

*XXII Seminarium*

**ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2012**

Oddział Gdański PTETiS

Referat nr 33

**BUDOWA 3-OSIOWEJ MASZyny FREZUJĄCEJ CNC WRAZ Z DOBREM  
PARAMETRÓW REGULATORÓW W TORACH STEROWANIA  
SERWOMECHANIZMÓW**

**Mirosław WŁAS<sup>1</sup>, Jacek JAWORSKI<sup>2</sup>, Bartosz GOTOWALSKI<sup>3</sup>**

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
tel: +48583472337 fax: +48583410880 e-mail: m.wlas@ely.pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk  
e-mail: jjaworski@ely.pg.gda.pl
3. ICT Poland, ul. Chmielna 26, 80-748 Gdańsk  
e-mail: Bartosz.gotowalski@ict.nl

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono proces tworzenia stanowiska laboratoryjnego - maszyny frezującej CNC, której osie poziome napędzane są poprzez serwomechanizmy, zaś oś pionowa napędzana jest przez silnik skokowy. Budowę stanowiska kończy proces programowania maszyny, wraz z doбором parametrów regulatorów w torach sterowania serwomechanizmów. W tym celu zostały wykorzystane kryteria: Hurwitza oraz optimum symetrii. Rezultaty strojenia regulatorów z pomocą omówionych metod są porównywalne z wynikami osiągniętymi przez wbudowany system strojenia opracowany przez producenta techniki napędowej, wykorzystanej w projekcie.

**Słowa kluczowe:** CNC, serwomechanizmy, strojenie regulatorów.

## 1. WPROWADZENIE

Maszyny CNC znajdują zastosowanie w przemyśle jako urządzenia będące połączeniem rozmaitych układów mechanicznych, elektrycznych oraz elektronicznych. Stąd też, zaliczane są do grupy urządzeń mechatronicznych. Jednym z głównych czynników, mających wpływ na ogólną ocenę urządzenia skrawającego, jest jego dokładność. Ta zaś jest determinowana nie tylko poprzez wysoką precyzję wykonania elementów mechanicznych, lecz także dzięki odpowiedniemu systemowi sterowania, który coraz częściej ma również za zadanie eliminować błędy powstające wskutek zużycia narzędzia obróbczego, czy też naglej zmiany gęstości materiału obrabianego.

Z uwagi na coraz wyższe wymagania dokładności w omawianych maszynach, do sterowania poszczególnymi osiami roboczymi często stosuje się serwomechanizmy, które są rozwiązaniem droższym i bardziej skomplikowanym niż silniki skokowe, lecz zapewniają dużo większy stopień dokładności [1,2,3].

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wyników prac związanych z budową stanowiska laboratoryjnego - plotera frezującego trójosiowego o

strukturze bramowej z przesuwą bramą, którego osie poziome napędzane są poprzez serwomechanizmy, zaś oś pionowa napędzana jest przez silnik skokowy. Dostawcą techniki napędowej i modułów sterujących jest firma B&R. W serwomechanizmach zastosowane zostały silniki synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSM).

## 2. BUDOWA STANOWISKA

### 2.1. Konstrukcja maszyny

Jak już wspomniano, zbudowana maszyna cechuje się bramową strukturą geometryczno – ruchową z przesuwą bramą, co zapewnia sztywność całej konstrukcji i stabilne umocowanie przedmiotu na stole. Osie poziome napędzane są poprzez serwomechanizmy, zaś oś pionowa – poprzez silnik skokowy o budowie hybrydowej. Jego wykorzystanie jest możliwe dzięki znacznie mniejszym wymaganiom dynamicznym stawianym tej osi.

Konstrukcja nośna została wykonana w oparciu o aluminiowe profile konstrukcyjne, co skutkuje zarówno względnie dużą sztywnością konstrukcji, jak i możliwością łatwej rozbudowy stanowiska. Ze względu na poprawę sztywności części roboczej maszyny, została ona wykonana z wykorzystaniem bloków aluminiowych PA6.

