

## POZYCJONOWANIE SERWONAPĘDU ELEKTROPNEUMATYCZNEGO Z BEZPOŚREDNIM POMIAREM PRZEMIESZCZENIA I PRĘDKOŚCI TŁOKA SIŁOWNIKA

Jakub TAKOSOGLU\*, Ryszard DINDORF\*\*,\*\*, Paweł ŁASKI\*, Piotr WOŚ\*

\*Zakład Mechatroniki, Katedra Technologii Mechanicznej i Metrologii, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Politechnika Świętokrzyska, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

\*\*Katedra Maszyn Ciepłych i Przepływowych, Wydział Energetyki i Paliw, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

qba@tu.kielce.pl, dindorf@tu.kielce.pl, pawell@tu.kielce.pl, wos@tu.kielce.pl

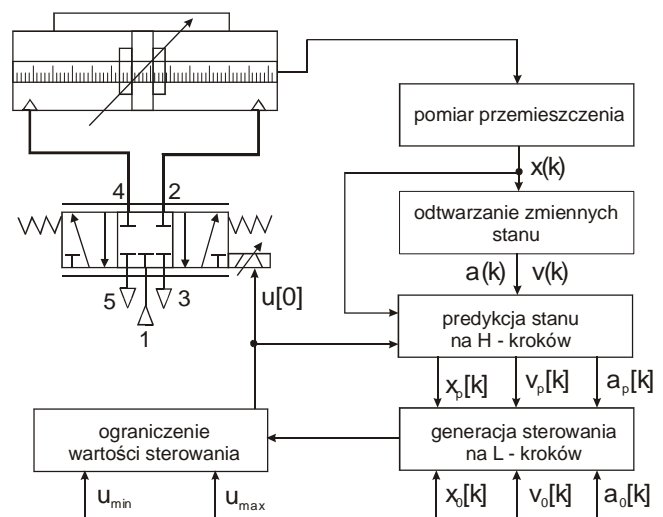
**Streszczenie:** W artykule przedstawiono stanowisko eksperymentalne pozycjonowania serwonapędu elektropneumatycznego z bezpośrednim pomiarem przemieszczenia i prędkości tłoka siłownika za pomocą regulatora rozmytego. Analizowano wpływ zastosowanego przetwornika przemieszczenia i prędkości tłoka siłownika na dokładność regulacji serwonapędu elektropneumatycznego.

### 1. WPROWADZENIE

W układach sterowania serwonapędami pneumatycznymi, w celu zwiększenia dokładności pozycjonowania oraz wyeliminowania zakłóceń, wykorzystuje się sprzężenia zwrotne od niemierzalnych zmiennych stanu układu napędowego. Zmienne stanu są odtwarzane dla regulatorów klasycznych P, PI, PD, PID jak i dla regulatorów inteligentnych wykorzystujących metody miękkiego obliczania (ang. *soft computing*). W związku z tym pojawia się problem odtwarzania zmiennych stanu z mierzalnych sygnałów generowanych przez przetworniki analogowo-cyfrowe – najczęściej przetworniki przemieszczenia. Rozwiązaniem przemysłowym dla osi serwo-pneumatycznych jest sterownik SPC-200. Jest to regulator zmiennych stanu, który umożliwia kontrolę nad trzema parametrami ruchu liniowego (położenie, prędkość i przyspieszenie). Algorytm sterowania sterownika SPC-200 (Rys. 1) przebiega następująco:

- pomiar aktualnego położenia tłoka siłownika  $x(t)$ ;
- odtworzenie niemierzonych zmiennych stanu prędkości  $v(t)$  oraz przyspieszenia  $a(t)$  na podstawie pomiaru położenia  $x(t)$ ;
- predykcja stanu układu  $x_p(t)$ ,  $v_p(t)$ ,  $a_p(t)$  na następnych H kroków na podstawie wyznaczonych wartości zmiennych stanu modelu liniowego układu oraz wyznaczonych w poprzednich krokach wektora sterowania  $u$ ;
- wyznaczenie ciągu sterowania  $u$  na następnych L kroków w fazie nadążania za wartością zadaną lub w fazie hamowania;
- uwzględnienie ograniczeń sygnału sterującego;
- przesłanie na serwowawór proporcjonalny aktualnego sygnału sterowania.

Producent deklaruje dokładność sterowania na poziomie  $\pm 0.2 \div 0.8 \text{ mm}$ , a pomiaru przemieszczenia  $0.01 \text{ mm}$  z dokładnością poniżej 1%.



