

Piotr WOŚ, Ryszard DINDORF, Sebastian MAZUR
POLITECHNIKA ŚWIĘTOKRZYSKA, KATEDRA URZĄDZEŃ MECHATRONICZNYCH,
Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

Układ sterowania serwonapędem elektropneumatycznym przy zastosowaniu laserowej metody pomiaru przemieszczenia

Dr inż. Piotr WOŚ

Praca naukowo autora ukierunkowana jest na adaptacyjne metody sterowania i regulacji napędów płynowych. Stopień doktora w dziedzinie automatyki i robotyki uzyskał w 2008 r. na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach, gdzie jest aktualnie zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Urządzeń Mechatronicznych.



e-mail: wos@tu.kielce.pl

Mgr inż. Sebastian MAZUR

Jest asystentem w Katedrze Urządzeń Mechatronicznych na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Tytuł zawodowy magistra inżyniera uzyskał na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej. Specjalizuje się w zastosowaniu sieci komputerowych w napędach i sterowaniach pneumatycznych i hydraulicznych stosowanych w automatyzacji produkcji.



e-mail: mazurs@tu.kielce.pl

Prof. dr hab. inż. Ryszard DINDORF

Prof. dr hab. inż. Ryszard Dindorf jest profesorem nadzwyczajnym i kierownikiem Katedry Urządzeń Mechatronicznych na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Autor jest wykonawcą wielu prac badawczych i autorem licznych publikacji (książek, monografii, podręczników, skryptów, artykułów i referatów) w zakresie modelowania i symulacji oraz badania i diagnostyki systemów płynowych.



e-mail: dindorf@tu.kielce.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono układ regulacji liniowego serwonapędu elektropneumatycznego, w którym do pomiaru przemieszczenia użyto czujnika laserowego. Zastosowanie takiego czujnika umożliwia wykonanie pomiaru odległości metodą bezkontaktową. W opracowany systemie pomiarowym zastosowano adaptacyjny układ regulacji serwonapędu elektropneumatycznego. Przedstawiono wyniki badań porównawczych dotyczących jakości pozycjonowania przy zastosowaniu laserowej i magnetostrykcyjnej metody pomiaru przemieszczenia serwonapędu.

Słowa kluczowe: serwonapęd elektropneumatyczny, laserowy czujnik przemieszczenia, bezkontaktowy układ pomiarowy.

An electro-pneumatic servo-drive control system using the laser displacement measurement method

Abstract

The paper presents a control system for an electro-pneumatic servo-drive which was used to measure the displacement of a laser distance sensor. The use of this sensor allowed applying the non-contact measurement method. The aim of this study was to develop a measurement system for control of an electro-pneumatic servo-drive. The control system contains an adaptive controller. The paper also presents the results of the positioning quality when using a laser and a magnetostrictive sensor. Laser non-contact sensors are used to accurately measure the length and speed of movement of a device and to optimize the manufacturing process. In laser measuring techniques, there is no need for a continuous contact with the element measured. The basic element of the system is a pneumatic cylinder. This actuator is equipped with a magnetostrictive displacement sensor. Fixing of the magnetostrictive displacement sensor needs changes into the actuator construction. In the case of a pneumatic cylinder, installation of the measuring system is difficult and in many cases impossible. The mounting of the sensor can be a source of the measurement inaccuracy. The laser measurement system can be an alternative to the magnetostrictive method of measuring.

Keywords: electro-pneumatic servo-system, laser displacement sensor, non-contact measurement.

1. Wstęp

Rozwój automatyzacji procesów technologicznych produkcji wywiera potrzebę nieustannych pomiarów różnych wielkości mechanicznych i elektrycznych. Sterowanie procesami produkcyjnymi lub kontrola stanu obiektów wymaga przesyłania sygnałów pomiarowych do układu przetwarzającego z przetworników pomiarowych. W serwonapędach elektropneumatycznych jedną z wielkości pomiarowych jest przemieszczenie elementu wykonawczego. Jest to podstawowa wielkość umożliwiająca prawidłową pracę pozycyjnych układów regulacji.

