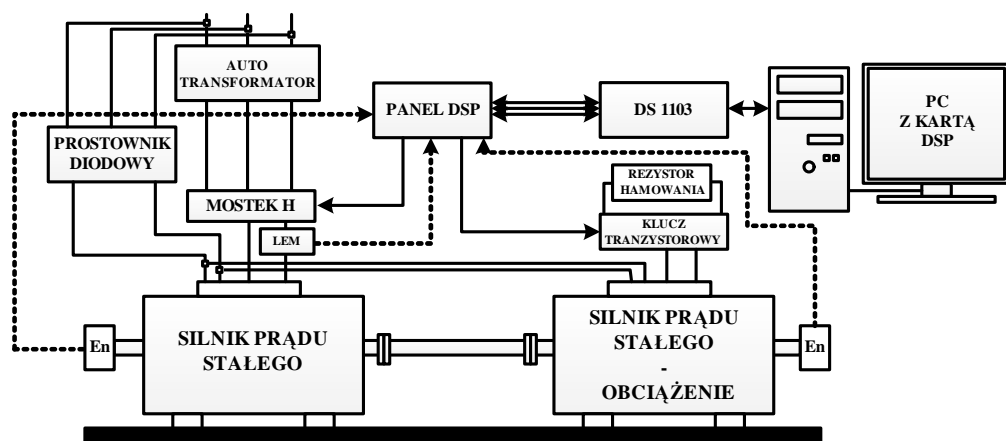
#### 4. EKSPERYMENTY NA STANOWISKU LABORATORYJNYM

Na rysunku 6. przedstawiony został schemat poglądowy układu eksperymentalnego z silnikami prądu stałego. Układ sterowania został zaimplementowany z użyciem pakietu Matlab-Simulink we współpracy z kartą do szybkiego prototypowania DSpace

DS1103. Układ mechaniczny składa się z dwóch silników prądu stałego połączonych wałem sprzężystym. Zasilanie silnika odbywa się poprzez mostek H natomiast regulacja obciążenia odbywa się za pomocą klucza tranzystorowego. Wielkościami mierzonymi są prędkości silnika oraz obciążenia, a także prąd twornika maszyny roboczej. Prąd wzbudzenia jest stały i jednakowy dla obu maszyn.

Istotnym problemem w układzie rzeczywistym prócz tarcia jest fakt pomiaru prędkości za pomocą enkodera. Dokładność takiego pomiaru jest znacznie niższa w przypadku prędkości niskich i ultra niskich.

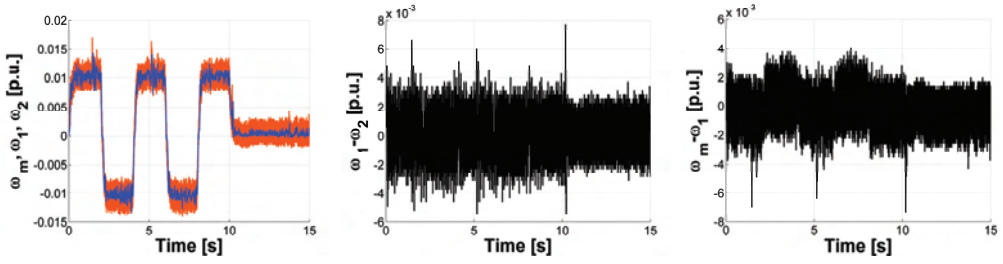
Wyniki eksperymentalne zaprezentowano na rys. 7–18. Rysunki te prezentują przebiegi wybranych zmiennych stanu, są to kolejno przebieg prędkości modelu ( $\omega_m$ ), prędkości maszyny napędzającej ( $\omega_1$ ) oraz maszyny obciążającej ( $\omega_2$ ). Różnica pomiędzy prędkością maszyny napędzającej, a obciążenia. Różnica pomiędzy prędkością modelu referencyjnego, a prędkością maszyny napędzającej. Jako trajektorie badawcze na potrzeby badań eksperymentalnych zastosowano trajektorie nawrotne. Nawroty odbywały się z częstotliwością 0,25 Hz, a ich amplituda wynosiła odpowiednio 0,01, oraz 0,02  $\omega_n$  (przy prędkości znamionowej 1450 obr/min). Obciążenie było załączane okresowo. Do pomiaru prędkości zastosowano enkodery o 36000 impulsach na obrót. Niestety nawet tak znaczna liczba impulsów na obrót, przy prędkościach ultra niskich nie jest w stanie uchronić przed obniżoną dokładnością pomiaru.