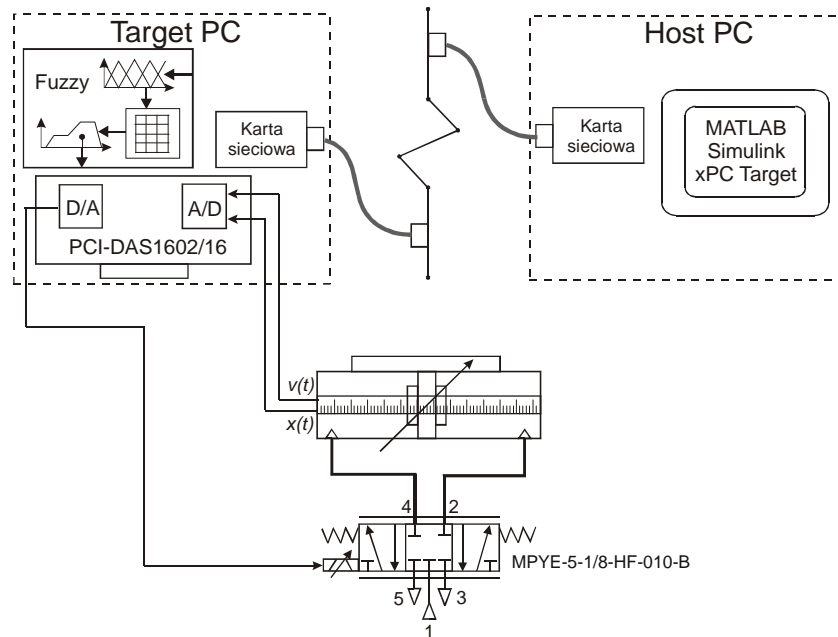
Rys. 1. Schemat algorytmu sterowania sterownika SPC-200

### 2. STANOWISKO BADAWCZE

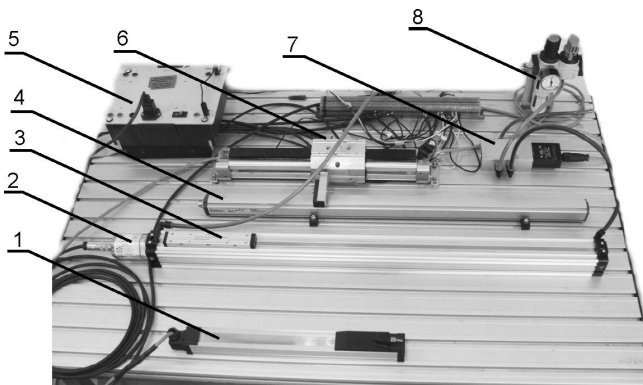
Badania eksperymentalne serwonapędu elektropneumatycznego dotyczyły regulacji przestawnej, nadążnej, uczenie/odtworzenie oraz na sprawdzeniu wpływu bezpośredniego pomiaru przemieszczenia i prędkości tłoka siłownika na dokładność pozycjonowania przy wykorzystaniu regulatora rozmytego typu PD. Problem pozycjonowania serwonapędów pneumatycznych wynika ze złożonego, skomplikowanego i nie do końca poznanego procesu przetwarzania energii sprężonego gazu na energię mechaniczną ruchu tłoka siłownika. Rozwiązanie takiego problemu w otoczeniu niedostatecznej i niekompletnej informacji jest zadaniem trudnym do realizacji w warunkach pracy przemysłowej. Dodatkowym problem są rosnące wymagania użytkowe: realizacja zadania przestawiania, nadążania oraz ucze-

nia/odtworzenia dowolnych trajektorii ruchu. Wymagane jest również pozycjonowanie w szerokim zakresie przemieszczeń i zadanych prędkości ruchu tłoka siłownika. Na

Rys. 2 przedstawiono schemat analizowanego układu sterowania serwonapędu elektropneumatycznego.



