

**Jakub Takosoglu, Ryszard Dindorf**  
Politechnika Świętokrzyska, Zakład Mechatroniki  
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce  
email:qba@asystent.tu.kielce.pl, dindorf@eden.tu.kielce.pl

## **SZYBKIE PROTOTYPOWANIE STEROWANIA ROZMYTEGO W CZASIE RZECZYWISTYM SERWONAPĘDU ELEKTROPNEUMATYCZNEGO**

Streszczenie – W referacie scharakteryzowano program xPC Target pakietu Matlab, który służy do szybkiego prototypowania w czasie rzeczywistym oraz symulacji *hardware-in-the-loop* przy użyciu komputera PC. Przedstawiono również stanowisko pomiarowe oraz wyniki badań doświadczalnych sterowania rozmytego w czasie rzeczywistym serwonapędu pneumatycznego. Przeprowadzono badania porównawcze jakości sterowania rozmytego ze sterowaniem przy użyciu przemysłowego sterownika ze sprzężeniem od zmiennych stanu oraz próby kształtowania trajektorii ruchu napędu elektropneumatycznego.

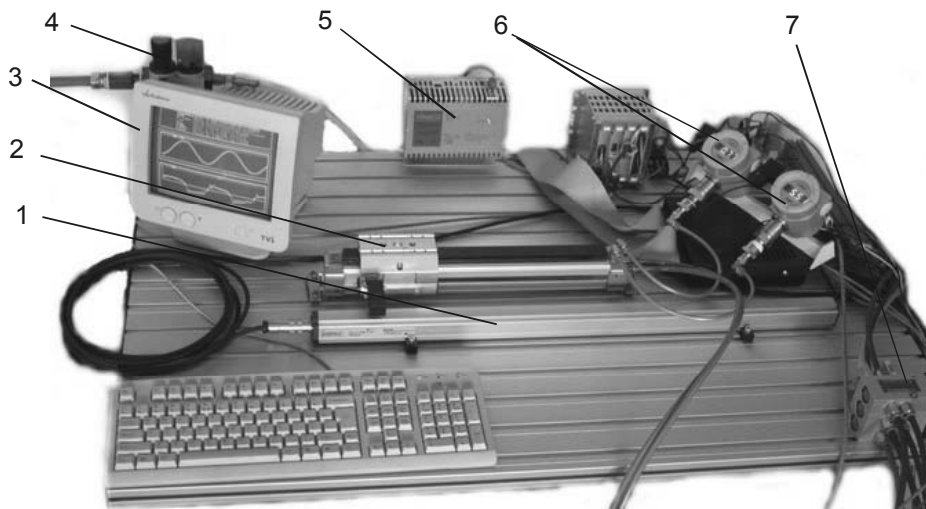
### **1 Wstęp**

Rozwój oprogramowania do szybkiego prototypowania w czasie rzeczywistym oraz symulacji *hardware-in-the-loop* umożliwia budowanie i testowanie złożonych systemów sterowania trudnymi i skomplikowanymi procesami przemysłowymi w warunkach laboratoryjnych. Takie podejście do projektowania minimalizuje koszty realizacji systemu gdyż nie jest konieczne budowanie kompletnego układu. Przykładem takiego procesu jest sterowanie rozmyte serwonapędem elektropneumatycznym. Zastosowanie logiki rozmytej daje możliwość poprawy dynamiki i dokładności pozycjonowania oraz eliminację wpływu zakłóceń w sterowaniu serwonapędu elektropneumatycznego. Pozwala również na budowę manipulatorów elektropneumatycznych o bardziej skomplikowanych strukturach kinematycznych niż dotychczas wykorzystywane w praktyce przemysłowej.