We wszystkich osiach, napęd przenoszony będzie za pośrednictwem śrub kulowo-toczących, łożyskowanych na obu ich końcach. Wg [4] tego typu przekładnia zapewnia względnie dużą sztywność i precyzję ruchu, przy umiarkowanej cenie – warunkiem jest tu wytworzenie naprężenia wstępnego w zespole gwint-nakrętka.

Rolę połączeń prowadnicowych pełnią bloki szynowe z elementami tocznymi. Są one obecnie bardzo popularnym rozwiązaniem dla maszyn precyzyjnych i zapewniają względnie dużą nośność przy niewielkim współczynniku tarcia między elementami ślizgowymi.

Jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących każdą obrabiarkę numeryczną jest stopień jej niedokładności, co w efekcie końcowym determinuje jej cenę. Głównymi elementami opisu stopnia precyzji maszyny

CNC są niedokładności: geometrii konstrukcji, pozycjonowania oraz obróbki. Pierwsze dwie składowe zostały oszacowane już podczas projektowania maszyny, ostatnia z nich – po przeprowadzeniu prób jezdnych. Wyniki zostały przedstawione w pracy [1].

## 2.2. Programowanie sterownika głównego

Układ komunikacyjny maszyny składa się ze sterownika zintegrowanego z panelem operatorskim Power Panel 440, sterowników serwonapędów ACOPOS i modułu komunikacyjnego Ethernetu przemysłowego POWERLINK, który zapewnia spełnienie przez system wymagań czasu rzeczywistego. Cały system wraz z aplikacją wizualizacyjną może być utworzony za pośrednictwem środowiska programistycznego Automation Studio firmy B&R.

Poszczególne osie napędowe sterowane są z pomocą podprogramów, zawierających głównie parametry konfiguracyjne i funkcje inicjalizujące. Ponadto, zaimplementowano w nich funkcje zdolne do wykonywania prostych instrukcji sterujących, takich jak: rozpoczęcie ruchu z określoną prędkością i w żądanym kierunku, zatrzymanie, obsługa błędów. Wykonywanie złożonych ruchów skrawających możliwe jest dzięki implementacji programu realizującego sterowanie numeryczne. W tym celu program wczytuje plik wsadowy użytkownika (w formie g-kodów). Przeprowadza analizę instrukcji sterujących i rozpoczyna ich przesył do poszczególnych sterowników ruchu, wraz z istotnymi wartościami parametrów, determinującymi właściwości poszczególnych ruchów skrawających. Dzieje się to przy wykorzystaniu algorytmów wspomagających obróbkę: look-ahead i feed-forward [1].

## 3. DOBÓR PARAMETRÓW REGULATORÓW

### 3.1 Struktura regulacji położenia serwomechanizmu

System sterowania rozważanych serwomechanizmów składa się z dwóch warstw. Pierwszą z nich, będącą jednocześnie warstwą podstawową, jest układ liniowej regulacji składowych prądu, zawierający w swej strukturze człon modulacji szerokości impulsów. W celu zapewnienia bezpieczeństwa pracy serwomechanizmu, środowisko Automation Studio nie umożliwia użytkownikowi jakiegokolwiek ingerencji w wartości parametrów regulatorów prądu.

Druga warstwa, będąca warstwą nadrzędną, składa się z generatora trajektorii ruchu wyliczającego trajektorie zadane  $(\theta_{1z}-\theta_{nz})$  dla poszczególnych osi układu oraz regulatorów: położenia  $R_\theta$  i prędkości  $R_\omega$ . W klasycznym układzie regulacji kaskadowej, regulator prędkości jest najczęściej regulatorem typu proporcjonalno-całkującego, zaś regulator położenia – typu proporcjonalnego.