Rys. 2. Schemat układu sterowania serwonapędu elektropneumatycznego



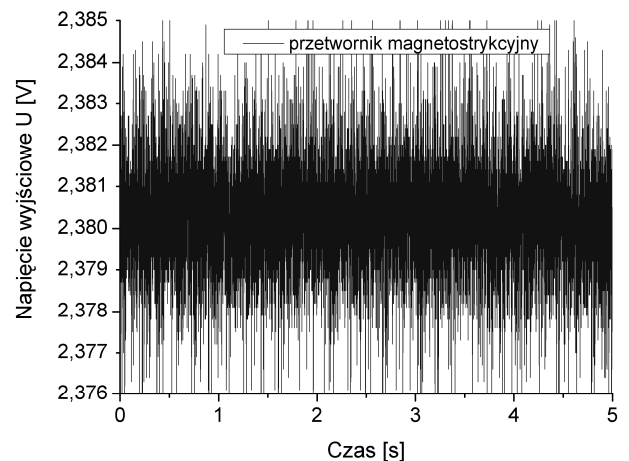
Rys. 3. Widok ogólny stanowiska badawczego: 1 – zadajnik sygnału wejściowego, 2 – przetwornik przemieszczenia i prędkości BTL7, 3 – siłownik beztłoczkowy D32x600, 4 – przetwornik przemieszczenia BTL5, 5 – zasilacz 24V DC, 6 – siłownik beztłoczkowy DGP-25-224, 7 – serwowawór proporcjonalny MPYE-5-1/4-HF-010-B, 8 – zespół przygotowania powietrza

– komputery PC (*Host* i *Target*).

Widok ogólny stanowiska badawczego przedstawiono na Rys. 3.

### 3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

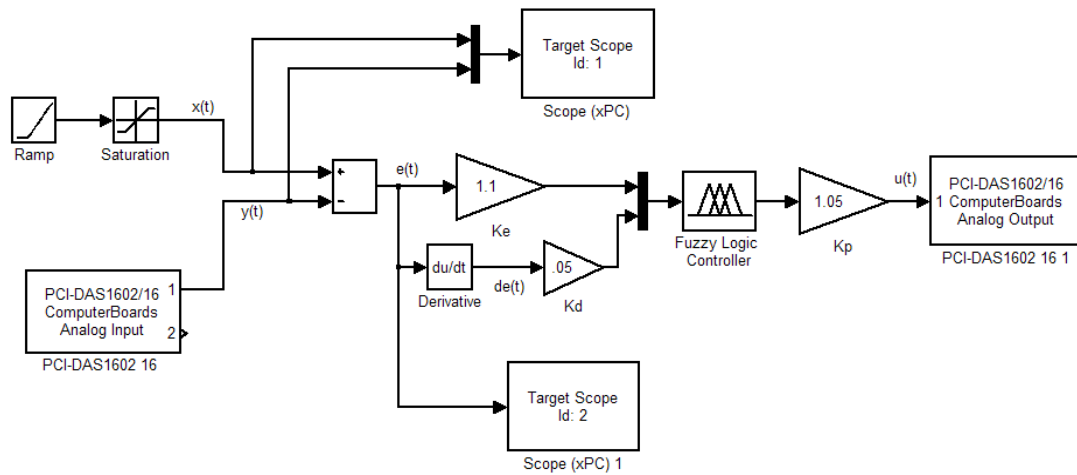
Pierwszym etapem badań eksperymentalnych było wyznaczenie szumu pomiarowego przetwornika położenia. W celu dokonania pomiarów, ustawiono suwak siłownika beztłoczkowego w określonym położeniu i rejestrowano napięcie wyjściowe z przetwornika przemieszczenia. Na Rys. 4 przedstawiono wyniki badań. Z przeprowadzonych badań szum pomiarowy wyniósł  $\pm 0,007$  V.



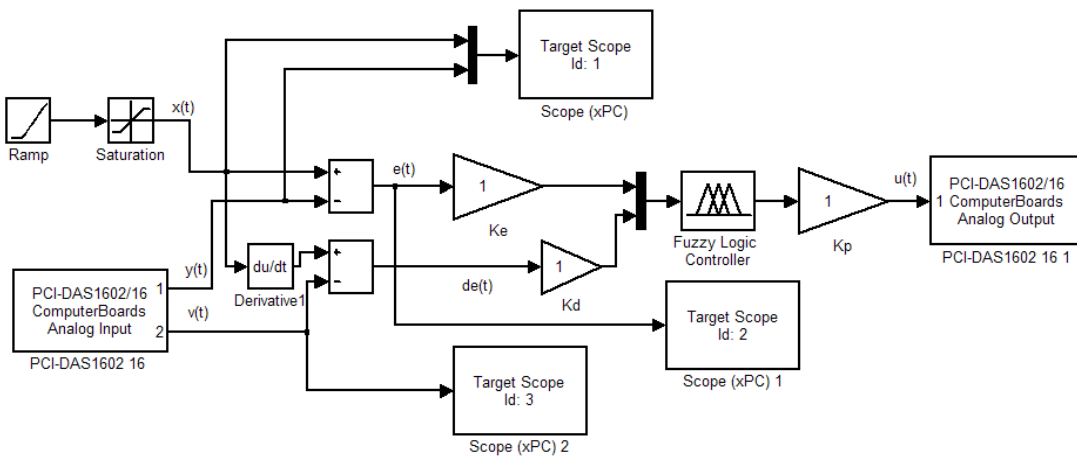
Rys. 4. Przebiegi napięcia wyjściowego przetwornika przemieszczenia

