

## Tomasz ŻABIŃSKI, Leszek TRYBUS

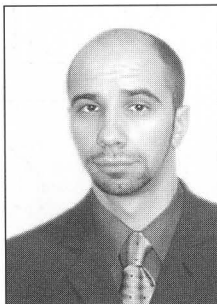
POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA INFORMATYKI I AUTOMATYKI

# Nastawianie kontrolera serwomechanizmu cyfrowego

### Mgr inż. Tomasz ŻABIŃSKI

Dyplom magistra inżyniera uzyskał w 1998 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Rzeszowskiej. Bezpośrednio po studiach został asystentem w Katedrze Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej. Zajmuje się teorią sterowania, układami mechatronicznymi i zastosowaniami informatyki. Przygotowuje rozprawę doktorską w Katedrze Automatyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

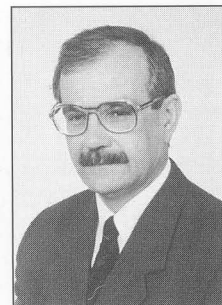
e-mail: tomz@prz-rzeszow.pl



### Prof. dr hab. inż. Leszek TRYBUS

Kierownik Katedry Informatyki i Automatyki Politechniki Rzeszowskiej. Ukończył AGH Kraków (1970), gdzie również uzyskał doktorat, habilitację i tytuł. Od ukończenia studiów pracuje w Politechnice Rzeszowskiej. Autor ok. 130 publikacji. Zajmuje się regulatorami mikroprocesorowymi, rozproszonymi systemami sterowania i zastosowaniami informatyki.

e-mail: ltrybus@prz-rzeszow.pl



### Streszczenie

Przedstawiono metodę doboru nastaw dyskretnego regulatora PID stosowanego w specjalizowanych kontrolerach ruchu serwomechanizmów cyfrowych. Do eksperymentów wykorzystano trójosiowy stół pozycjonujący, którego serwomechanizmami sterował układ MC1401A firmy PMD. Komputer nadrzędny pracował w środowisku RTLinux.

### Abstract

A method for tuning of discrete PID controller used in dedicated motion controllers for digital servos is presented. Three-axis positioning platform with servos controlled by MC1401A controller from PMD company is used for experiments. Supervisory computer employs RTLinux environment.

**Słowa kluczowe:** dyskretny regulator PID, serwomechanizm cyfrowy, strojenie

**Keywords:** discrete PID controller, digital servo, tuning

## 1. Wstęp

Przedstawiono metodę doboru nastaw dyskretnego regulatora PID stosowanego do sterowania serwomechanizmami w układach mechatronicznych, opartą na liniach pierwiastkowych Evansa [1]. Umożliwia ona uzyskanie przebiegów aperiodycznych krytycznych z założonym czasem regulacji. Metodę wykorzystano dla doboru nastaw regulatora stosowanego w kontrolerze MC1401A amerykańskiej firmy PMD. Kontrolery takie występują w różnorodnych systemach sterowania ruchu poczynając od obrabiarek CNC po sprzęt medyczny. Główne aplikacje dotyczą pozycjonowania efektora oraz śledzenia zadanej trajektorii. Regulator PID stosowany w MC1401A posiada postać typową dla szerokiej grupy kontrolerów przemysłowych.

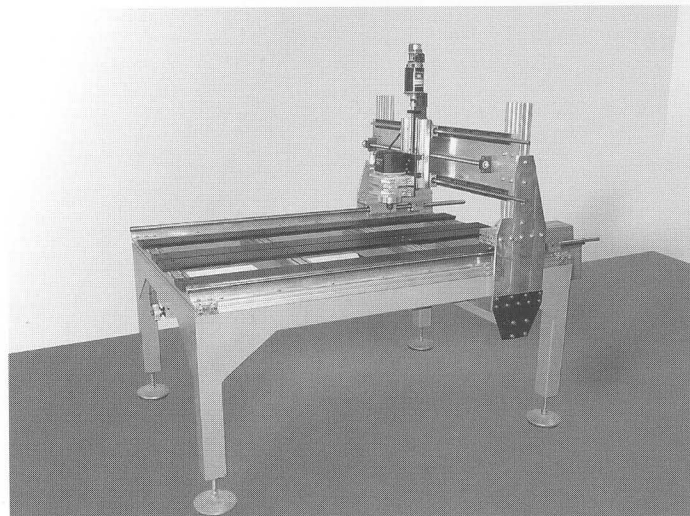
Metodę zweryfikowano w prototypowym systemie sterującym trójosiowym stołem pozycjonującym (obrabiarka CNC).