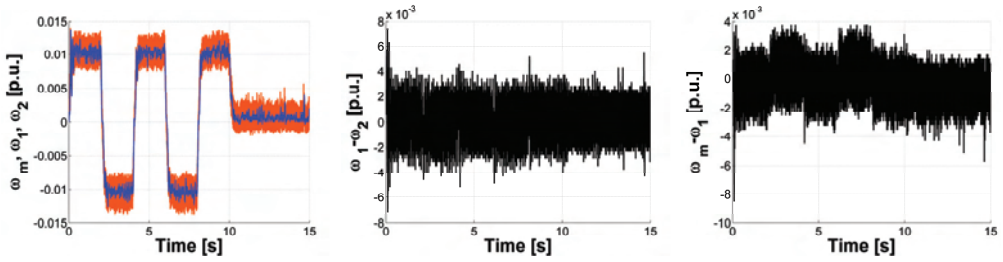
Rys. 6. Schemat poglądowy układu eksperymentalnego z silnikami prądu stałego

Kolorem niebieskim oznaczono prędkość silnika obciążającego, a czerwonym silnika napędzającego. Jak widać obie te prędkości są zaszumione, co wynika w dużej mierze z błędów pomiarowych. Jednocześnie widocznym jest prawidłowe odtwarzanie prędkości modelu przez obiekt.

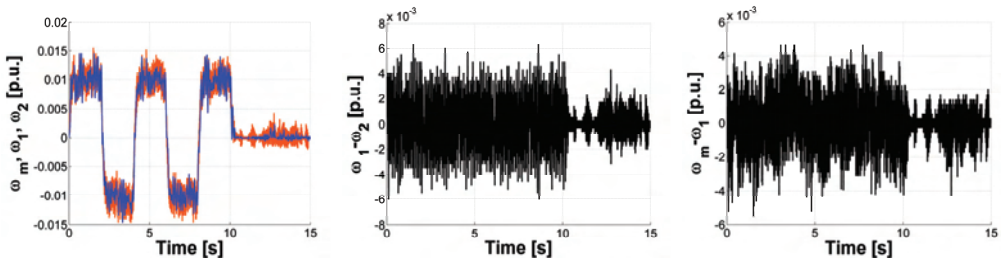




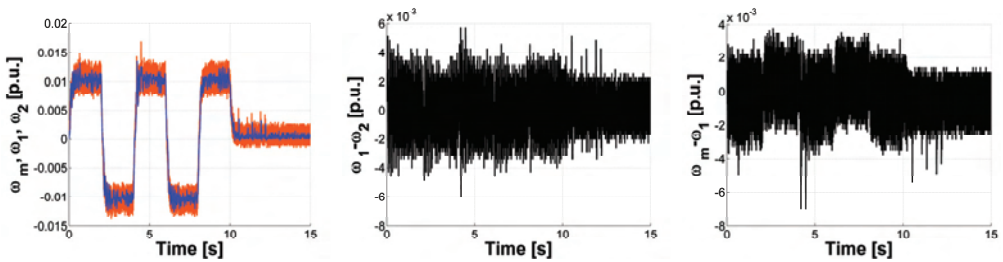
Rys. 7. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla przypadku trajektorii nawrotnej o amplitudzie  $0,01 \omega_n$ , w układzie wykorzystano regulator PD o 3 funkcjach na wejście