Do budowy stanowiska badawczego zastosowano:

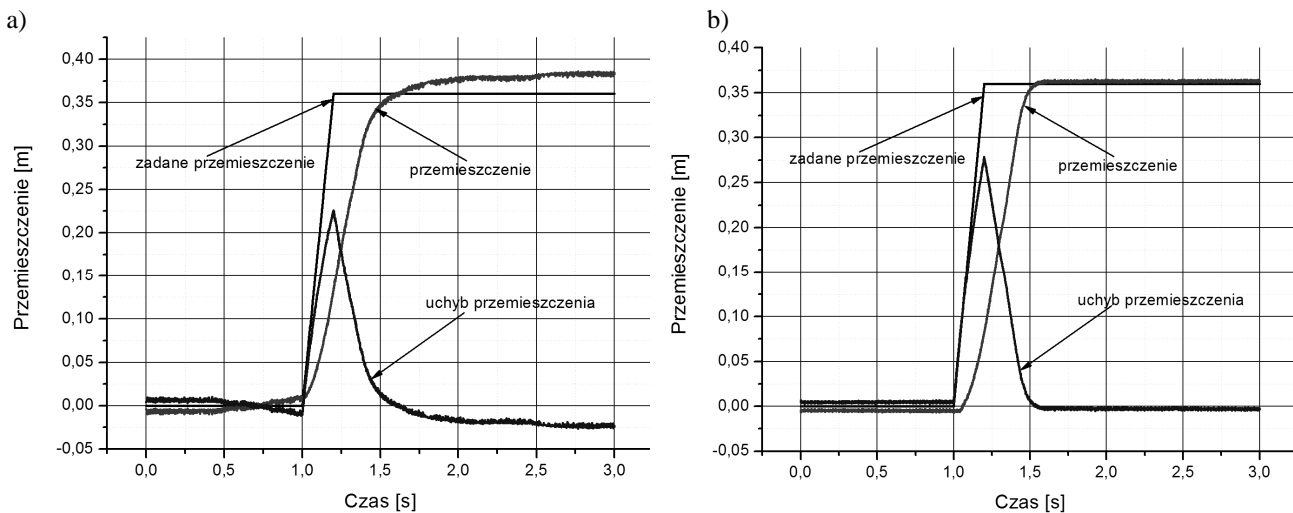
- siłownik beztłoczkowy D32x600 o średnicy tłoka 32mm, długości 600mm (Prema) i wewnętrznym analogowym, bezstykowym, magnetostrykcyjnym przetwornikiem przemieszczenia i prędkości BTL7-A5001-M0750-B-S32 (Baluff), wyjścia analogowe 0-10 V;
- serwowawór proporcjonalny przepływu MPYE-5-1/4-HF-010-B (Festo) sterowany napięciowo 0-10 V;
- karta AD/DA PCI-DAS 1602/16 (Measurement Computing) o 16 wejściach oraz 2 wyjściach analogowych 16-bitowa;
- system xPC Target do szybkiego prototypowania i symulacji *hardware in the loop* (Mathworks);



Rys. 5. Schemat układu z programowym odtwarzaniem sygnału



Rys. 6. Schemat układu z wykorzystaniem bezpośredniego pomiaru sygnału prędkości



Rys. 7. Pozycjonowanie serwonapędu elektropneumatycznego: a) z odtwarzaniem sygnału zmiany uchybu, b) z bezpośrednim pomiarem sygnału prędkości