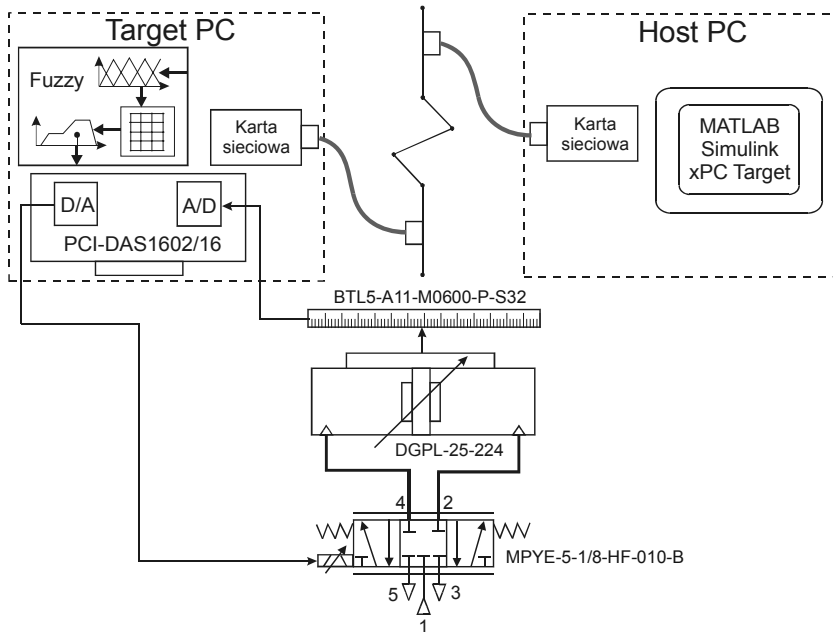
## 2 Stanowisko badawcze

Widok stanowiska do badań eksperymentalnych pozycjonowania serwonapędu elektropneumatycznego ze sterowaniem rozmytym przedstawiono na rys. 1. Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 2. W jego skład wchodzi:

- siłownik bezłoczyskowy DGP-25-224 o długość 224 mm i średnicy tłoka 25 mm
- zawór proporcjonalny MPYE-5-1/8-HF-010-B sterowany napięciowo 0-10V o nominalnym przepływie 700 l/min i częstotliwości przełączania 100Hz
- analogowy przetwornik położenia BTL5-A11-M0600-P-S32 z wyjściem napięciowym 0-10V
- karta pomiarowa AD/DA PCI-DAS 1602/16 o 8 wejściach oraz 2 wyjściach analogowych, 16 bitowa
- komputery klasy PC Host oraz Target



Rys. 1. Stanowisko badawcze: 1 – przetwornik położenia, 2 – siłownik bezłoczyskowy, 3 – monitor komputera xPC Target, 4 – zespół przygotowania powietrza, 5 – zasilacz impulsowy, 6 – przetworniki ciśnienia, 7 – zawory proporcjonalne