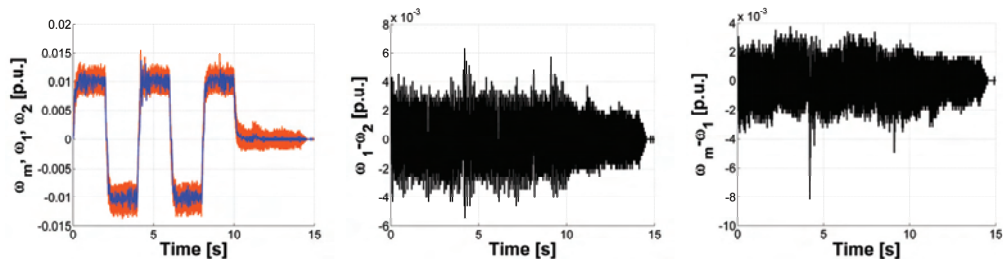
Rys. 8. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla przypadku trajektorii nawrotnej o amplitudzie  $0,01 \omega_n$ , w układzie wykorzystano regulator PD o 3 funkcjach na wejście z Warstwą Tranzycji Petriego



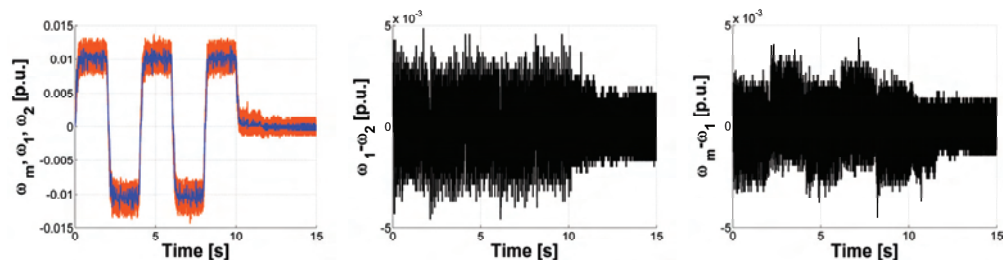
Rys. 9. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla przypadku trajektorii nawrotnej o amplitudzie  $0,01 \omega_n$ , w układzie wykorzystano regulator PID o 3 funkcjach na wejście



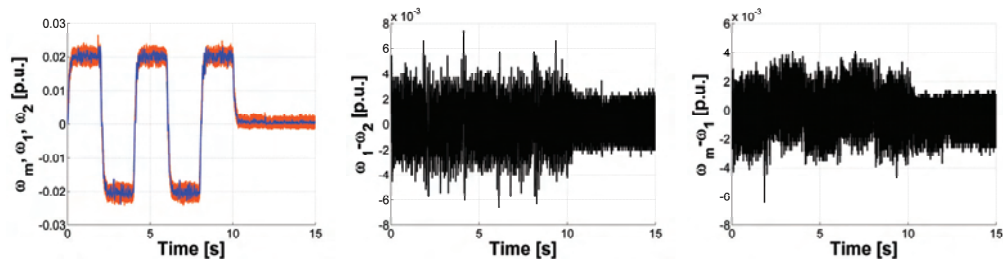
Rys. 10. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla przypadku trajektorii nawrotnej o amplitudzie  $0,01 \omega_n$ , w układzie wykorzystano regulator PID o 3 funkcjach na wejście z Warstwą Tranzycji Petriego