Do pomiaru przemieszczenia elementów wykonawczych napędów pneumatycznych wykorzystuje się czujniki kontaktowe oraz bezkontaktowe, gdy połączenie mechaniczne w układzie jest utrudnione. Metody bezkontaktowe pomiaru odległości wykorzystują czujniki wiroprowodowe, pojemnościowe, ultradźwiękowe oraz optyczne. W ostatnim okresie do pomiaru położenia i przemieszczenia serwomechanizmów pneumatycznych i hydraulicznych stosuje się z powodzeniem magnetostrykcyjne czujniki pomiarowe. Efekt magnetostrykcyjny polega na powstaniu odkształceń przewodnika pod wpływem działania zewnętrznego pola magnetycznego. Zjawisko to występuje w materiałach ferromagnetycznych np. żelazo, nikiel czy kobalt. Pomiar przy zastosowaniu takiego przetwornika odbywa się za pomocą mierzenia czasu przebiegu fali skrętnej w przewodzie falowym. Fala skrętna generowana jest w miejscu nakładania się pól magnetycznych przewodu falowego i ruchomego magnesu po wcześniejszym podaniu impulsu prądowego. Chociaż sama zasada działania wykorzystuje metodę bezkontaktową to sposób zamocowania w serwonapędzie (zewnętrzny lub wewnętrzny) powoduje, że elementy mechaniczne podatne są na rozkalibrowanie wywołane np. poślizgiem, luzem i sztywnością elementów składowych [2, 3]. Na błędy pomiarowe elementów mechanicznych ma wpływ rodzaj zastosowanego materiału konstrukcyjnego oraz warunki panujące na linii produkcyjnej. Fizyczny kontakt z obiektem pomiarowym wprowadza dodatkową komplikację w budowie samego serwomechanizmu. Integracja połączenia mechanicznego powoduje utrudnienia przy jego wykonaniu (wykonanie dodatkowych zamocowań, uszczelnień itp.), podraża produkt i często uniemożliwia jego zastosowanie w zintegrowanych systemach napędowych. Dlatego coraz częściej w przemyśle wykorzystuje się bezkontaktowe metody pomiarowe. Zasada bezkontaktowego pomiaru zabezpiecza czujnik pomiarowy przed zużyciem, ponieważ nie ma on żadnego fizycznego kontaktu z obiektem. Do jednych z tych metod możemy zaliczyć pomiary laserowe. Technologia bezdotykowych czujników laserowych jest metodą pomiarową dla wielu zastosowań w przemyśle. Do nich należą ciągłe pomiary długości i prędkości poruszających się produktów, systemy kontrolno-pomiarowe dla urządzeń, regulacja prędkości i pozycjonowanie [4].

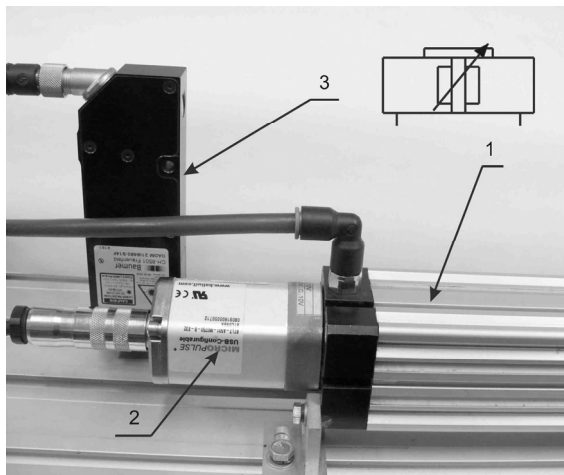
Laserowe czujniki bezdotykowe mogą być stosowane w celu dokonywania dokładnych pomiarów długości i prędkości ruchu wyrobu oraz do optymalizacji procesu wytwórczego. W klasycznych rozwiązaniach mechanicznych do pozycjonowania wykorzystywane są enkodery obrotowe lub tachometry, które mogą powodować np. problemy kalibracyjne. W laserowych technikach pomiarowych, nie ma potrzeby stałego kontaktu z elementem mierzonym. Taki system pomiarowy jest zazwyczaj skalibrowany na początku procesu, a brak ruchomych części mechanicznych powoduje jego stosunkowo dużą niezawodność.