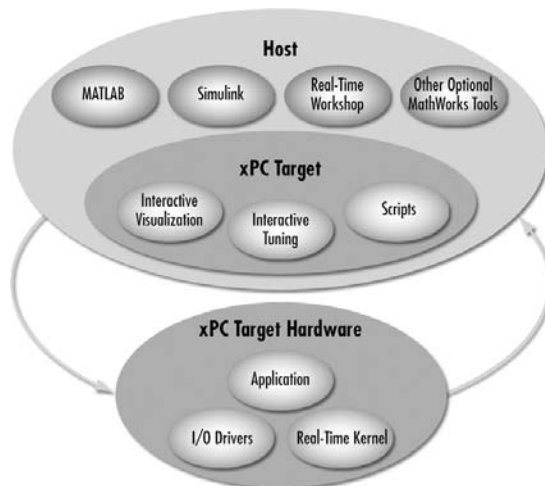


Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego

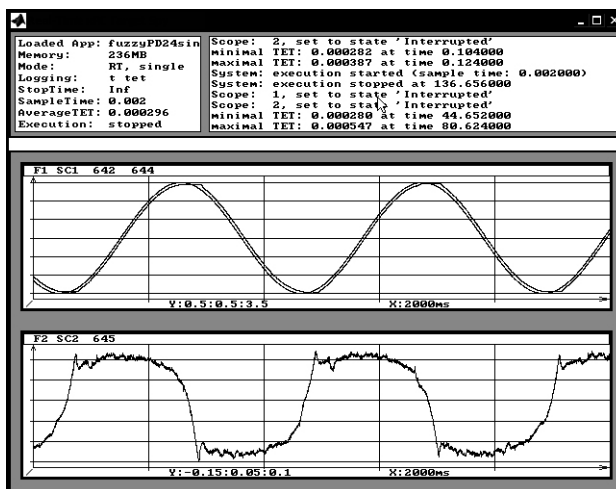
### 3 Szybkie prototypowanie

W komputerze oznaczonym na schemacie jako Host zainstalowano oprogramowanie MATLAB i Simulink oraz xPC Target służący do szybkiego prototypowania i sterowania w czasie rzeczywistym. Komputer Target posiada zainstalowaną kartę wejść/wyjść analogowych oraz system Real-Time xPC Target, który akwizuje dane pomiarowe i steruje serwonapędem elektro-pneumatycznym. Komputery Host i Target komunikują się za pomocą protokołu TCP/IP. Schemat działania aplikacji xPC Target i komunikacji między komputerami Host i Target przedstawiono na rys. 3.

Praca z pakietem do szybkiego prototypowania polega na zbudowaniu modelu *Simulink'a*. Następnym krokiem jest skompilowanie modelu oraz wysłanie go na komputer *Target*, który wraz z kartą wejść/wyjść analogowych i systemem *Real-Time xPC Target* pełni rolę fizycznego sterownika. Do *Target'a* podłączone jest stanowisko badawcze za pośrednictwem karty pomiarowej. Na komputerze *Host* i *Target* dzięki oprogramowaniu *xPC Target* możliwa jest wizualizacja pracy analizowanego procesu rys. 4.



Rys. 3. Diagram połączenia Host ↔ Target

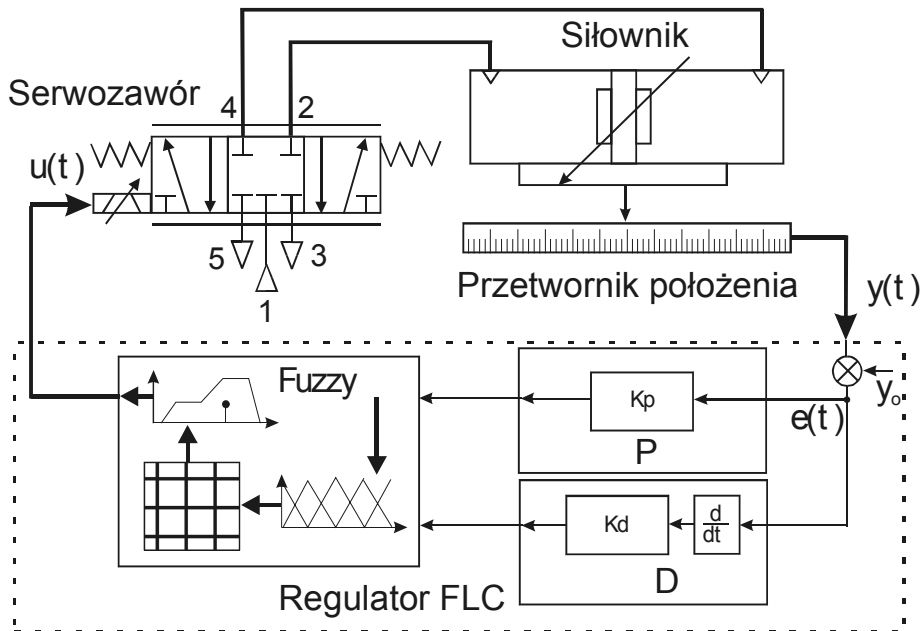


Rys. 4. Okno systemu Real-Time xPC Target

#### 4 Regulator rozmyty FLC

Do sterowania serwonapędu elektropneumatycznego zaproponowano regulator FLC (*Fuzzy Logic Controller*) typu PD o

dwóch wejściach  $e(t)$  (uchyb) i  $\Delta e(t)$  (zmiana uchybu) oraz jednym wyjściu  $u(t)$  (napięcie na cewce serwozaworu) rys. 5



