

Sprawozdanie z ćwiczeń laboratoryjnych

z przedmiotu: *Sterowanie Analogowe*

Numer ćwiczenia:	2
Tytuł ćwiczenia:	Badanie jakości i dokładności sterowania
Imię, nazwisko i numer albumu:	Mateusz Kuczerowski 197900 Kewin Kisiel 197866
Data pomiarów:	16.10.2025
Data oddania:	22.10.2025
Ocena:	

Prowadzący: dr inż. Piotr Fiertek

Grupa laboratoryjna: 1A

1 Cel ćwiczenia

W ramach zajęć analizowano odpowiedzi skokowe oraz charakterystyki częstotliwościowe (Bodego) dla różnych wartości wzmocnienia. Pozwoliło to na ocenę, jak zmiana k_c wpływa na parametry odpowiedzi, takie jak przeregulowanie, czas ustalania, pasmo przenoszenia oraz dokładność sterowania (uchyb ustalony).

2 Przebieg ćwiczenia

Podczas ćwiczenia przeprowadzono badanie trzech różnych układów zamkniętych (Układ A, B, D), wskazanych przez prowadzącego. Układy te były sterowane za pomocą sterownika proporcjonalnego (P). Dla każdego z badanych układów zarejestrowano łącznie 9 odpowiedzi skokowych – po trzy dla każdej z trzech różnych wartości wzmocnienia sterownika k_c . W trakcie zajęć wykorzystano stanowisko pomiarowe składające się z zestawu analogowych modeli procesów przemysłowych (ZAMPP), generatora funkcji oraz oscyloskopu dwukanałowego. Zarejestrowane na oscyloskopie przebiegi (dane pomiarowe) zostały następnie wykorzystane do porównania z wynikami symulacji teoretycznych. Opracowanie wyników wymagało również przygotowania wykresów Nyquista oraz linii pierwiastkowych dla badanych układów.

3 Pomiar i analiza wyników

Poniżej przedstawiono zdjęcia z przeprowadzonych pomiarów w trakcie laboratorium.

POMIARY:

UKŁAD : a

I Pomiar odp. składowy na k :

L.p.	n	$\varphi [^\circ]$
1	0,4	0
2	1,3	0
3	2,4	0
4	4,4	

16.10.2025
Jm

II Char. częstot. z wyj. 1→2

dla k_1 m: 2,4

Lp.	$\varphi [Hz]$	$U_{im} [V_{pp}]$	$U_{out} [V_{pp}]$	$\varphi [^\circ]$
1	10	2	2,06	1,8
2	100	2	2,06	1,8
3	200	2	2,12	30,24
4	500	2	3,58	87,9
5	795	2	1,42	-157,4
6	1000	2	0,58	-133,2

dla k_2 m: 1,3

Lp.	$\varphi [Hz]$	$U_{im} [V_{pp}]$	$U_{out} [V_{pp}]$	$\varphi [^\circ]$
1	10	2	2,06	2,16
2	100	2	2,04	22,32
3	200	2	1,96	39,6
4	500	2	2,18	112,5
5	680	2	1,40	-174,5
6	1k	2	0,38	-139,5

(a) Zdjęcie pomiarów 1.

dla k_1 m: 0,1

Lp.	$\varphi [Hz]$	$U_{im} [V_{pp}]$	$U_{out} [V_{pp}]$	$\varphi [^\circ]$
1	10	2	2,06	3,9
2	100	2	1,86	32,8
3	200	2	1,58	59,4
4	500	2	1,46	12,9
5	500	2	1,1	132,3
6	800	2	0,46	-162,4

UKŁAD : b $U_{in} = 2V_{pp}$ $f = 10kHz$

I Pomiar odp. składowy na k :

L.p.	n	$\varphi [^\circ]$	$c(t)$ gdy zaskłanie
1	0,5	0	
2	1,5	0	
3	2,8	0	
4	3,6		

II Char. częstot. z wyj. 1→2

dla k_1 m: 0,5

Lp.	$\varphi [Hz]$	$U_{im} [V_{pp}]$	$U_{out} [V_{pp}]$	$\varphi [^\circ]$
1	10	2	2,06	3,96
2	100	2	2,06	33,8
3	200	2	1,96	62,52
4	400	2	1,62	111,6
5	520	2	1,4	137,3
6	1k	2	0,94	177,8