Do sensorów optycznych możemy zaliczyć czujniki laserowe triangulacyjne i typu TOF (Time Of Flight). Laserowe czujniki wykorzystują diodę laserową, która wyświetla plamkę promienia lasera na powierzchni mierzonego przedmiotu. Światło odbite widzialnej plamki zostaje zobrazowane przy pomocy światłoczułego obiektu. Przy zastosowaniu odpowiedniego układu optycznego, każda zmiana pozycji plamki laserowej jest obrazowana na elemencie światłoczułym (CMOS lub CCD). Niektórzy producenci czujników laserowych wyposażają je w układy eliminacji wpływu tła na wielkości pomiarowe. Pomiar odległości mogą być wyznaczone z bardzo dużą dokładnością w zakresie kilku mikrometrów. W sensorach typu TOF, podobnie jak w ultradźwiękowych, bezpośrednio mierzy się czas przelotu impulsu świetlnego - między czujnikiem i obiektem.

2. Budowa stanowiska badawczego

Podstawowym założeniem pracy jest wykazanie możliwości zastosowania czujnika laserowego do pomiaru przemieszczenia serwonapędu elektrohydraulicznego, który jest integralną częścią jego pozycyjnego systemu sterowania. Pomiar taki jest alternatywą dla pomiaru przemieszczenia przy zastosowaniu czujnika magnetostrykcyjnego. Na rysunku 1 przedstawiono widok układu pomiarowego przemieszczenia serwonapędu.

Elementem podstawowym układu jest beztłoczyskowy siłownik pneumatyczny (1). Siłownik ten został wyposażony w magnetostrykcyjny czujnik przemieszczenia (2).

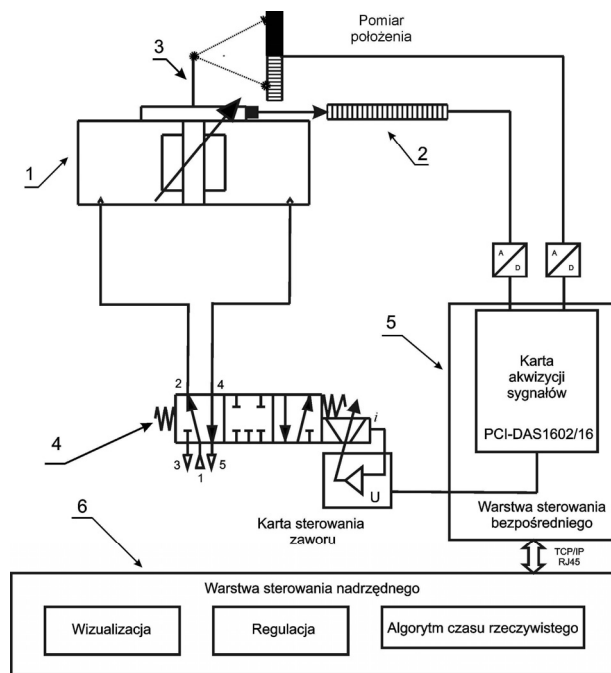


Rys. 1. Stanowisko pomiarowe położenia serwonapędu elektropneumatycznego: 1 - siłownik beztłoczyskowy (Festo DGP), 2 - magnetostrykcyjny przetwornik położenia (Baluff BTL7 - A501), 3 - laserowy triangulacyjny czujnik położenia (Baumer OADM 21)

Fig. 1. Test-stand for electro-pneumatic servo-system

Zamocowanie czujnika magnetostrykcyjnego wymaga ingerencji w konstrukcję siłownika. W przypadku siłowników pneumatycznych montaż takiego typu układu pomiarowego jest utrudniony, a w wielu przypadkach niemożliwy. Wówczas stosuje się układy pomiarowe montowane na obudowie siłownika lub w jego pobliżu. Montaż taki wymaga zastosowania dodatkowych elementów konstrukcyjnych tj. uchwytów i obejm. Elementy te są kłopotliwe dla konstrukcji i mogą być źródłem niedokładności pomiarowych. Dlatego, aby tego uniknąć, dodatkowo wyposażono stanowisko w laserowy czujnik przemieszczeń (3). Czujnik taki

zamontowany na zewnątrz serwonapędu (1) dokonuje pomiaru przemieszczenia metoda bezkontaktową (czujnik triangulacyjny).