Większość obliczeń i symulacji zrealizowano za pomocą pakietów Maple V oraz Matlab/Simulink.

## 2. Struktura systemu sterowania

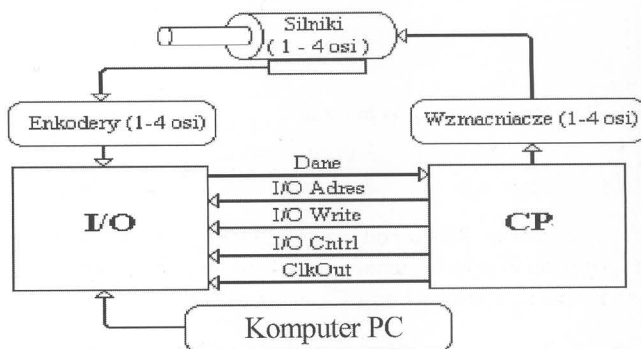
Badany układ laboratoryjny składa się z trójosiowego stołu pozycjonującego (rys. 1) wyposażonego w silniki prądu stałego z magnesami trwałymi, wzmacniacze mocy z regulatorami prądu oraz enkodery obrotowe. Elementami transformującymi ruch są przekładnie typu śruba-nakrętka (samohamowna w osi Z oraz śruby toczne z obiegami kulek w osiach X i Y). Stół pozycjonujący zawiera prowadnice toczne z szyną profilową albo wałkiem, układ bezpośredniego napędu śruby poprzez sprzęgło oldham (oś Z) oraz dwa układy napędu pośredniego poprzez przekładnie typu koło zębate - pasek (osie X i Y).

System sterowania tworzą: komputer PC pracujący pod kontrolą Real-Time Linux, karta rozszerzeń 5650A firmy TECH-80 zawierająca kontrolery MC1401A oraz oprogramowanie warstwy nadrzędnej (RTLinux, Linux i Win32).



Rys. 1. Trójosiowy stół pozycjonujący  
Fig. 1. Three-axis positioning platform

Układ MC1401A jest specjalizowanym kontrolerem ruchu (motion processor) przeznaczonym do sterowania układami wyposażonymi w silniki DC, pracującym w konfiguracji przedstawionej na rys. 2.



Rys. 2. Typowa konfiguracja systemu z MC1401A  
Fig. 2. Typical configuration of system with MC1401A

Fizycznie składa się on z dwóch układów - procesora komend CP oraz wejścia/wyjścia I/O, wykonanych w technologii CMOS i umieszczonych w osobnych obudowach. Programowanie ruchu odbywa się z poziomu komputera nadrzędnego poprzez zestaw 96 wbudowanych komend [2, 3].

Regulator stosowany w MC1401A [3] zawiera trzy elementy: blok PID pracujący w pętli sprzężenia zwrotnego, przesunięcie (bias) oraz modułysterowania wstępnego (feedforward) dla prędkości. Sterowanie określa wzór

$$u = k_{p\_PMD} E_n + \underbrace{\frac{k_{i\_PMD}}{256} \sum E_n + k_{d\_PMD} (E_n - E_{n-1})}_{PID} + \underbrace{\frac{K_{vff}}{4} TV + MB}_{feedforward} \quad (1)$$

gdzie:

$E_n$  - błąd regulacji w chwili  $n$

$k_{p\_PMD}, k_{i\_PMD}, k_{d\_PMD}$  - nastawy regulatora PID

$MB$  - przesunięcie

$K_{vff}$  - nastawa członu feedforward

$TV$  - prędkość zadana

Zarówno sygnał  $u$  jak i wartości nastaw są liczbami całkowitymi.