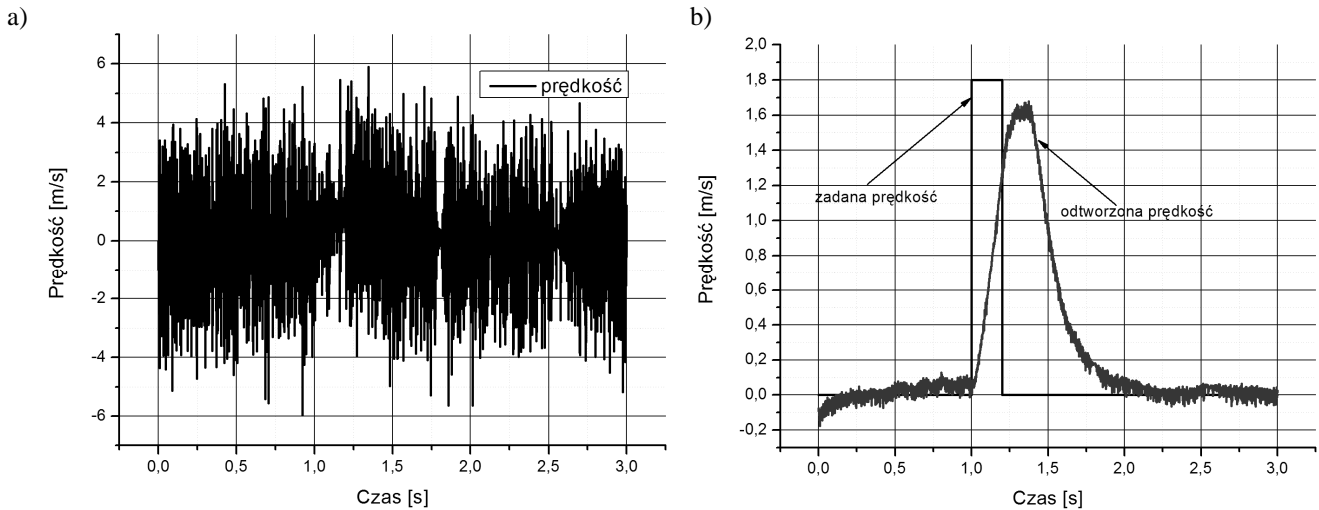
Następnie w Matlabie/Simulinku zbudowano dwa układy sterowania rozmytego serwonapędu elektropneumatycznego. Na Rys. 5 przedstawiono układ, w którym zastosowano programowe odtwarzanie sygnału zmiany uchybu  $\Delta e$

w torze sterowania D regulatora rozmytego typu PD, natomiast na Rys. 6 układ z wykorzystaniem bezpośredniego pomiaru sygnału prędkości.

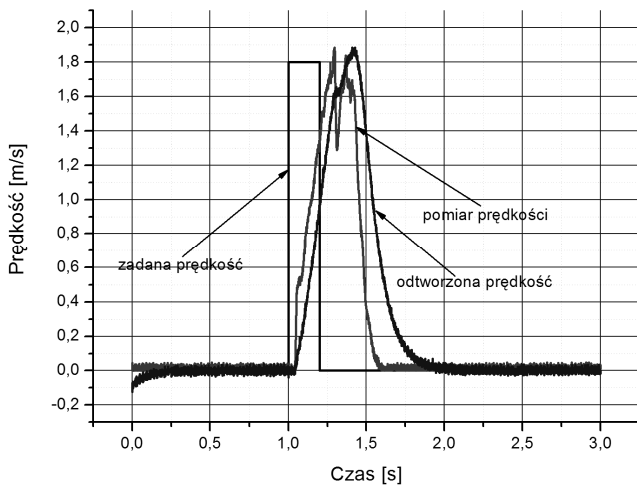
Programowe odtworzenie sygnału prędkości i sygnału przyspieszenia z sygnału przemieszczenia, w którym występuje szum wymaga stosowania filtrów. Na Rys. 7a przedstawiono proces sterowania rozmytego serwonapędu elektropneumatycznego według układu z rys. 5, natomiast na rys. 7b według układu z rys. 6. W obydwu przypadkach jako sygnał wymuszający zastosowano sygnał typu *ramp* z przemieszczeniem siłownika do 0,36m i zadaną prędkością 1,8m/s.

Na Rys. 8a przedstawiono wykres prędkości tłoka siłownika odtworzony z sygnału przemieszczenia przez za-

stosowanie różniczki programowej. Jest to sygnał silnie zaszumiony, praktycznie bezużyteczny w układzie sterowania. Na Rys. 8b przedstawiono odtworzoną prędkość tłoka siłownika przy zastosowaniu filtra różniczkującego rzeczywistego. Na Rys. 9 przedstawiono wykresy prędkości tłoka siłownika z pomiaru bezpośredniego oraz dla porównania przy odtworzeniu z sygnału położenia. Zastosowano taki sam rodzaj filtra jak na Rys. 8b. Powstałe różnice pomiędzy prędkością odtwarzaną z sygnału położenia i z bezpośredniego pomiaru prędkości, mogą powodować błędy w torze sterowania.