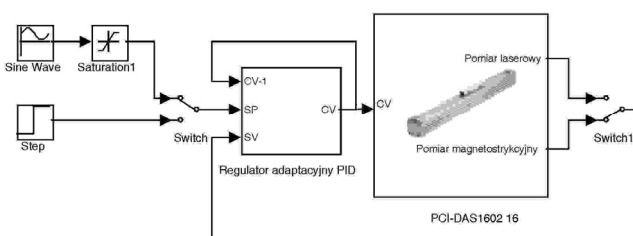


Rys. 2. Schemat układu z regulacją położenia serwonapędu
Fig. 2. Schematic diagram of the electro-pneumatic control system

Czujniki tego typu charakteryzuje większa odporność na warunki środowiskowe (na przykład zmiany wilgotności oraz ciśnienia) w porównaniu do sensorów pojemnościowych i ultradźwiękowych. Do ich zalet można również zaliczyć dużą dokładność (4µm) i bardzo mały czas pomiaru (< 900 µs). W porównaniu z pozostałymi typami czujników najważniejszą własnością jest możliwość ich zamontowania w większej odległości od obiektu, niż w przypadku pozostałych typów czujników. Zastosowany beztłoczyskowy siłownik pneumatyczny (1) sterowany jest zaworem proporcjonalnym (4) typu MPYE-5-1/8-HF-010-B firmy Festo.

W skład stanowiska wchodzi również zestaw komputerowy w układzie sterowania nadrzędnego (5, 6) zaopatrzonego w oprogramowanie Matlab/Simulink (rys. 2). Komputer umożliwiający realizację sterowania bezpośredniego wyposażony jest w karty przetworników C/A i A/C typu PCI-DAS1602/16 firmy Measurement Computing Corporation. Karty wraz z przetwornikami położenia tworzą układ pomiarowy. Zaimplementowane oprogramowanie umożliwia analizę efektywności projektowania układów sterowania poprzez opracowanie metod i technik identyfikacji obiektów i ich modeli matematycznych w warunkach *off-line* i czasie rzeczywistym [1].

W pracy zaproponowano rozwiązanie zadania sterowania i regulacji według schematu blokowego przedstawionego na rysunku 3. Przy projektowaniu sterownika napędu elektropneumatycznego zastosowano adaptacyjny regulator PID [5].



Rys. 3. Schemat układu sterowania - Matlab/Simulink
Fig. 3. The Scheme of Control Agreement - Matlab/Simulink

3. Akwizycja danych pomiarowych i kryteria oceny wyników badań

Występujące błędy pozycjonowania są miarą dokładności położenia serwonapędu. W serwonapędach elektropneumatycznych zależą one od rozdzielczości i dokładności układów pomiarowych, odkształceń elementów napędu, własnego obciążenia masowego, siły tarcia w połączeniach ruchowych, nastaw i wydajności układu sterowania i regulacji. Celem układu regulacji automatycznej jest minimalizacja uchybu regulacji powstającego w wyniku działania zakłóceń na obiekt regulacji lub na skutek zmian sygnału zadane- go.

W badaniach eksperymentalnych sygnały pomiarowe pochodzą z laserowego i magnetostrykcyjnego czujnika pomiarowego położenia, a następnie po dyskretyzacji sygnałów rejestrowane w sposób cyfrowy. Cały proces pobierania sygnałów z czujników składa się z przekształcenia wielkości mechanicznych na elektryczne. Wielkości te za pomocą karty akwizycji danych i systemu komputerowego i pomiarowych zostają przekształcone do postaci cyfrowej. W celu otrzymania optymalnego wyniku pomiarowego producenci wyposażają kontrolery czujników w filtry bazujące na algorytmach tj.: średnia ważona, średnia wykładnicza i mediana.