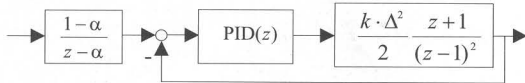
Poziomo ograniczenia sygnału sterującego oraz całki może być modyfikowany przy pomocy komend : SET\_MTR\_LMT, SET\_I\_LMT.

Nadrzędna warstwa systemu sterowania umożliwia sieciowe (sockets, DCOM) zlecenie zadań obróbki, konfigurowanie oraz monitorowanie pracy układu. Urządzenie wyposażono w moduł realizacji komend języka G umożliwiający współpracę systemu z typowymi programami CAM (np. ArtCAM).

### 3. Serwomechanizm dyskretny

Schemat blokowy serwomechanizmu pokazano na rys. 3. Zawiera on regulator pozycji typu PID, dyskretną transmitancję silnika

będącą odpowiednikiem podwójnego integratora  $\frac{k}{s^2}$  oraz filtr wstępny eliminujący przeregulowanie.  $\Delta$  oznacza czas cyklu.



Rys. 3. Schemat blokowy dyskretnego układu regulacji  
Fig. 3. Structure of digital control system

Ze wzoru (1) otrzymuje się

$$PID(z) = k_p + k_i \frac{z\Delta}{z-1} + k_d \frac{z-1}{z\Delta} \quad (2)$$

$$k_{p\_PMD} = k_p, \quad k_{i\_PMD} = 256 \cdot \Delta \cdot k_i, \quad k_{d\_PMD} = \frac{k_d}{\Delta}$$

Należy dobrać takie nastawy  $k_p, k_i, k_d$ , aby uzyskać przebiegi aperiodyczne krytyczne z zadaniem czasem regulacji  $t_r$ . W tym celu zostanie zaadoptowany tok projektowania opisany w [4, 5]. Ponieważ warunki projektowania są dwa, a niewiadomych trzy należy przyjąć dodatkowe założenie. Biorąc

$$k_d = \frac{1}{4} \frac{k_p^2}{k_i} \quad (3)$$

wzór (2) przekształca się do postaci

$$PID(z) = k_r \frac{(z-\alpha)^2}{z(z-1)}, \quad k_r = \frac{1}{4} \frac{(k_p + 2k_i\Delta)^2}{k_i\Delta}, \quad \alpha = \frac{k_p}{k_p + 2k_i\Delta} \quad (4)$$

Jest to regulator PID o podwójnym zerze, podobnie jak w znanych regułach Zieglera-Nicholsa [6]. Występujące tu parametry  $k_r$  i  $\alpha$  związane są z parametrami (2) zależnościami

$$k_p = 2k_r\alpha(1-\alpha), \quad k_i = \frac{k_r(\alpha-1)^2}{\Delta}, \quad k_d = \alpha^2 k_r \Delta \quad (5)$$

Równanie charakterystyczne układu z rys. 3, gdzie  $PID(z)$  określa wzór (4), ma postać

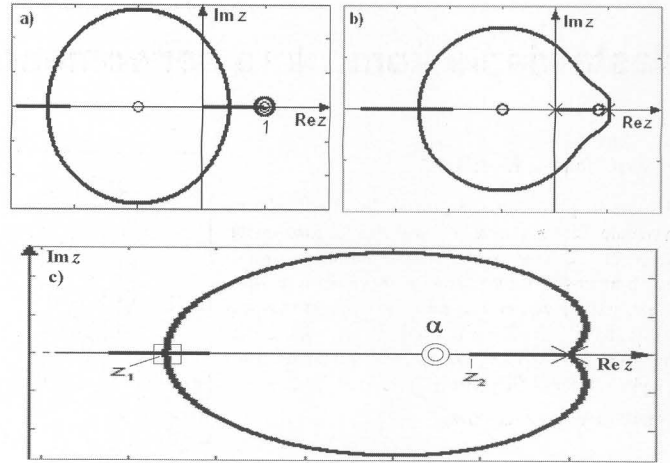
$$z(z-1)^3 + K(z-\alpha)^2(z+1) = 0 \quad (6)$$

przy  $K = k_r \frac{\Delta^2}{2}$ . Jest to równanie IV rzędu, którego linie pierwiastkowe dla  $\alpha > 0.91$  i  $\alpha < 0.91$  pokazano na rys. 4a, b. Rys. 4c przedstawia szczegółowo mały owal z rys. 4a.