Rys. 8. Wykresy prędkości tłoka siłownika z odtwarzania sygnału położenia: a) bez filtra, b) z filtrem



Rys. 9. Wykresy prędkości tłoka siłownika z pomiaru bezpośredniego

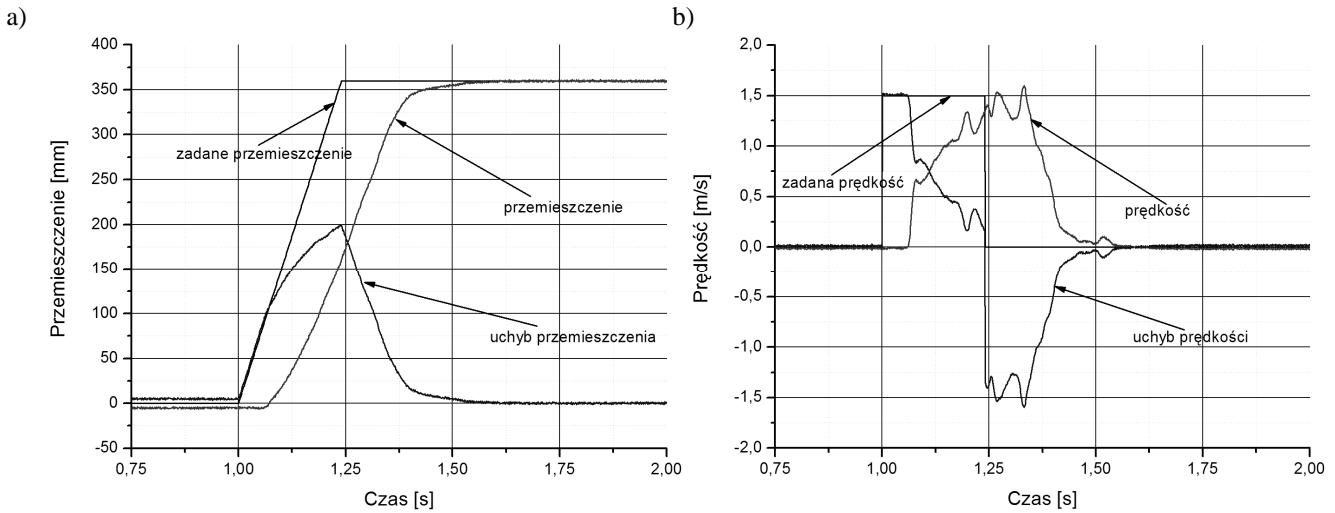
Dokładność pozycjonowania serwonapędu elektropneumatycznego sprawdzono przy użyciu standardowych wskaźników jakości takich jak: czas regulacji, przeregulowanie, uchyb statyczny. Założono odchyłkę ustaloną

o wartości  $\pm 5\text{mm}$ . W tabeli 1 zebrano porównanie podstawowych wskaźników jakości regulacji dla sterowania z odtwarzaniem sygnału prędkości oraz z bezpośrednim pomiarem prędkości.