Przedstawione w dalszej części pracy charakterystyki (rys. 4 i rys. 5) w sposób graficzny pokazują przebiegi czasowych odpowiedzi układu regulacji na określony sygnał wejściowy. Znajomość charakterystyk czasowych układu umożliwia ocenę jakości sterowania na podstawie wybranych wskaźników. Wyznaczono podstawowe wskaźniki charakteryzujące jakość procesu regulacji serwonapędu: błąd regulacji $e(t)$, przeregulowanie κ_p , czas regulacji t_r , odchyłka nadążania sygnału położenia δ_y :

- błąd regulacji $e(t)$,

$$e(t) = |y_{zad} - y(t)|, \quad (1)$$

- przeregulowanie (maksymalna odchyłka regulacji),

$$\kappa_p = y_{max} - y_{zad}, \quad (2)$$

- bezwzględna odchyłka nadążania sygnału położenia δ_y ,

$$\delta_y = \frac{\sum_{i=1}^N |y_{zad}[i] - y[i]|}{N}, \quad (3)$$

gdzie:

y – położenie,
 N – liczba punktów pomiaru.

Czas regulacji t_r , zdefiniowany został jako czas trwania stanu przejściowego, liczony od momentu wywołanego skokową zmianą wielkości zadanej, do trwałego zmniejszenia się błędu regulacji $e(t)$ poniżej określonego progu.

Aby uwzględnić skuteczność regulacji dodatkowo zastosowano całkowite kryteria jakości regulacji:

- całka z kwadratu błędu regulacji ISE (*Integral of Square error*),

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt, \quad (4)$$

- całka z iloczynu czasu i kwadratu błędu regulacji $ITSE$ (ang. *Integral of Time and Square Error*),

$$ITSE = \int_0^{\infty} t e^2(t) dt, \quad (5)$$

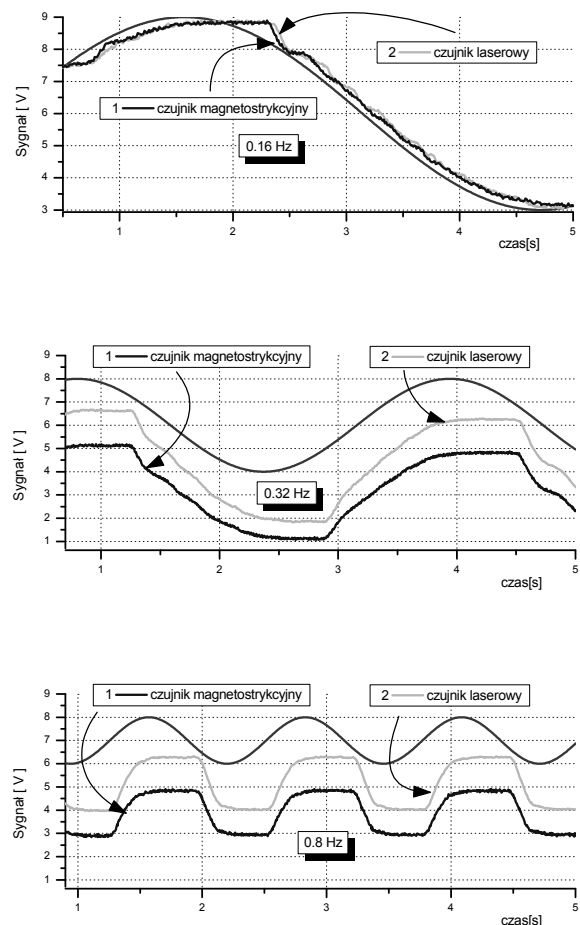
Im mniejszą wartość będzie można nadać kryterium ISE , tym układ będzie cechował się lepszą, dynamiczną jakością regulacji. Aby określić prędkość zanikania błędu regulacji zastosowano również całkowite kryterium iloczynu czasu i kwadratu błędu regulacji $ITSE$ (5). Kryterium to wykazuje na szybkie zanikanie błędu. Dodatkowo wyniki w postaci liczbowej umożliwiają łatwe porównanie efektów działania procesów regulacji.