Numerycznie można wyznaczyć przedział

$$\alpha \in (0.91, 1) \quad (7)$$

w którym linie pierwiastkowe wyglądają jak na rys. 4a. Granica 0.91 wynika z kryterium doboru kroku  $\Delta$  ze względu na stabilność (wzór (13) dalej).



Rys. 4. Linie pierwiastkowe dla  $\alpha$ : (a) bliskiego 1 - wielki zakres K, (b) mniejszego od 0.91, (c) bliskiego 1 - średni zakres K  
Fig. 4. Root locus plot for  $\alpha$ : (a) near 1 - large K, (b) less than 0.91, (c) near 1 - medium K

Przebiegi aperiodyczne krytyczne uzyskuje się dobierając wzmocnienie dla punktu rozwidlenia  $z_1$  linii pierwiastkowych [1] (rys. 4c). Wartość  $z_1$  otrzymuje się rozwiązując numerycznie równanie

$$-z^3 + (3\alpha - 4)z^2 + (4\alpha - 1)z - \alpha = 0 \quad (8)$$

Odpowiadające mu wzmocnienie  $K_1$  wyznacza się ze wzoru

$$K_1 = - \frac{z(z-1)^3}{(z-\alpha)^2(z+1)} \Big|_{z=z_1} \quad (9)$$

Wyniki pokazano na rys. 5a, b.

Dominujący biegun  $z_2$ , który w funkcji  $\alpha$  pokazano na rys. 5c, określa czas regulacji zgodnie z oszacowaniem  $t_r \cong \frac{4\Delta}{|z_2 - 1|}$ .

Ze względu na niewielką różnicę (max. 2.5%) pomiędzy zerem  $\alpha$  i biegunem  $z_2$  (rys. 5c) można przyjąć

$$\alpha \cong 1 - \frac{4\Delta}{t_r} \quad (10)$$

Zależność (10) jest ostatnim wzorem potrzebnym do projektowania. Dobór nastaw serwomechanizmu wymaga określenia wartości  $\alpha$  ze wzoru (10), wyznaczenia wzmocnienia  $K_1$  z nomogramu na rys. 5a, oraz obliczenia wzmocnienia regulatora jako

$$k_r = \frac{2K_1}{k\Delta^2} \quad (11)$$

Wartości nastaw układu MC1401A uzyskuje się ze wzorów

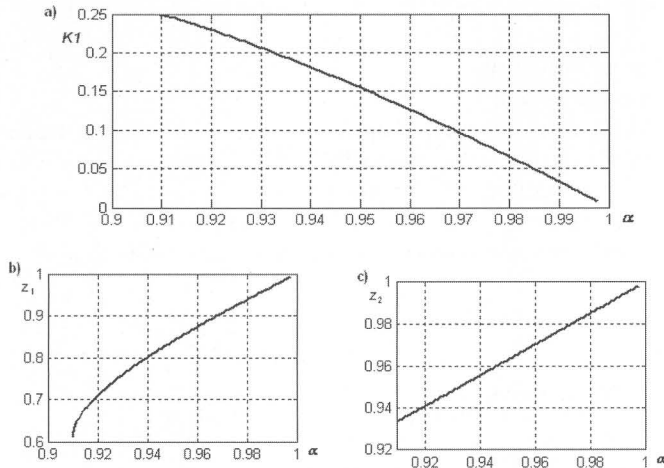
$$k_{p\_PMD} = 2k_r\alpha(1-\alpha), \quad k_{i\_PMD} = 256k_r(\alpha-1)^2, \quad k_{d\_PMD} = \alpha^2 k_r \Delta \quad (12)$$

Jak widać, przedstawiony algorytm strojenia jest stosunkowo prosty.

