

Politechnika Poznańska
Instytut Technologii Mechanicznej

Laboratorium
Maszyny CNC

Nr 2

Badania symulacyjne napędów obrabiarek sterowanych numerycznie

Opracował:
Dr inż. Wojciech Ptaszyński

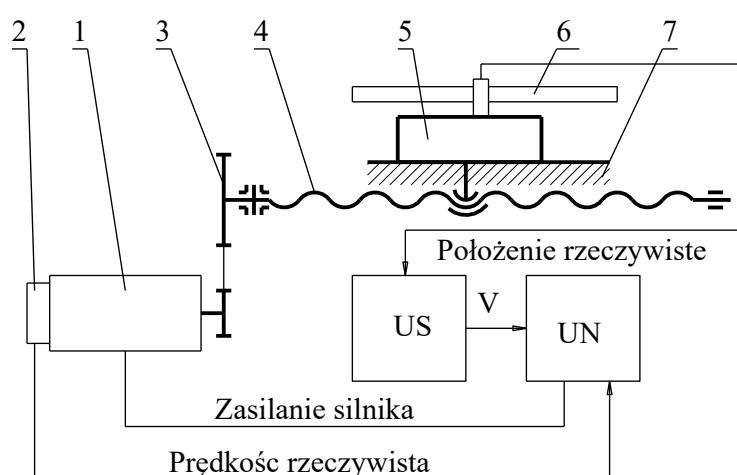
Poznań, 2 grudnia 2022

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową układów napędowych oraz zasadą działania serwonapędu obrabiarki sterowanej numerycznie. W ćwiczeniu przeprowadza się symulacje układu napędowego obrabiarki w celu dobrania optymalnych nastaw regulatorów.

2. Budowa serwonapędu obrabiarki

Na rysunku 1 pokazano typową budowę układu napędowego obrabiarki sterowanej numerycznie z pomiarem bezpośrednim.

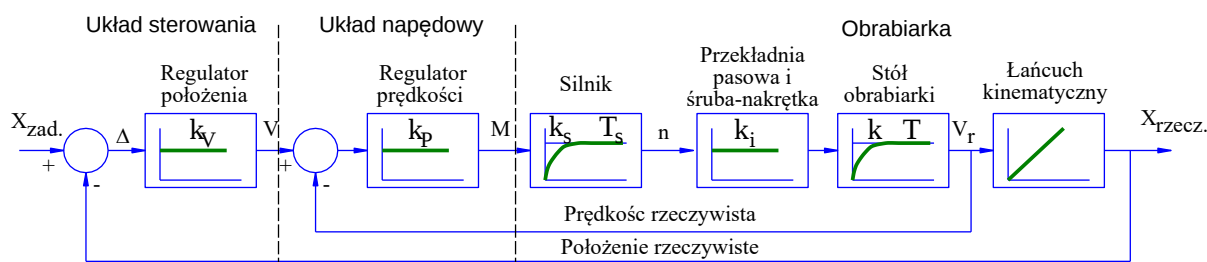


Rys. 1. Układ napędowy obrabiarki sterowanej numerycznie z bezpośrednim układem pomiarowym:
1 – silnik serwonapędowy, 2 – układ pomiaru prędkości obrotowej silnika, 3 – przekładnia pasowa zębata, 4 – śruba kulowa, 5 – stół obrabiarki, 6 – liniał pomiarowy położenia, 7 – prowadnice obrabiarki, US – układ sterowania, UN – układ napędowy

Silnik serwonapędowy 1 poprzez przekładnię pasową zębatą 3 o przełożeniu i napędza śrubę pociągową kulową 4, a ta z kolei zamienia ruch obrotowy śruby na ruch posuwowy stołu obrabiarki 5. W czasie pracy obrabiarki mierzona jest aktualna prędkość obrotowa silnika czujnikiem 2 oraz położenie rzeczywiste układem pomiarowym 6.