### 3.2 Dobór nastaw regulatorów

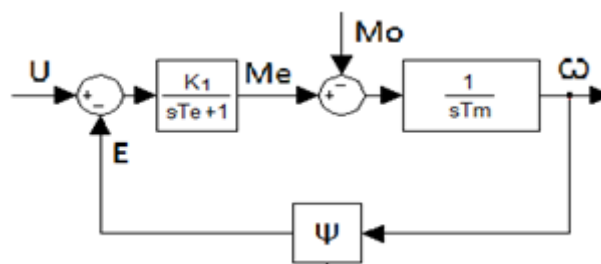
Do doboru parametrów regulatorów prędkości i położenia wykorzystano odpowiednio: kryterium optimum symetrii oraz kryterium Hurwitza. Punktem wyjściowym rozważań jest ogólny model silnika elektrycznego (rys. 1), przy założeniu sztywności silnik-przekładnia śrubowa. Część elektryczna maszyny została przedstawiona jako blok inercyjny I rzędu, o wzmacnieniu  $K_1$  oraz elektrycznej stałej czasowej  $T_e$ , znanej dzięki dokumentacji technicznej.

Moment elektromagnetyczny  $M_e$  generowany w maszynie jest proporcjonalny do prądu stojana. Przeciwdziała mu moment oporowy  $M_o$ . Część mechaniczna to inercja I rzędu o stałej czasowej mechanicznej  $T_m$ . Może być ona wyznaczona w oparciu o następujący wzór, przy pominięciu wpływu momentu oporowego [5]:

$$T_m = J_A \frac{\omega_N^2}{P_N} \quad (1)$$

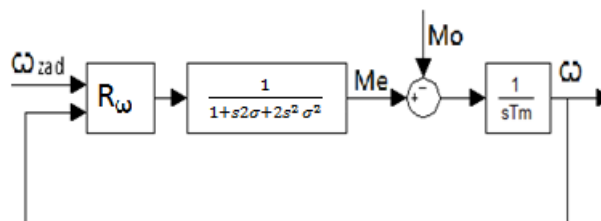
gdzie:  $J_A$  - suma bezwładności układu napędowego,  $P_N$  - moc znamionowa silnika,  $\omega_N$  - znamionowa prędkość kątowna

Prędkość silnika  $\omega$  jest sterowana z pomocą napięcia  $U$  przyłożonego do zacisków maszyny. Bezpośredni wpływ na regulację prędkości ma także siła elektromotoryczna  $E$ , której wartość jest kształtowana m.in. przez strumień  $\Psi$ .



Rys. 1. Uproszczony model silnika elektrycznego [1]

W dalszej kolejności przeprowadza się dobór parametrów regulatora prądu z wykorzystaniem kryterium optimum modułu. Zapewnia to możliwość analizy pętli regulacji prędkości (rys. 2) zależnej wyłącznie od opóźnienia  $\sigma$  wprowadzanego przez układ energoelektroniczny i mechaniczną stałą czasową silnika.



Rys. 2. Schemat pętli regulacji prędkości serwomechanizmu [1]

Dalsze działania, prowadzące do wyznaczenia parametrów regulatorów z pomocą kryterium optimum symetrii, opisane szerzej w [1], doprowadzają do wyliczenia współczynnika wzmocnienia  $V_{R\omega}$  i czasu zdwojenia  $T_{R\omega}$ , dla każdego z regulatorów prędkości osi poziomych maszyny CNC:

Dla struktury bramy (oś Y):

$$T_{YR\omega} = 0,0064 \quad (2a)$$

$$V_{YR\omega} = 2,5 \quad (2b)$$

oraz karetki (oś X):

$$T_{XR\omega} = 0,0064 \quad (3a)$$

$$V_{XR\omega} = 1,56 \quad (3b)$$

W klasycznej wersji układu sterowania serwomechanizmu, regulator położenia jest typu proporcjonalnego. Zapewnia to zarówno prostą implementację algorytmu sterowania, jak i zbieżność uchybu położenia do zera, co może zostać udowodnione za pomocą twierdzenia o wartości granicznej [5].