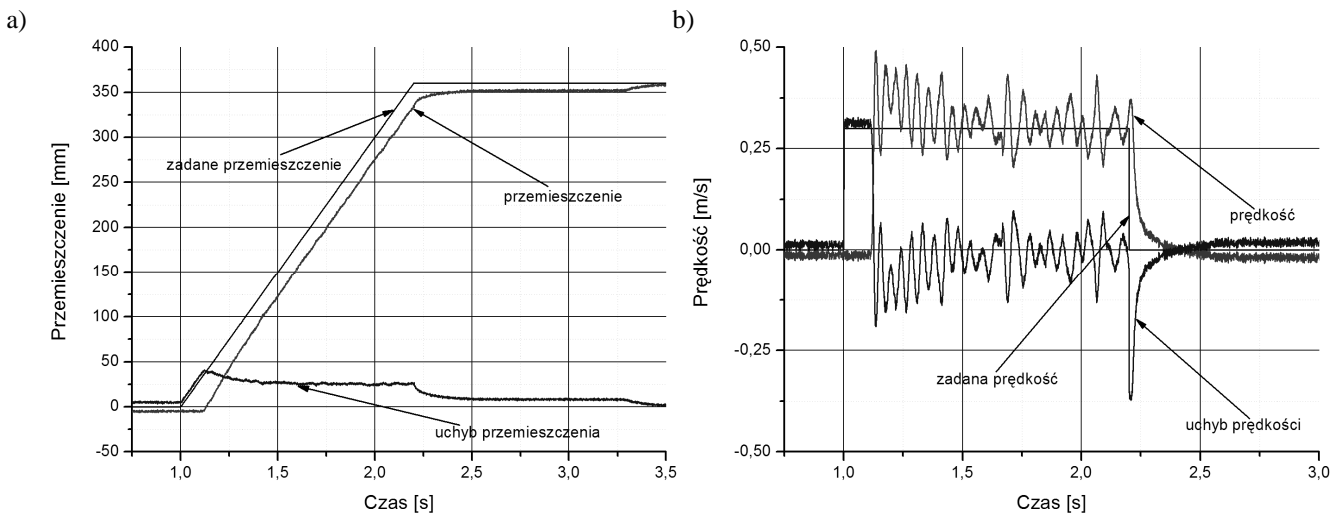
Tab. 1. Podstawowe wskaźniki jakości regulacji

	Czas regulacji [s]	Uchyb statyczny [m]	Przeregulowanie
z odtwarzaniem	1,65	0,024	0,067
bez odtwarzania	1,50	0,003	0,011

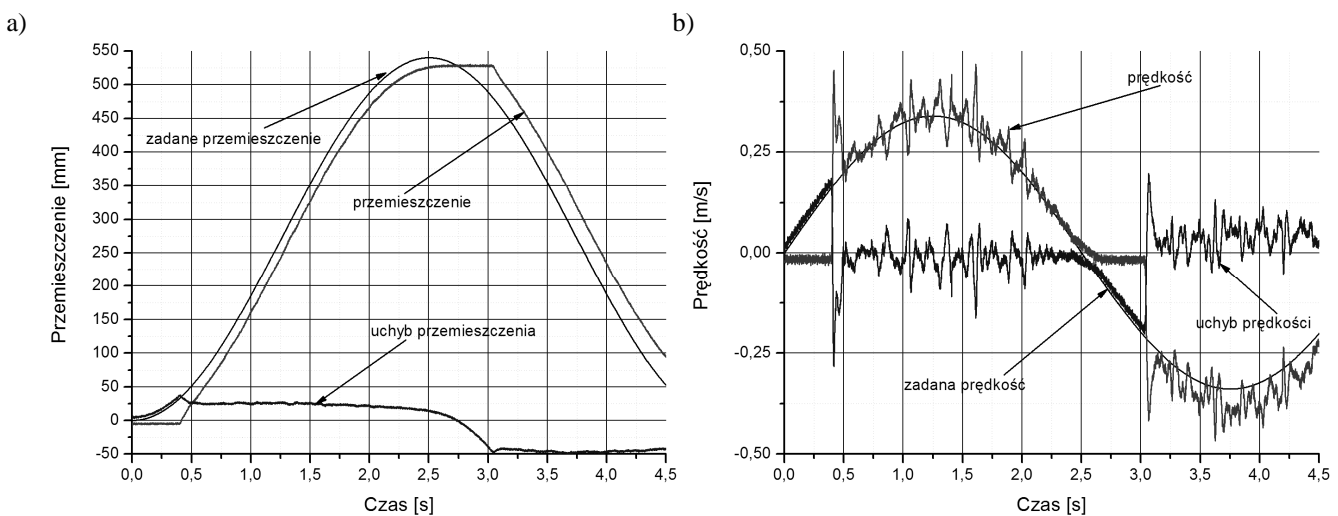
Na Rys. 10 i 11 przedstawiono proces pozycjonowania serwonapędu z bezpośrednim pomiarem sygnału prędkości dla wymuszenia typu *ramp* ze skokiem do 360mm i prędkościami odpowiednio 1,5m/s i 0,3m/s, natomiast na Rys. 12 proces pozycjonowania dla wymuszenia typu sinusoidalnego o częstotliwości 0,1Hz. W tym przypadku siłownik osiągnął maksymalny skok wynoszący 540mm, a prędkość maksymalną wynoszącą 0,34m/s.