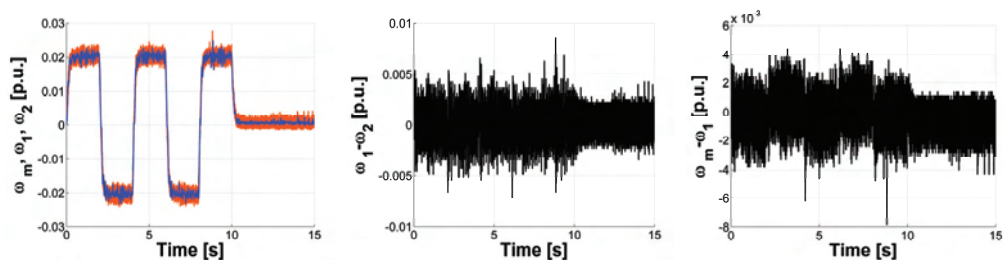
Rys. 11. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla przypadku trajektorii nawrotnej o amplitudzie 0,01  $\omega_n$ , w układzie wykorzystano regulator PD o 5 funkcjach na wejście



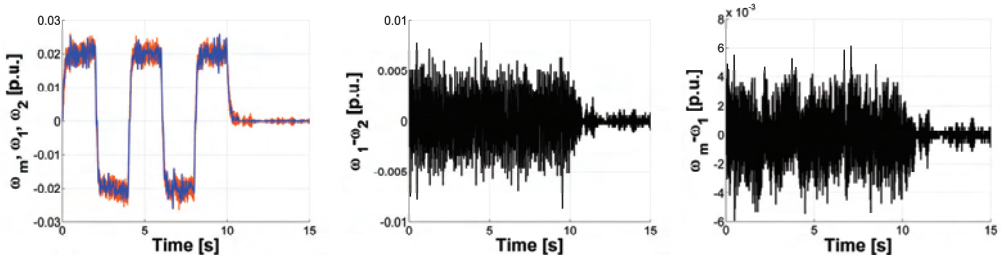
Rys. 12. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla przypadku trajektorii nawrotnej o amplitudzie 0,01  $\omega_n$ , w układzie wykorzystano regulator PD o 5 funkcjach na wejście z Warstwą Tranzykcji Petriego



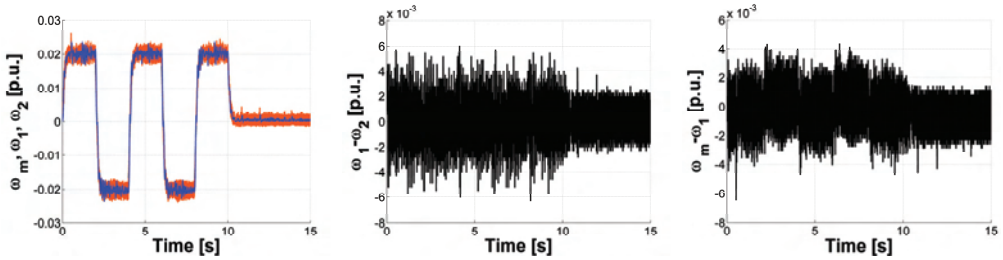
Rys. 13. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla przypadku trajektorii nawrotnej o amplitudzie 0,02  $\omega_n$ , w układzie wykorzystano regulator PD o 3 funkcjach na wejście



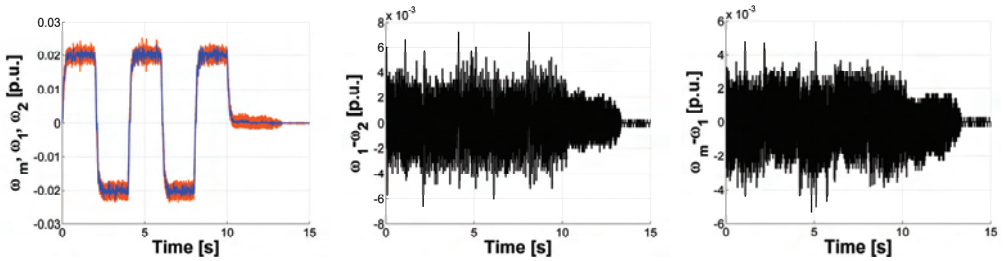
Rys. 14. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla przypadku trajektorii nawrotnej o amplitudzie 0,02  $\omega_n$ , w układzie wykorzystano regulator PD o 3 funkcjach na wejście z Warstwą Tranzykcji Petriego