Jedynie przy dostatecznie małym cyklu regulatora  $\Delta$  linie pierwiastkowe mają postać jak na rys. 4a [5]. Ze wzrostem  $\Delta$  następuje zmniejszenie  $\alpha$ , które powoduje, że lewy i prawy owal zbliżają się do siebie i w efekcie przy pewnej granicznej wartości  $\Delta_{\max}$  stykają się. Dalszy wzrost  $\Delta$  prowadzi do pojawienia się biegunów zespolonych (rys. 4b) czyli przebiegów oscylacyjnych. Numerycznie można wyznaczyć graniczną wartość  $\alpha_{\min} = 0.91$  i po uwzględnieniu (10) odpowiadający jej stosunek  $\Delta_{\max} / t_r$ . Daje to następujące kryterium doboru kroku  $\Delta$

$$\Delta < \frac{1}{45} t_r \quad (13)$$

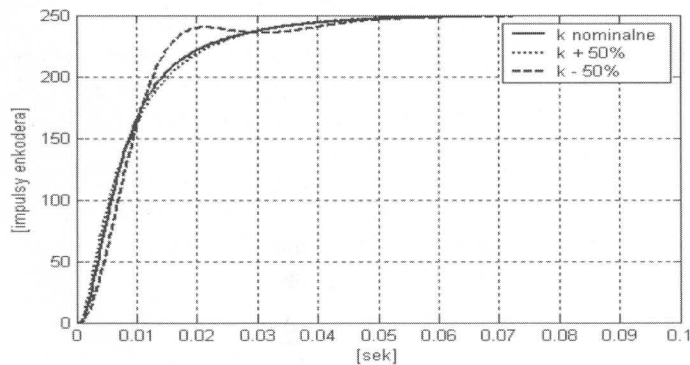
Ze względu na zmiany wzmocnienia serwomechanizmu w przypadku realizowania zadań obróbki strojenie powinno być przeprowadzane dla najmniejszej spodziewanej wartości  $k$ .



Rys. 5. Nomogramy określające: (a) wzmocnienie  $K_1$ , (b) punkt rozwidlenia  $z_1$ , (c) dominujący biegun  $z_2$

Fig. 5. Nomograms of: (a) gain  $K_1$ , (b) breakpoint  $z_1$ , (c) dominant pole  $z_2$

W celu zbadania odporności przeprowadzono eksperymenty symulacyjne dla różnych wzmocnień. Wybrane wyniki uzyskane dla około 50% zmiany  $k$  zawiera rys. 6.



Rys. 6. Badanie odporności na zmiany wzmocnienia

Fig. 6. Study of system robustness due to gain perturbation

Serwomechanizm jest odporny zarówno na wzrost jak i na zmniejszenie wartości wzmocnienia.

## 4. Badania eksperymentalne

Eksperymenty przeprowadzono na prototypowym systemie sterowania stołem pozycjonującym (rys. 1). Przykładowe odpowiedzi dla układu z filtrem wstępnym i bez filtra przedstawiono na rys. 7 (dane:  $\Delta = 0.0004$  s,  $t_r = 0.1$  s i  $k = 736$  [counts/sample]).

Należy wyjaśnić, że układ MC1401A nie zawiera filtra wstępnego postaci jak na rys. 3. Dla zadania pozycjonowania rolę jego może przejąć wbudowany generator trajektorii. Dla zadania śledzenia filtr powinien być elementem systemu nadrzędnego.