**Rys. 10.** Pozycjonowanie serwonapędu elektropneumatycznego z bezpośrednim pomiarem sygnału prędkości dla wymuszenia typu ramp ze skokiem do 360mm i prędkością 1,5m/s: a) charakterystyki przemieszczenia, b) charakterystyki prędkości



**Rys. 11.** Pozycjonowanie serwonapędu elektropneumatycznego z bezpośrednim pomiarem sygnału prędkości dla wymuszenia typu ramp ze skokiem do 360mm i prędkością 0,3m/s: a) charakterystyki przemieszczenia, b) charakterystyki prędkości



**Rys. 12.** Pozycjonowanie serwonapędu elektropneumatycznego z bezpośrednim pomiarem sygnału prędkości dla wymuszenia typu sinusoidalnego ze skokiem maksymalnym 540mm i prędkością maksymalną 0,34m/s: a) charakterystyki przemieszczenia, b) charakterystyki prędkości

### 3. WNIOSKI

W pracy przedstawiono badania eksperymentalne układów regulacji rozmytej z wykorzystaniem bezpośredniego pomiaru prędkości tłoka siłownika oraz przy odtwarzaniu sygnału prędkości z mierzonego sygnału przemieszczenia tłoka siłownika. Odtwarzanie niemierzalnych sygnałów wymaga stosowania filtrów w układach sterowania, co może powodować błędy i wprowadzać opóźnienia. Układ z pomiarem bezpośrednim prędkości jest układem działającym „bardziej kulturalnie” niż układ z odtwarzaniem sygnału prędkości. Przesterowania zaworu proporcjonalnego są mniej gwałtowne, a zawór pracuje cicho. Dodatkowym atutem układu z pomiarem bezpośrednim jest brak konieczności strojenia regulatora rozmytego typu PD. Jak widać na Rys. 6 współczynniki wzmocnienia w torze P, D oraz na wyjściu regulatora mają wartość 1. Przeprowadzono obliczenia podstawowych wskaźników jakości i porównano obydwie typy układów. Z wyników badań można zauważyć przewagę układu z pomiarem bezpośrednim prędkości tłoka siłownika. Dostrojenie regulatora rozmytego na drodze eksperymentalnej powinno jeszcze bardziej poprawić dokładność pozycjonowania serwonapędu elektropneumatycznego.

### LITERATURA

1. **Takosoglu J., Dindorf R.** (2006), Szybkie prototypowanie sterowania rozmytego w czasie rzeczywistym serwonapędu elektropneumatycznego, *Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Informatyki, Łódź*, nr 1, 57-70.
2. **Dindorf R., Takosoglu J.** (2006), Szybkie prototypowanie układu sterowania rozmytego serwonapędu elektropneumatycznego, *Pneumatyka*, nr 1.
3. **Dindorf R., Takosoglu J.** (2006), Badanie układu sterowania odtworzeniowego serwonapędu pneumatycznego, *Pneumatyka*, nr 4, 29-31.
4. **Takosoglu J., Dindorf R.** (2007), Positioning and teaching/play-back fuzzy control of electro-pneumatic servo-drive in real time, *Proceedings of 7<sup>th</sup> European Conference of Young Research and Science Workers in Transport and Telecommunications TRANSCOM 2007*, Section 5 Electrical and Electronics Engineering, University of Zilina, Slovak Republic, 199-202.
5. **Takosoglu J. E., Dindorf R. F., Laski P. A.** (2008), Rapid prototyping of fuzzy controller pneumatic servo-system, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* DOI 10.1007/s00170-007-1349-5, Springer-Verlag London Limited.
6. **Łaski P., Dindorf R., Takosoglu J.** (2008), Model bryłowy manipulatora równoległego typu 3RRR z pneumatycznymi aktuatorami mięśniowymi, *Pneumatyka*, nr 3, 7-10.
7. **Dindorf R., Laski P., Takosoglu J.** (2009) Distributed measurements and control system for rapid prototyping of artificial intelligence controller, *Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Measurement 2009*, Institute of Measurement Science, Slovakia, 202-205.

#### POSITIONING OF ELECTRO-PNEUMATIC SERVO-DRIVE WITH DIRECT DISPLACEMENT AND VELOCITY TRANSDUCER

**Abstract:** In the paper a research stand to positioning of electro-pneumatic servo-drive with direct displacement and velocity transducer are presented. The fuzzy logic controller constitute the control system. The performance control of the pneumatic servo-drive with new transducer was checked by means of standard performance index.