4. Badania własności dynamicznych

Zadanie polegało na porównaniu jakości układu regulacji serwonapędu elektropneumatycznego dla dwóch różnych metod pomiarowych. Badania dokładności pozycjonowania przeprowadzono wykonując przemieszczenie tłoka siłownika według trajektorii sinusoidalnej o amplitudzie y_{zad} i okresie T_{zad} i przemieszczenie tłoka siłownika z położenia początkowego y_{start} do zadanego y_{zad} . Wszystkie pomiary wykonano przy ciśnieniu zasilania 0,4 MPa.

4.1. Wpływ częstotliwości trajektorii sinusoidalnej

W pracy zbadano wpływ częstotliwości ruchu tłoka siłownika pneumatycznego na własności dynamiczne układu regulacji przy pomiarze przemieszczenia metoda magnetostrykcyjną i laserową. Na rysunku 4 przedstawiono przebiegi procesu regulacji dla wybranych częstotliwości ruchu tłoka (0,16 Hz, 0,32 Hz i 0,8 Hz).



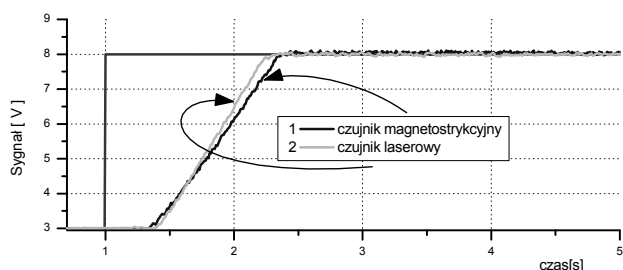
Rys. 4. Przebiegi procesu regulacji dla trajektorii sinusoidalnej (0,16 Hz, 0,32 i 0,8 Hz) z wykorzystaniem czujników przemieszczenia:

1-magnetostrykcyjny, 2- laserowy
Fig. 4. Sinusoidal trajectory control with use of magnetostrictive (1) and laser (2) displacement sensor

Analizując wykresy na rysunku 4 można stwierdzić, że również i w tym przypadku jakość regulacji w układach z zastosowaniem magnetostrykcyjnego i laserowego czujnika przemieszczenia jest porównywalna.

4.2. Pozycjonowanie serwonapędu - regulacja przestawna

Na rysunku 5 przedstawiono pozycjonowanie serwonapędu elektropneumatycznego dla regulacji przestawnej. Pomiar przemieszczenia tłoka siłownika przeprowadzono przy zastosowaniu czujnika magnetostrykcyjnego i laserowego.



Rys. 5. Przebiegi procesu regulacji z wykorzystaniem czujników przemieszczenia: 1 - magnetostrykcyjny, 2 - laserowy

Fig. 5. Experimental results of positioning with magnetostrictive (1) and laser (2) displacement sensor

W tabeli 1 przedstawiono wartości wielkości charakteryzujących jakość procesu regulacji serwonapędu.

Tab. 1. Wyniki jakości regulacji przestawnej serwonapędu elektropneumatycznego; 1 - magnetostrykcyjny, 2 - laserowy

Tab. 1. Control quality results

Czujnik	K_{\max} [mm]	t_r [s]	e_{\min} [mm]	δ_y [mm]	I_{SE}	$ITSE$
1	2,46	1,391	1,75	1,97	397,5	1627
2	2,23	1,324	1,69	2,02	384,2	1536

Przy analizie wykresów i porównawczych wskaźników jakości można stwierdzić, że dla regulacji przestawnej wskaźniki jakości są minimalnie lepsze dla laserowego pomiaru przemieszczenia. Przebiegi krzywych położenia przy zastosowaniu obu rodzajów pomiarów są podobne. Natomiast różnice wynikają z jakości pomiarów, gdyż w obu układach zastosowano ten sam regulator adaptacyjny [5]. Wybrane wskaźniki jakości są porównywalne, co potwierdza możliwość zastosowania laserowej metody pomiarowej do zastosowań praktycznych w regulacji serwonapędów elektropneumatycznych.