W celu wyznaczenia granicznej wartości wzmocnienia regulatora położenia, która zapewni odpowiednią szybkość zbieżności uchybu do zera, zastosowano twierdzenie Hurwitza. Zgodnie z [1], równanie charakterystyczne pętli regulacji położenia wynosi:

$$V_{R\theta} + \lambda + 6\lambda^2\sigma + 8\lambda^3\sigma^2 = 0 \quad (4)$$

gdzie:  $V_{R\theta}$  – wzmocnienie regulatora położenia rozpatrywanej osi

Z warunku koniecznego i wystarczającego dla układu opisanego równaniem (4) możemy wyznaczyć poszukiwaną wartość wzmocnienia regulatorów położenia osi X oraz Y (ze względów bezpieczeństwa znacznie mniejszą od wartości granicznej):

$$V_{XR\theta} = V_{YR\theta} = 150 \quad (5)$$

### 3.3 Weryfikacja wyliczonych nastaw

Kolejnym etapem badań była weryfikacja wyliczonych nastaw (2), (3), (5). Badanie jakości ruchu każdej z osi odbywało się zarówno w oparciu o jej odpowiedź skokową, jak i wyliczone wartości kryteriów całkowitych: ISE oraz IAE. W niniejszej publikacji przedstawione zostanie wyłącznie strojenie osi bramy.

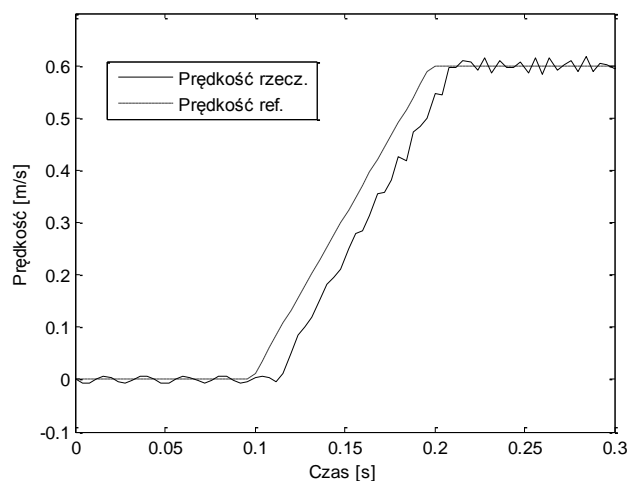
Najpierw badaniu została poddana pętla regulacji prędkości. Na jej wejście podany został skok wartości referencyjnej o wartości 0,6 m/s – odpowiadający prędkości maksymalnej osi bramy, wynikający z założeń projektowych w pracy [1]. W celu uniknięcia gwałtownych zrywów układu napędowego maszyny, producent jednostek sterujących zastosował w pętli regulacji prędkości filtr prędkościowy. Do celów badawczych wytypowano filtr liniowy, którego działanie zostało maksymalnie złagodzone. Rysunek 3 przedstawia odpowiedź układu regulacji z wykorzystaniem parametrów (2).

Można zaobserwować, że wyliczone nastawy nie spełniają w pełni wymagań poprawnej pracy. Oscylacje w okolicy wartości zadanej prędkości powinny być zredukowane. Są one oczywiście wynikiem oddziaływania zarówno regulatora, jak i zjawisk mechanicznych, takich jak: luzy w przekładniach i tarcia w połączeniach przewodnicowych, dlatego też nie należy spodziewać się całkowitego ich wyeliminowania.