Rys. 5. Sposób realizacji regulatora rozmytego typu PD

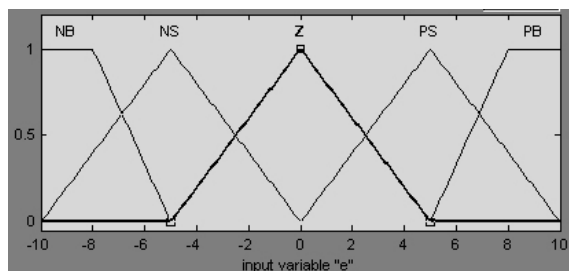
FLC opisuje zbieżność między zmianą sygnału sterującego  $\Delta u(k)=u(k)-u(k-1)$  z jednej strony i uchybem  $e(k)$  oraz jego zmianą  $\Delta e(k)=e(k)-e(k-1)$  z drugiej strony. Zależność sterowania FLC można zapisać:

$$\Delta u(k)=F(e(k),\Delta e(k)) \quad (1)$$

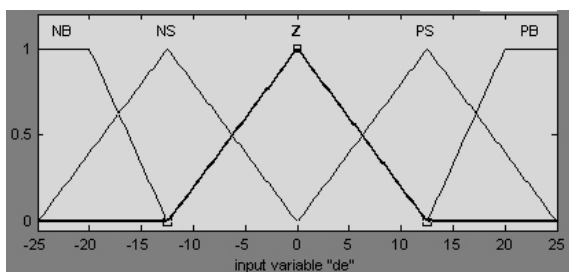
Rzeczywiste wyjście regulatora  $u(k)$  otrzymuje się z przeszłej wartości sterowania  $u(k-1)$  i jej aktualizacji przez  $\Delta u(k)$  [2]:

$$u(k)=u(k-1)+ \Delta u(k) \quad (2)$$

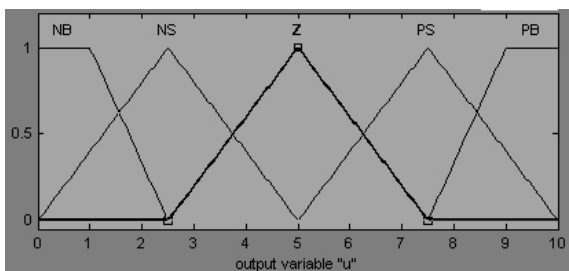
Sygnały wejściowe i wyjściowe regulatora poddano procesowi rozmywania z rozmieszczeniem zbiorów rozmytych typu trójkąt i trapez o funkcjach przynależności jak na rys. 6, 7 i 8.



Rys. 6. Rozmywanie wejścia  $e(t)$



Rys. 7. Rozmywanie wejścia  $\Delta e(t)$



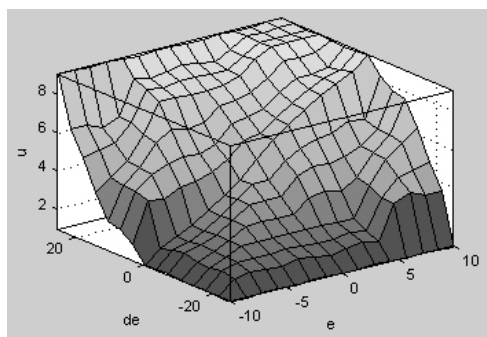
Rys. 8. Rozmywanie wyjścia  $u(t)$

Bazę reguł regulatora rozmytego stanowi 25 reguł opisanych w tablicy decyzyjnej (tablica 1).

Tabela. 1. Tablica decyzyjna

$\Delta e/e$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB
NS	NB	NS	NS	NS	PS
Z	NB	NS	Z	PS	PB
PS	NS	PS	PS	PB	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB

Na rys. 9 przedstawiona została powierzchnia przetwarzania zbudowanego regulatora FLC. W procesie przetwarzania rozmytego zastosowano wyznaczanie poziomu zapłonu typu *min*, implikacji rozmytej typu *min* oraz agregacji poszczególnych wyjść reguły typu *max*. W celu uzyskania ostrej wartości wyjścia zastosowano metodę środka obszaru COA (*Center of Area*) [7, 8, 9, 10].