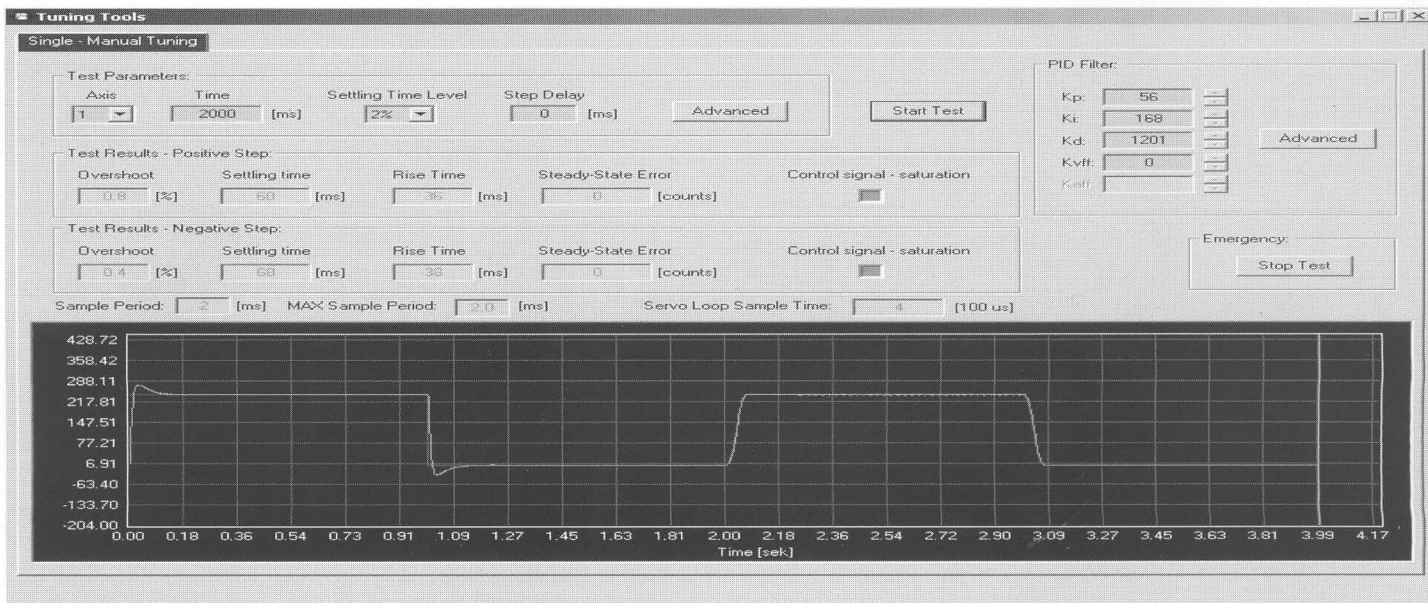
Przedstawiono metodę doboru nastaw regulatora PID stosowanego w specjalizowanych układach sterowania ruchem. Jest ona prosta i dostatecznie odporna.

## 5. Literatura

- [1] G. F. Franklin, J. D. Powell, A. Emami-Naeini: Feedback Control of Dynamic Systems, Third Edition, Addison-Wesley, 1994.
- [2] T. Żabiński, R. Leniowski: Programowo-sprzętowy sterownik ruchu z układami firmy PMD, Automation 2000, Konferencja Naukowo-Techniczna, Warszawa 12-14 kwietnia 2000.
- [3] Family MC1xxx Overview, PMD Corp. www.pmdcorp.com
- [4] W. Irzeński, L. Trybus: Fixed-Gain PID Class Servo for Industrial Robots, Archives of Control Sciences Vol. 1, No. 3-4 (1992).
- [5] Z. Świder: Realizacje cyfrowe algorytmów sterowania i filtracji, Rzeszów 2003.
- [6] L. Trybus: Teoria sterowania, Skrypt, Politechnika Rzeszowska 2005.

**Title:** Tuning controller for digital servo

Artykuł recenzowany



Rys. 7. Pulpit strojenia regulatora i przykładowe przebiegi: pierwszy od lewej - bez filtra wstępnego, drugi - generator trajektorii jako filtr

Fig. 7. Interface of software for tuning controller and the exemplary results: first from the left - without set-point filter, second - trajectory generator as set-point filter