W celu poprawy jakości pracy zdecydowano się zmniejszyć współczynnik wzmocnienia regulatora. Z wykorzystaniem metody kolejnych przybliżeń uzyskano wartość 0,9, która wpłynęła na znaczne zmniejszenie oscylacji wokół punktu pracy. Ostatnim elementem badań było strojenie członu całkowitego regulatora. Ostatecznie, działanie tej części regulatora zostało wzmocnione, przez zmniejszenie czasu zdwojenia do wartości 0,002. Wpływ omówionych zmian obrazowany został na rysunku 4. Potwierdzeniem poprawności zastosowanych zmian są wyniki wartości kryteriów całkowitych dla poszczególnych zestawów parametrów (tab.1).

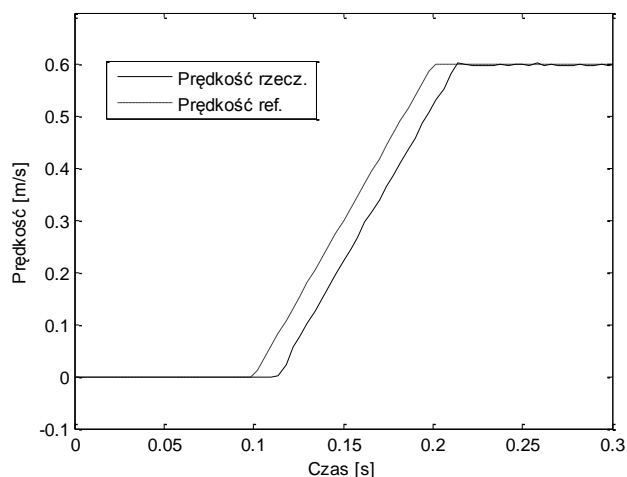
Tablica 1. Wartości kryteriów całkowitych dla różnych zestawów parametrów regulatora prędkości

$V_{YRG\theta}$	$T_{YRG\theta}$	$I_{IAE}$	$I_{ISE}$
2,5	0,0064	9,71	0,45
0,6	0,0064	4,82	0,41
0,9	0,0064	4,51	0,38
0,9	0,01	4,49	0,37
0,9	0,002	4,46	0,36



Rys. 3. Przebieg regulacji prędkości dla parametrów wyliczonych

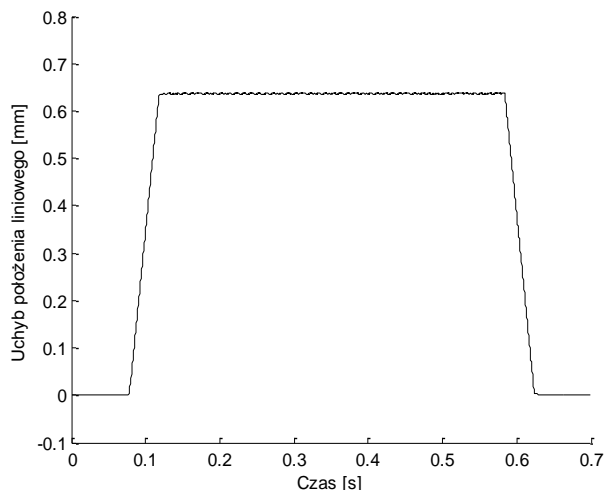
Kolejnym etapem badań była analiza poprawności wyliczonego współczynnika wzmocnienia (5) dla pętli regulacji położenia bramy. Na wejście regulatora położenia wprowadzono skok wartości referencyjnej wynoszący 1 cm.



Rys. 4. Przebieg regulacji prędkości po przeprowadzeniu procesu weryfikacji

Przebieg wielkości regulowanej nie cechował się przeregulowaniem, ale czas regulacji był zdecydowanie zbyt długi. Dlatego też, zdecydowano o zwiększeniu współczynnika wzmocnienia regulatora do wartości 350. Wpłynęło to na kilkukrotne zmniejszenie czasu regulacji lecz wprowadziło niewielkie przeregulowanie (ok. 2 %). W przypadku serwomechanizmów, przeregulowania w procesie regulacji położenia są niedopuszczalne. Jednakże typowe warunki pracy maszyny nie zakładają generowania przez zadajnik skokowych zmian trajektorii. Złagodzenie warunków pracy osi napędowej wpłynęło oczywiście na poprawę jakości sterowania,