3. Zapis operatorowy serwonapędu

Schemat blokowy serwonapędu pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat blokowy serwonapędu: X_{zad} – zadane położenie, Δ – uchyb położenia, V – zadana prędkość, M – moment zadany, n – prędkość obrotowa silnika, V_r – prędkość rzeczywista stołu, X_{rzecz} – położenie rzeczywiste stołu, k_v – wzmacnienie położeniowe, k_p – wzmacnienie prędkościowe, k – stała stołu, k_i – stała przekładni, T_s – stała czasowa silnika, T – stała czasowa stołu

Serwonapęd przedstawiony na rys. 2 składa się z regulatora położenia typu P, regulatora prędkości typu P, silnika serwonapędowego przyjętego jako element inercyjny I-rzędu, stołu obrabiarki o masie m napędzanego silnikiem poprzez przekładnię pasową i śrubową. W celu zamiany prędkości ruchu stołu na położenie wprowadzono element całkujący przedstawiający łańcuch kinematyczny.

Najważniejszym elementem tego serwonapędu, ze względu na sterowanie, jest regulator położenia. Jest to regulator proporcjonalny, którego transmitancja wynosi:

$$G(s) = k_v$$

Uchyb położenia Δ jest obliczany jako różnica wartości zadanej i rzeczywistej, można powiedzieć że jest to błąd położenia. W związku z tym na wyjściu z regulatora położenia pojawia się sygnał odpowiadający prędkości zadanej v , której wartość można obliczyć z zależności:

$$v = k_v \cdot \Delta$$

Widać z tego, że ruch osi obrabiarki będzie odbywał się tylko wtedy gdy współczynnik k_v będzie różny od zera (zawsze jest różny od zera) oraz gdy uchyb położenia jest różny od zera. Zadana prędkość ruchu osi jest proporcjonalna do współczynnika k_v oraz wartości uchybu położenia. Można stwierdzić, że ruch osi obrabiarki odbywa się tylko wtedy gdy występuje uchyb położenia. Jest to podstawowa cecha proporcjonalnego regulatora położenia w serwonapędzie. Taki układ jest często zwany układem nadążnym (oś nadąża za sygnałem położenia zadanego).

Po przekształceniu poprzedniego równanie do postaci:

$$\Delta = \frac{v}{k_v}$$

możemy zauważyć, że uchyb położenia jest proporcjonalny do prędkości ruchu (im większa prędkość ruchu tym większy uchyb) oraz odwrotnie proporcjonalny do współczynnika wzmocnienia k_v (im większy współczynnik tym mniejszy uchyb).

Dążąc do zminimalizowania błędu pracy obrabiarki należy odpowiednio dobrać współczynnik wzmocnienia k_v . Mała wartość tego współczynnika powoduje, że błąd uchybu jest duży, natomiast zbyt duża wartość może powodować przesterowanie. Dlatego też dla poprawnej pracy obrabiarki NC wymagane jest odpowiednie ustawienie współczynników k_v dla każdej sterowanej osi. Można to zrobić eksperymentalnie na obrabiarce lub wykorzystując równania i działania automatyki liniowej. W tym celu dla poszczególnych elementów schematu serwonapędu należy wyznaczyć równania transmitancji oraz jej parametry.

Jak wspomniano wcześniej transmitancja regulatora położenia wynosi (element proporcjonalny):

$$G(s) = k_v$$

natomiast transmitancja regulatora prędkości (również element proporcjonalny):

$$G(s) = k_p$$

Silnik przybliżono do elementu inercyjnego I-rzędu, a jego transmitancję można przedstawić następująco:

$$G(s) = \frac{k_s}{T_s \cdot s + 1}$$

gdzie: k_s – stała wzmocnienia, T_s – stała czasowa.

Przekładnię śrubowo toczną i pasową można przyjąć jako element proporcjonalny z transmitancją:

$$G(s) = k_i$$

gdzie: k_i – stała przełożenia, którą można obliczyć z równania:

$$k_i = \frac{i \cdot S_p}{1000}$$

gdzie: i – przełożenie przekładni pasowej,
 S_p – skok śruby pociągowej [mm]

Stół obrabiarki przybliżono do elementu inercyjny I-rzędu i równanie momentu silnika napędzającego ten stół w trakcie rozpędzania, pomijając siły zewnętrzne (od procesu) oraz momenty tarcia w nakrętce i łożyskach (są znikomo małe w porównaniu do momentu silnika), można przedstawić równaniem:

$$M = I_z \frac{d\omega}{dt} + f_d \omega$$

gdzie: M – wejściowy moment obrotowy,

$\frac{d\omega}{dt}$ – przyspieszenie kątowe wirnika silnika,

ω – prędkość kątowna wirnika silnika,

f_d – momentu tarcia w prowadnicach zależny od prędkości ruchu zredukowany na wał silnika,

I_z – masowy moment bezwładności zredukowany na wał silnika.