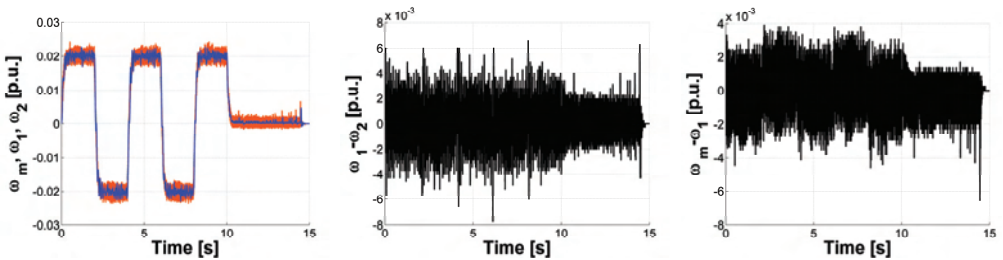
Rys. 15. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla przypadku trajektorii nawrotnej o amplitudzie  $0,02 \omega_n$ , w układzie wykorzystano regulator PID o 3 funkcjach na wejście



Rys. 16. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla przypadku trajektorii nawrotnej o amplitudzie  $0,02 \omega_n$ , w układzie wykorzystano regulator PID o 3 funkcjach na wejście z Warstwą Tranzyjacji Petriego



Rys. 17. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla przypadku trajektorii nawrotnej o amplitudzie  $0,02 \omega_n$ , w układzie wykorzystano regulator PD o 5 funkcjach na wejście



Rys. 18. Przebiegi wybranych zmiennych stanu dla przypadku trajektorii nawrotnej o amplitudzie  $0,02 \omega_n$ , w układzie wykorzystano regulator PD o 5 funkcjach na wejście z Warstwą Tranzyjacji Petriego

## 5. WNIOSKI I PODSUMOWANIE

W dokumencie opisano regulator neuronowo rozmyty Warstwą Tranzycji Petriego. Na podstawie badań eksperymentalnych potwierdzono, iż regulator taki pozwala na poprawne sterowanie układem napędowym w zakresie prędkości ultra niskich gdzie istotnym jest nieliniowe tarcie występujące w układach rzeczywistych. Jest to uzupełnienie wcześniejszych badań gdzie przeprowadzono analizę regulatorów z warstwami Petriego dla wyższych zakresów prędkości [3]–[5], a także analizę symulacyjną dla prędkości niskich [4].

Najlepszy wynik w procesie optymalizacji w badaniach symulacyjnych osiągnięto dla przypadku regulatora PID o 3 gaussowskich funkcjach przynależności na wejście. Należy mieć na uwadze iż zwiększając wymiar regulatora znacznie zwiększa się liczba reguł a co za tym idzie czas wykonania się algorytmu. WTP pozwalają na ograniczenie złożoności numerycznej takich regulatorów [4], [5], [6].

Analizując przebiegi prędkości w zakresie ultra niskich należy mieć na uwadze znaczną niedokładność pomiaru, a także niepomijalny wpływa zjawisk takich jak tarcie. Analizując przebiegi eksperymentalne można jednak stwierdzić, iż prędkość zadana modelu referencyjnego jest śledzona w sposób prawidłowy przez układ.

W konkluzji stwierdzić można, że adaptacyjne regulatory neuronowo-rozmyte nadają się do sterowania obiektami postaci układów napędowych w zakresie prędkości ultra niskich.