czego efektem jest przebieg uchybu regulacji położenia bramy (rys. 5). Typowe warunki pracy zostały przedstawione w pracy [1] i uwzględniają działanie filtra prędkościowego s-kształtnego. Strojenie regulatorów w strukturze sterowania położeniem bramy zostało uznane za zakończone. Dla oceny przebiegu strojenia regulatora położenia zamieszczona została tabela zawierająca wartości kryteriów całkowych dla poszczególnych nastaw (tab.2).



Rys. 5. Przebieg uchybu regulacji położenia w typowych warunkach pracy

Tablica 2. Wartości kryteriów całkowych dla różnych zestawów parametrów regulatora położenia

$V_{YR\theta}$	$I_{IAE}$	$I_{ISE}$
150	4,77	3,04
300	3,01	2,75
350	3,33	2,48
500	6,02	2,73

#### 4. WNIOSKI

Omówiony w artykule przebieg doboru parametrów regulatorów jest czasochłonny, ale jego wyniki są

zadowalające. Otrzymany został zestaw parametrów, który zapewnia maszynie duży stopień dokładności i stosunkowo krótki czas obróbki elementów. Jakość sterowania poszczególnych osi napędowych dla otrzymanych wartości parametrów (zestaw 1) jest porównywalna z jakością sterowania dla wartości otrzymanych przez wbudowany system strojenia (zestaw 2), opracowany przez producenta jednostek napędowych (tab. 3).

Pewną niedogodność stanowi fakt, że do procesu wyliczania i korekcyi nastaw regulatorów potrzebny jest określony poziom wiedzy eksperckiej z zakresu automatyki i mechaniki. Tym niemniej, zaproponowany proces może być traktowany jako uzupełnienie procesu automatycznego.

Tablica 3. Wartości kryteriów całkowych bramy próby kołowej dla różnych zestawów parametrów

Numer zestawu	$I_{IAE}$	$I_{ISE}$
1	479	30027
2	483	30182

#### 5. BIBLIOGRAFIA

1. Jaworski J.: *Budowa i programowanie 3-osiowej maszyny frezującej CNC, opartej na serwomechanizmach i silniku krokowym*, praca dyplomowa magisterska, Gdańsk 2011
2. Hongbo Cao, Dagui Huang: *On composite position control of CNC system feeding PMSM based on position feedforward and SVPWM*, International Conference on Mechatronics and Automation, Xi'an 2010, s. 735-740, ISBN 978-1-4244-5140-1
3. Tao Zhao, Mulan Wang, Chao Pan, Youbin Wang: *Research of high performance AC servo feed system for NC machine tool*, 8<sup>th</sup> World Congress on Intelligent Control and Automation, Jinan 2010, s. 5503-5507, ISBN 978-1-4244-6712-9
4. Suh S., Kang S., Chung D., Stroud J.: *Theory and design of CNC systems*, Springer London, Londyn 2008, ISBN 978-1-84800-335-4
5. Zawirski K.: *Sterowanie silnikiem synchronicznym o magnesach trwałych*, WPP, Poznań 2005 ISBN 978-8-3714-3337-5

## CONSTRUCTION OF 3-AXIS CNC MILLING MACHINE WITH SERVOMECHANISM'S REGULATORS TUNING

**Key-words:** CNC, servomechanism ,regulator tuning

In this paper, the process of CNC milling machine construction was presented. It's horizontal axes are driven by servomechanisms and vertical axis is driven by stepper motor. Construction process is finished by programming stage, which includes servomechanism's regulators tuning. Thus, tuning criteria – Hurwitz and symmetry optimum were used. Results of tuning are compared with results achieved by drives producer's built-in tuning system.