Transmitancję stołu obrabiarki można zatem przedstawić następująco:

$$G(s) = \frac{k}{T \cdot s + 1}$$

gdzie parametry elementu inercyjnego można obliczyć z równań:

$$T = \frac{I_z}{f_d}; \quad k = \frac{1}{f_d}$$

Masowy moment bezwładności zredukowany na wał silnika składa się ze zredukowanego na wał silnika momentów bezwładności poszczególnych mas poruszających się ruchem obrotowym lub liniowym i można obliczyć z równania:

$$I_z = I_s + i^2 \cdot (I_{sp} + I_{st})$$

gdzie: I_{sp} – moment bezwładności śruby pociągowej [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$],

I_{st} – moment bezwładności stołu zredukowany na śrubę pociągową [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$],

I_s – moment bezwładności wirnika silnika

i – przełożenie przekładni pasowej.

Dla uproszczenia w analizie uwzględniono tylko moment bezwładności pochodzący od poruszającego się stołu, śruby pociągowej i wirnika silnika, pominięto momenty bezwładności kół pasowych.

Moment bezwładności śruby kulowej można obliczyć z równania:

$$I_{sp} = \frac{d^4 \cdot l \cdot \rho \cdot \pi}{32}$$

gdzie: d – średnica podziałowa gwintu śruby kulowej [m]
 l – długość śruby [m],
 ρ – masa właściwa materiału śruby [kg/m^3] (dla stali 8000 kg/m^3).

Moment bezwładności stołu obrabiarki zredukowany na śrubę toczną można obliczyć ze wzoru:

$$I_{st} = m \cdot \left(\frac{S}{2\pi} \right)^2$$

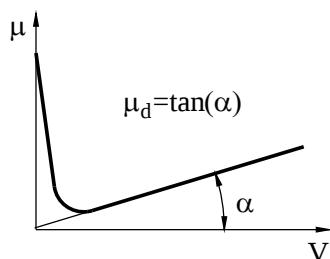
gdzie: m – masa stołu [kg],
 S – skok śruby pociągowej [m].

Momentu tarcia w prowadnicach zależny od prędkości ruchu zredukowany na wał silnika można obliczyć z zależności:

$$f_d = \frac{m \cdot g \cdot \mu_d \cdot i \cdot S}{2 \cdot \pi \cdot \eta}$$

gdzie: i – przełożenie przekładni pasowej,
 m – masa stołu [kg],
 g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2],
 μ_d – współczynnik tarcia zależny od prędkości ruchu (rys. 3) [s],
 S – skok śruby pociągowej [m],
 M – sprawność łańcucha kinematycznego (można przyjąć 0.8 (80%)).

Rzeczywisty współczynnik tarcia w prowadnicach zwykle kształtuje się tak jak pokazano na rysunku 3. Dla uproszczenia obliczeń (można tak przyjąć dla prowadnic tocznych i ślizgowych z nakładkami z tworzyw sztucznych) przyjęto, że występuje tutaj tylko tarcie wiskotyczne, zależne od prędkości ruchu (rys. 3).