W artykule pokazano siatki kryteriów jakości śledzenia prędkości modelu referencyjnego w zależności od nastaw adaptacji dla różnych amplitud prędkości zadanej. Jak widać niezależnie od amplitudy oraz typu regulatora można zauważyć pewien obszar płaszczyzny nastaw gdzie układ regulacji zachowuje się najlepiej. Nastawy adaptacji powinny być małe dodatnie, co wynika z dowodu stabilności układu zgodnie z teorią Lapunova. Dodatkowo zgodnie z uzyskanymi wynikami nastawa  $AD_D$  musi być mniejsza aniżeli  $AD_P$ .

W przypadku zakresu prędkości ultra niskich koniecznym jest dokładniejsze zamodelowanie zjawisk oraz właściwości obiektu sterowania. Zjawiska takie jak tarcie pomijalne przy wyższych prędkościach przestają być bez znaczenia w zakresie prędkości ultra niskich.

Artykuł powstał w ramach projektu: Adaptacyjne sterowanie rozmyte złożonego układu napędowego o zmiennych parametrach. Praca jest finansowana przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu o sygnaturze UMO-2011/03/B/ST7/02517.

## LITERATURA

- [1] BROCK S., ZAWIRSKI K., *New approaches to selected problems of precise speed and position control of drives*, 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society IECON, (2012), 6291–6296.

- [2] DERUGO P., SZABAT K., *Algorytm implementacji regulatora rozmytego o niskim koszcie numerycznym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2015, Vol. 90, No. 11, 235–238.
- [3] DERUGO P., SZABAT K., *Analysis of adaptive neuro-fuzzy PD controller with competitive Petri layers in speed control system for DC motor*, Computer applications in electrical engineering, 2013, 267–280.
- [4] DERUGO P., *Analiza wykorzystania regulatora neuronowo-rozmytego z warstwą tranzycji w sterowaniu silnikiem prądu stałego w zakresie prędkości ultra niskich*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały, 2014, 70, 34, 233–245.
- [5] DERUGO P., SZABAT K., *Implementation of the low computational cost fuzzy PID controller for two-mass drive system*, Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014, 564–568.
- [6] DERUGO P. et al., *Analiza ARN-R PID z warstwą Tranzycji Petriego, w sterowaniu silnikiem liniowym z magnesami trwałymi*, Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering, 2015, No. 83, 31–38.
- [7] FANG WU et al., *Study on speed detection and control method of PMSM under ultra-low speed*, Universities Power Engineering Conference, UPEC, 2007, 564–568.
- [8] HU WEI et al., *Azimuth ultra low speed tracking control for direct driving brushless motor*, International Conference on Information and Automation (ICIA), 2010, 350–354.
- [9] LUKICHEV D.V., DEMIDOVA G.L., BROCK S., *Fuzzy adaptive PID control for two-mass servo-drive system with elasticity and friction*, International Conference on Cybernetics (CYBCONF), 2015, 443–448.

NEURO-FUZZY CONTROLLER WITH PETRI TRANSITION LAYER  
IN DC MOTOR CONTROL SYSTEM UNDER ULTRA LOW SPEED TRAJECTORY  
– EXPERIMENTAL VERIFICATION

The main aim of this article is to verify experimentally possibilities of using neuro-fuzzy controllers to control the complex drive system in terms of low and ultra-low speed. Article is a complement and a summary of previous work. As the control object, the drive system with two DC motors was chosen. The drive motor is controlled using cascade control structure.

The proposed neuro-fuzzy controller was used in the outer-speed control loop. Engines were connected using flexible coupling, to obtain two mass system. The study examined the adaptive PD and PID neuro-fuzzy controllers with and without transition layer, with and without recursion, with different number of membership functions. In the early chapters describe an adaptive neuro-fuzzy controller with a transition layer. It described the idea of transition layer and its position in the system controller. Later the analyzed controllers were described, the influence adaptation algorithm settings on the criteria of quality were examined. Finally experimental outcomes, that confirming the possibility of using speed control systems with adaptive neuro-fuzzy controllers with transition layer at ultra-low speed range have been presented. The final chapter contains a summary and conclusions