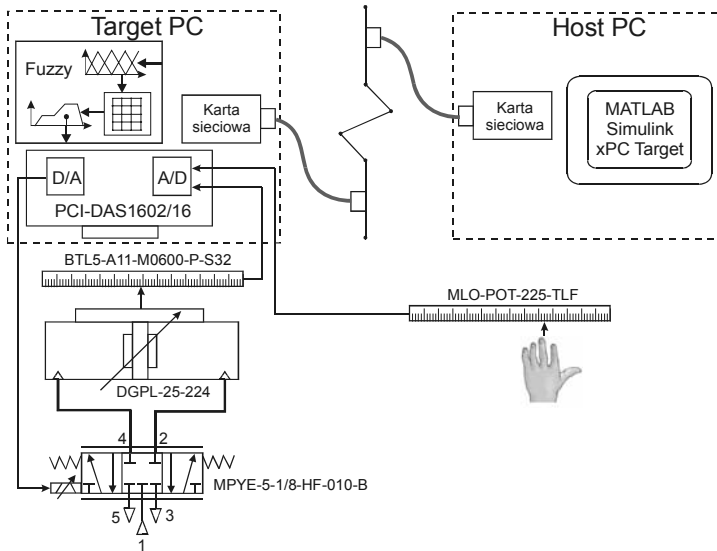


Rys. 9. Powierzchnia przetwarzania

## 5 Badania eksperymentalne

Przeprowadzono badania serwonapędu elektropneumatycznego z wykorzystaniem regulatora przemysłowego ze sprzężeniem od zmiennych stanu oraz z zaproponowanym regulatorem rozmytym. Realizowano regulację przestawną, nadążną oraz kontrolę trajektorii ruchu serwonapędu. Sygnałami wymuszającymi dla regulacji przestawnej były sygnały typu *step* oraz *pulse*, w przypadku regulacji nadążnej sygnały typu *ramp* i *sin* natomiast dla kontroli trajektorii ruchu

łoka siłownika dowolny sygnał zadawany ręcznie poprzez dodatkowy potencjometryczny przetwornik położenia MLO-POT-225-TLF (patrz rys. 10). Regulator przemysłowy daje możliwość wymuszania jedynie sygnałami typu *step* i *ramp*.



Rys. 10. Schemat stanowiska badawczego ręcznego zadawania sygnału wymuszającego

Jakość regulacji serwonapędu elektropneumatycznego sprawdzono przy użyciu podstawowych wskaźników jakości takich jak: czas regulacji  $t_R$ , przeregulowanie  $\delta_p = y_m - y_0$ , błąd regulacji (uchyb)  $e = |y(t) - y_d|$ , całkowych wskaźników jakości: IAE (*Integral of absolute error*), ISE (*Integral of square error*), ITAE (*Integral of time and absolute error*), ITSE (*Integral of time and square error*) oraz dodatkowych kryteriów dla regulacji nadążnej: bezwzględnej odchyłki nadążania sygnału położenia  $e_s$  i sygnału prędkości  $e_v$ ,  
gdzie:

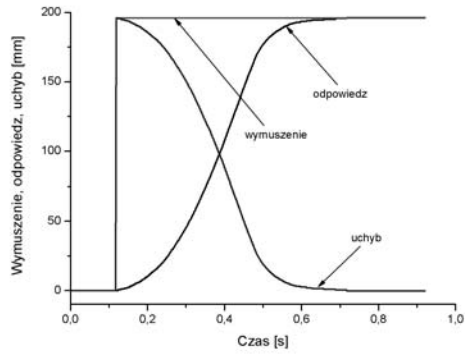
$y_m$  – maksymalna wartość sygnału regulowanego

$y_0$  – sygnał wymuszający (wymuszenie)