Rys. 3. Wykres zależności współczynnika tarcia od prędkości ruchu

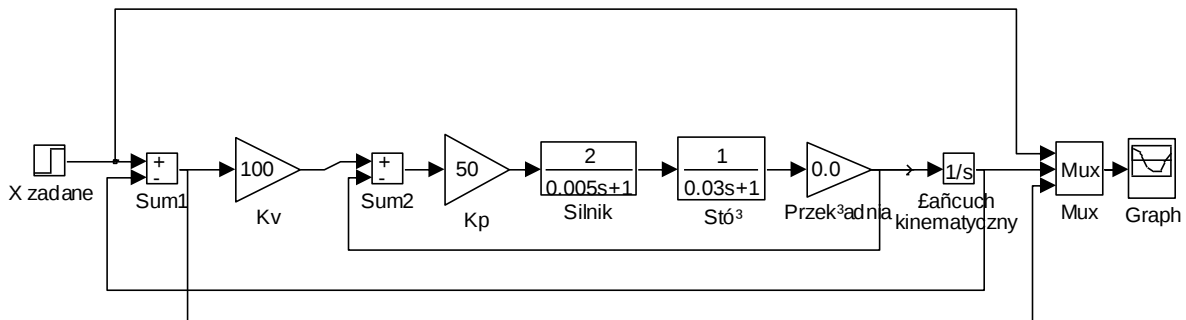
4. Przebieg ćwiczenia

Ćwiczenie polega na badaniu odpowiedzi serwonapędu obrabiarki na wymuszenie skokowe w celu dobrania współczynników regulatorów położenia k_v i prędkości k_p dla podanych parametrów układu napędowego.

W celu przeprowadzenia badań symulacyjnych należy z wcześniej podanych wzorów obliczyć parametry T i k stołu obrabiarki (dla transmitancji elementu inercyjnego I-rzędu) oraz stałą k_i przekładni pasowej i śrubowej.

Parametry T_s i k_s silnika zostaną podane przez prowadzącego ćwiczenia.

Badania symulacyjne przeprowadza się w programie Matlab z nakładką Simulink. W tym celu należy uruchomić program Matlab, a następnie w oknie programu Matlab wprowadzić hasło Simulink i wcisnąć ENTER. Po ukazaniu się okna nakładki Simulink należy wczytać z dysku przygotowany schemat serwonapędu o nazwie SERWO.M (rys. 4).



Rys.4. Schemat serwonapędu w programie Matlab-Simulink

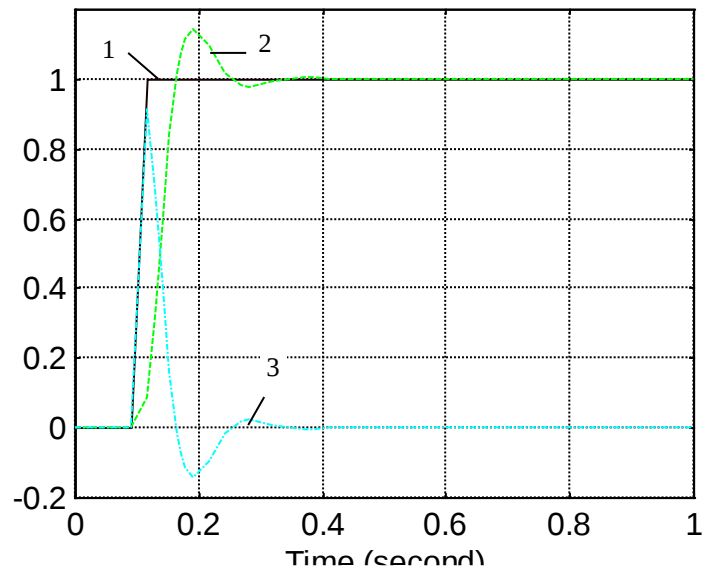
Wprowadzanie poszczególnych parametrów odbywa się poprzez podwójne kliknięcie na odpowiedni obiekt i wprowadzeniu odpowiedniej wartości. Dla elementów inercyjnych (silnik i stół) w oknie dialogowym wartości przedstawione są w następujący sposób:

[k]

[T 1]

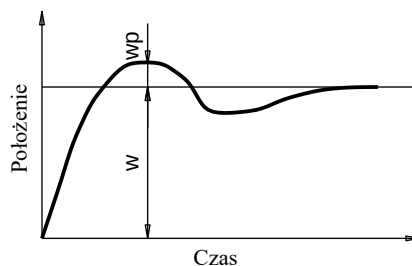
gdzie zamiast k i T należy wprowadzić odpowiednie wartości.

Obiekt X_{zadane} wymusza skok jednostkowy o wartości 1 mm. Obiekt Graph (rys. 5) pokazuje przebieg wartości zadanej, odpowiedź układu na wymuszenie jednostkowe oraz wartość uchybu położenia.