5. Podsumowanie

O celowości użycia sensora laserowego w zastosowaniu do określenia pozycji tłoka siłownika pneumatycznego decyduje kilka kwestii. Przede wszystkim są to czujniki bezkontaktowe,

przez co można je łatwo zamontować na serwomechanizmie bez konieczności ingerencji w jego konstrukcję. Taki czujnik może być zamontowany na zewnątrz poza samym napędem, a ruchoma płaszczyzna odbiciowa może być wyznaczona na stosunkowo małej powierzchni. O wielkości tej powierzchni decyduje wielkość plamki lasera. Najmniejsza plamka lasera występuje w środkowej strefie pomiarowej, a największa na jej końcach. Dodatkowo, średnica plamki wydłuża się, jeśli promień lasera nie pada prostopadle do płaszczyzny odbiciowej. Wykonany w ten sposób pomiar nie będzie zgodny z rzeczywistą odległością czujnika od obiektu. Brak prostopadłości powierzchni może spowodować konieczności wprowadzenia poprawki do wyniku pomiaru przemieszczenia serwonapędu. Przy specjalnych rozwiązaniach czujników laserowych powierzchnia odbiciowa może być różnokolorowa i odbłaskowa.

Przy ich montażu należy uwzględnić również tzw. strefę martwą. Strefa ta to minimalna odległość od czujnika, w której pomiary są niemożliwe i spowodowana jest budową układu optycznego czujnika. Długość tej strefy warunkuje sposób zamontowania czujnika w układzie pomiarowym. Ponadto czujnik powinien mieć wystarczająco duży zakres pomiarowy, dostosowany do zakresu ruchu serwonapędu. Aby zapewnić prawidłowe funkcjonowanie czujnika optycznego należy zachować dobrą widoczność w obrębie układu optycznego. Na drodze promienia laserowego nie mogą występować żadne przeszkody. Na dokładność pomiarów mogą również wpływać takie czynniki jak: zanieczyszczenie układu optycznego, zapylenie powietrza i drgania. Dodatkowo nierówności powierzchni rzędu mikrometrów powodują zakłócenia wiązki lasera, co przekłada się na błędne wyniki pomiaru. Pomimo to, tego typu metoda doskonale nadaje się do pomiarów wykonywanych z wysoką dokładnością i rozdzielczością. Przy prawidłowej integracji ustroju pomiarowego czujnika z serwonapędem z powodzeniem może być alternatywą dla przetwornika magnetostrykcyjnego.

6. Literatura

- [1] Dindorf R., Łaski P., Takosoglu J., Woś P.: Rozproszony system sterowania serwonapędów płynowych, *Hydraulika i Pneumatyka*, Nr 4, s. 6-7, 2009.
- [2] Dindorf R., Woś P.: Adaptive control of an electro-hydraulic servo-system, *International Journal of Applied Mechanics and Engineering* Vol.15, No 3, pp. 657-666, 2010.
- [3] Takosoglu J., Dindorf R., Łaski P., Woś P.: Pozycjonowanie siłownika serwonapędu elektropneumatycznego z bezpośrednim pomiarem przemieszczenia i prędkości, *Acta Mechanica et Automatica* Vol.4, No 1, s. 86-91, 2010.
- [4] Tan Y.C., Ripin Z.M.: Technique of Measuring Piston Secondary Motion Using Laser Displacement Sensors, *Experimental Mechanics* November 2012, Volume 52, Issue 9, pp 1447-1459.
- [5] Woś P., Dindorf R.: Adaptive control of a parallel manipulator driven by electro-hydraulic cylinders, *International Journal of Applied Mechanics and Engineering* Vol.17, No 3, pp. 1061-1071, 2012.

otrzymano / received: 20.03.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.05.2013

artykuł recenzowany / revised paper