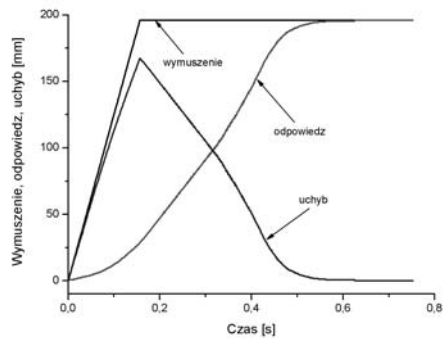
$y(t)$  – sygnał regulowany

Przykładowe przebiegi procesu pozycjonowania serwonapędu elektropneumatycznego przy użyciu sterownika przemysłowego przedstawiają rys. 11 i 12, natomiast regulatora rozmytego rys. 13-18.

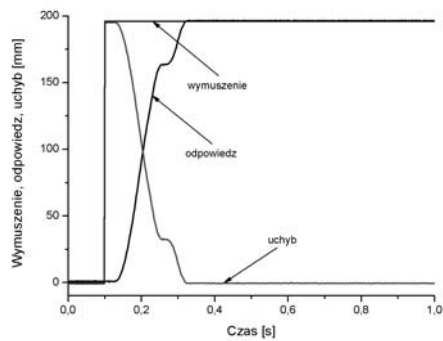




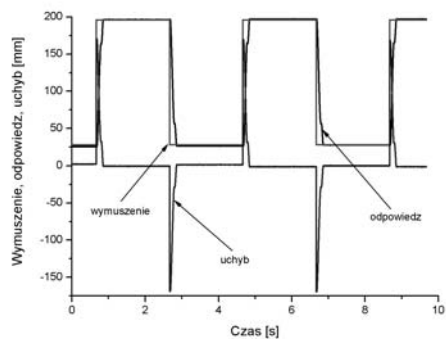
Rys. 11. Przebieg procesu regulacji dla wymuszenia sygnałem typu step



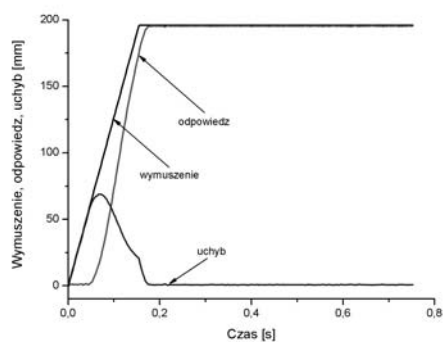
Rys. 12. Przebieg procesu regulacji dla wymuszenia sygnałem typu ramp



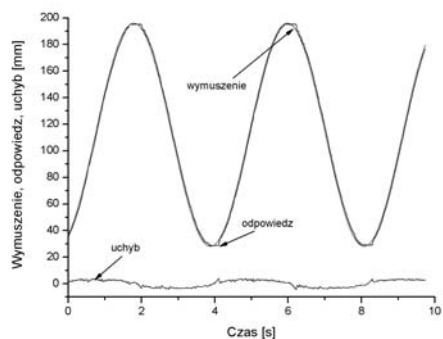
Rys. 13. Przebieg procesu regulacji dla wymuszenia sygnałem typu step



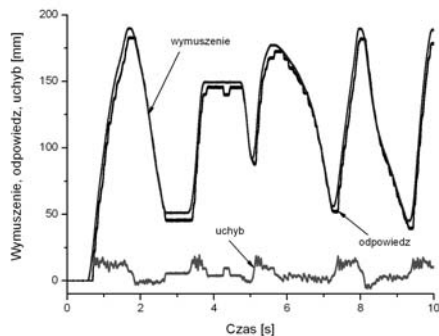
Rys. 14. Przebieg procesu regulacji dla wymuszenia sygnałem typu pulse



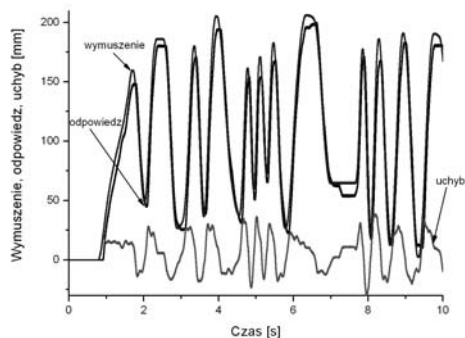
Rys. 15. Przebieg procesu regulacji dla wymuszenia sygnałem typu ramp