Rys. 5. Przebieg symulacji: 1- wartość zadana, 2 – odpowiedź, 3 – wartość uchybu położenia

Na podstawie otrzymanego wykresu można ocenić czy dane parametry regulatorów są właściwe. Dążyć należy do takiego dobrania współczynników aby czas osiągnięcia zadanej pozycji był jak najkrótszy i aby współczynnik przeregulowania wynosił co najwyżej $\kappa < 1,2$ (rys. 6).



Rys. 6. Odpowiedź układu na wymuszenie skokowe

Współczynnik przeregulowania można obliczyć ze wzoru:

$$\kappa = \frac{w + w_p}{w}$$

W ćwiczeniu należy dla danego serwonapędu określić dwa współczynniki wzmocnienia k_v :

1. taki, przy którym czas osiągnięcia pozycji jest najkrótszy i nie ma przeregulowania,
2. taki, przy którym czas osiągnięcia pozycji jest najkrótszy i występuje maksymalne dopuszczalne przeregulowanie,

5. Sprawozdanie

Sprawozdanie powinno zawierać:

- datę ćwiczenia,
- grupa i listę osób biorących udział w ćwiczeniu,
- schemat blokowy serwonapędu,
- dane wejściowe podane przez prowadzącego ćwiczenia,
- obliczenia parametrów napędu,
- wykres odpowiedzi układu na wymuszenie skokowe dla właściwie dobranych parametrów regulatorów z podaniem ich wartości,
- wnioski

6. Wiadomości wymagane

- rodzaje podstawowych członów automatyki, charakterystyki, transmitancje, parametry,
- Rodzaje regulatorów liniowych i ich cechy,
- budowa i zasada działania serwonapędów obrabiarek CNC, schemat blokowy i podstawowe elementy

7. Literatura

1. Kosmol J., Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie. WNT, W-wa 1998.
2. Kosmol J., Elektryczne silniki i układy napędowe obrabiarek i maszyn technologicznych., Gliwice 1993.
3. Mierzejewski J., Serwonapędy obrabiarek sterowanych numerycznie. WNT, W-wa 1977.
4. Żelazny M., Podstawy automatyki, PWN 1976.

Dane silnika serwonapędowego SIMODRIVE 611 1FT7068-AF7

Technical data	Code	Unit	Value
Engineering data			
Rated speed	n_N	RPM	3000
Number of poles	2p	---	10
Rated torque (100 K)	$M_N (100\text{ K})$	Nm	10,9
Rated current (100 K)	$I_N (100\text{ K})$	A	6,7
Stall torque (60 K)	$M_0 (60\text{ K})$	Nm	13
Stall torque (100 K)	$M_0 (100\text{ K})$	Nm	15
Stall current (60 K)	$I_0 (60\text{ K})$	A	7,1
Stall current (100 K)	$I_0 (100\text{ K})$	A	8,3
Moment of inertia (with brake)	J_{MotBr}	10^{-4} kgm^2	26,1
Moment of inertia (without brake)	J_{mot}	10^{-4} kgm^2	23,2
Optimum operating point			
Optimum speed	n_{opt}	RPM	3000
Optimum power	P_{opt}	kW	3,42
Limit data			
Max. permissible speed (mech.)	$n_{max\text{ mech.}}$	RPM	9000
Max. permissible speed (converter)	$n_{max\text{ conv}}$	RPM	5100
Max. torque	M_{max}	Nm	63
Maximum current	I_{max}	A	43
Physical constants			
Torque constant	k_T	Nm/A	1,81
Voltage constant	k_E	V/1000 RPM	114
Winding resistance at 20° C	R_{ph}	Ω	0,53
Rotating field inductance	L_D	mH	6,4
Electrical time constant	T_{el}	ms	12
Mechanical time constant	T_{mech}	ms	1,1
Thermal time constant	T_{th}	min	45
Shaft torsional stiffness	C_t	Nm/rad	21400
Weight with brake	m_{MotBr}	kg	18
Weight without brake	m_{Mot}	kg	16,3

Charakterystyka mechaniczna silnika serwonapędowego SIMODRIVE 611 1FT7068-AF7