Rys. 16. Przebieg procesu regulacji dla wymuszenia sygnałem typu sin



Rys. 17. Przebieg procesu regulacji dla wymuszenia dowolnym sygnałem zadawanym ręcznie



Rys. 18. Przebieg procesu regulacji dla wymuszenia dowolnym sygnałem zadawanym ręcznie

W tablicach 2 i 3 zebrano obliczone wskaźniki jakości dla przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

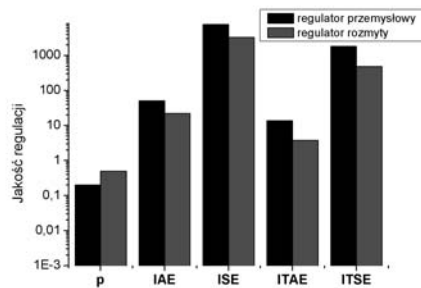
Tabela. 2. Wskaźniki jakości ze sterownikiem przemysłowym

$t_R$ [s]	$\delta_P$ [mm]	IAE	ISE	ITAE	ITSE	$e_s$ mm	$e_v$ mm/s
Wymuszenie typu <i>ramp</i>							
0,56	0	43,7	5018	9,6	1025	58,1	444,1
Wymuszenie typu <i>step</i>							
0,72	0,2	51,1	7757	13,7	1845	-	-

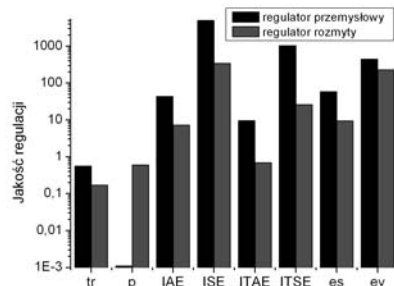
Tabela. 3. Wskaźniki jakości z regulatorem rozmytym

$t_R$ [s]	$\delta_P$ [mm]	IAE	ISE	ITAE	ITSE	$e_s$ mm	$e_v$ mm/s
Wymuszenie typu <i>sin</i>							
-	-	23,5	64,2	116,3	320,8	2,4	62,6
Wymuszenie typu <i>pulse</i>							
-	1,2	80,4	8880	374,7	4,2e4	-	-
Wymuszenie typu <i>ramp</i>							
0,17	0,6	7,2	343,7	0,7	26,43	9,5	230,1
Wymuszenie typu <i>step</i>							
0,32	0,5	22,4	3301	3,8	490,1	-	-

Na rys. 19 i 20 przedstawiono wykresy porównawcze wskaźników jakości regulacji serwonapędu pneumatycznego przy użyciu sterownika przemysłowego i regulatora rozmytego dla regulacji przestawnej – wymuszenie typu *step* (rys. 19) oraz dla regulacji nadążnej – wymuszenie typu *ramp* (rys. 20).



Rys. 19. Wykresy porównawcze wskaźników jakości regulacji przestawnej



Rys. 20. Wykresy porównawcze wskaźników jakości regulacji nadążnej

## 6 Podsumowanie

Przeprowadzono szereg badań eksperymentalnych jednoosiowego serwonapędu pneumatycznego ze sterownikiem przemysłowym i sterowaniem rozmytym do realizacji zadania przestawiania, nadążania i odtwarzania dowolnej trajektorii ruchu. Regulacja serwonapędu przy użyciu sterownika przemysłowego umożliwia jedynie zadania przestawiania oraz w niewielkim zakresie zadanie nadążania, co stanowi spore ograniczenie zastosowania serwonapędów elektropneumatycznych w przemyśle. Opracowany regulator rozmyty typu PD do sterowania serwonapędem elektropneumatycznym jest rozwiązaniem wykazującym się stabilną i odporną pracą oraz skutecznym działaniem w praktyce z jakością regulacji odpowiadającą warunkom pracy przemysłowej. Porównano jakość regulacji sterowania konwencjonalnego i rozmytego przy użyciu kilku wskaźników jakości, które obliczono dla takich samych wymuszeń i w takich samych warunkach pracy serwonapędu pneumatycznego. Dokładność pozycjonowania i jakość regulacji serwonapędu pneumatycznego ze sterowaniem rozmytym jest lepsza niż z regulatorem przemysłowym. Zastosowanie regulacji rozmytej umożliwia precyzyjne sterowanie wieloosiowymi manipulatorami pneumatycznymi o strukturach kinematycznych szeregowej i równoległej, a tym samym wykorzystanie ich do bardziej skomplikowanych zadań w praktyce przemysłowej. Zaprojektowany regulator rozmyty typu PD bardzo dobrze realizuje zadanie śledzenia trajektorii zadawanej w czasie rzeczywistym. Pomimo iż zadawana trajektoria (sygnał wymuszający) jest obciążony znacznym szumem (ze względu na wykorzystany przetwornik potencjometryczny) pozycjonowanie przebiega poprawnie. Bardzo dobre wyniki tych badań umożliwią w przyszłości wykorzystanie zaprojektowanego regulatora rozmytego do sterowania np. manipulatorami fizjoterapeutycznymi. Dodatkowym atutem jest duża elastyczność pracy sterowania rozmytego w zależności od użytej do budowy aparatury (różne rodzaje napędów pneumatycznych, przetworników, duży zakres możliwych do uzyskania położeń i prędkości napędów pneumatycznych oraz możliwość odtwarzania dowolnych trajektorii ruchu tłoka siłownika).

## Literatura

- [1] Dindorf R., Łaski P., Takosoglu J.: Control of electro-pneumatic 3-DOF parallel manipulator using fuzzy logic. "Hydraulika a Pneumatika" 1-2/2005

- [2] Dindorf R., Takosoglu J.: Analiza serwonapędu pneumatycznego z regulatorami rozmytymi. *Pneumatyka* 1/2005.
- [3] Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M.: Wprowadzenie do sterowania rozmytego, Warszawa 1996
- [4] Kosmol J.: Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie, Warszawa 1998
- [5] Olszewski M.: Sterowanie pozycyjne pneumatycznego napędu siłownikowego, Warszawa 2002
- [6] Piegat A.: Wprowadzenie do automatyki, Szczecin 1995
- [7] Takosoglu J., Gawor T., Łaski P.: Manipulator elektropneumatyczny typu tripod ze sterowaniem logiką rozmytą, *Pneumatyka* 3/2004
- [8] Takosoglu J., Dindorf R.: Sterowanie serwonapędem elektropneumatycznym za pomocą regulatora rozmytego typu PD, *Projektowanie mechatroniczne*, Kraków 2004
- [9] Takosoglu J., Dindorf R.: Analiza serwonapędu elektropneumatycznego z regulacją rozmytą. „*Hydraulika i Pneumatyka*” 6/2004
- [10] Takosoglu J., Dindorf R.: Modelowanie, symulacja i sterowanie serwonapędu elektropneumatycznego oparte na logice rozmytej. *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Informatyki, Łódź*, nr 1, 2005
- [11] Takosoglu J., Dindorf R.: Sterowanie rozmyte serwonapędu elektropneumatycznego. *XV Krajowa Konferencja Automatyki, Tom II, Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk, Warszawa 2005*
- [12] Yager R. R.: Filev D. P.: *Podstawy modelowania i sterowania rozmytego*, Warszawa 1995

## **RAPID PROTOTYPING A FUZZY CONTROL OF ELECTRO-PNEUMATIC SERVODRIVE IN REAL TIME**

Summary - In paper xPC Target of packet the Matlab was characterized, which uses to rapid prototyping in real time and hardware-in-the-loop simulation. Experimental setup and experimental results a fuzzy control of electro-pneumatic servodrive in real time was presented. Comparative study of quality fuzzy control and industrial controller was carried out and test of formation trajectory motion.