(b) Zdjęcie pomiarów 2.

dla k_2 m: 1,5

Lp.	$\varphi [Hz]$	$U_{im} [V_{pp}]$	$U_{out} [V_{pp}]$	$\varphi [^\circ]$
1	10	2	2,06	2,16
2	100	2	2,14	18
3	200	2	2,32	39,6
4	400	2	3,06	79,92
5	600	2	3,26	129
6	1,75k	2	1,4	-142,1

dla k_2 m: 2,5

Lp.	$\varphi [Hz]$	$U_{im} [V_{pp}]$	$U_{out} [V_{pp}]$	$\varphi [^\circ]$
1	10	2	2,06	2,16
2	100	2	2,14	12,24
3	200	2	2,34	25,2
4	400	2	3,48	42,48
5	800	2	12,2	131
6	3,5k	2	1,4	-107

UKŁAD : d

I Pomiar odp. składowy na k :

L.p.	k_p	$\varphi [^\circ]$	$c(t)$ gdy zaskłanie
1	1,1		
2	4		
3	8		
4	10		

α_{grzm}

(c) Zdjęcie pomiarów 3.

dla k_1 m: 1,1

Lp.	$\varphi [Hz]$	$U_{im} [V_{pp}]$	$U_{out} [V_{pp}]$	$\varphi [^\circ]$
1	10	2	0,44	-6,82
2	200	2	0,42	6,84
3	400	2	0,4	12,96
4	800	2	0,34	33,12
5	1,5k	2	0,26	48,9
6	2k	2	0,162	68,12

dla k_2 m: 1

Lp.	$\varphi [Hz]$	$U_{im} [V_{pp}]$	$U_{out} [V_{pp}]$	$\varphi [^\circ]$
1	10	2	0,78	-3,6
2	200	2	0,74	10,08
3	400	2	0,72	16,63
4	800	2	0,68	30,47
5	1,5k	2	0,5	52,81
6	2k	2	0,42	62,04

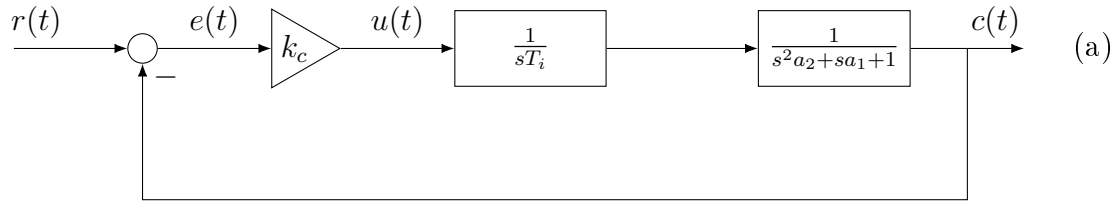
dla k_3 m: 8

Lp.	$\varphi [Hz]$	$U_{im} [V_{pp}]$	$U_{out} [V_{pp}]$	$\varphi [^\circ]$
1	10	2	1,08	-2,16
2	200	2	1,04	6,48
3	400	2	1,04	10,8
4	800	2	0,96	25,48
5	1,5k	2	0,8	43,94
6	2k	2	0,68	56,44

(d) Zdjęcie pomiarów 4.

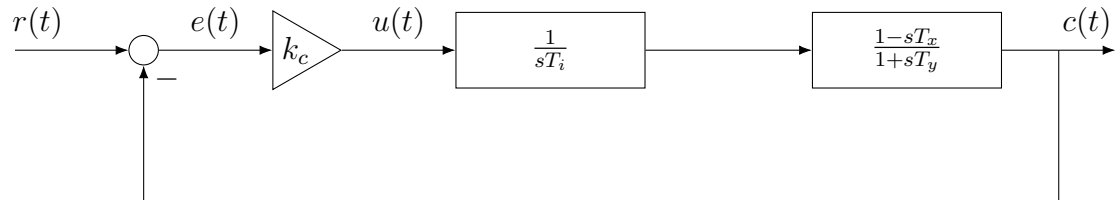
4 Układy pomiarowe

Układ A):



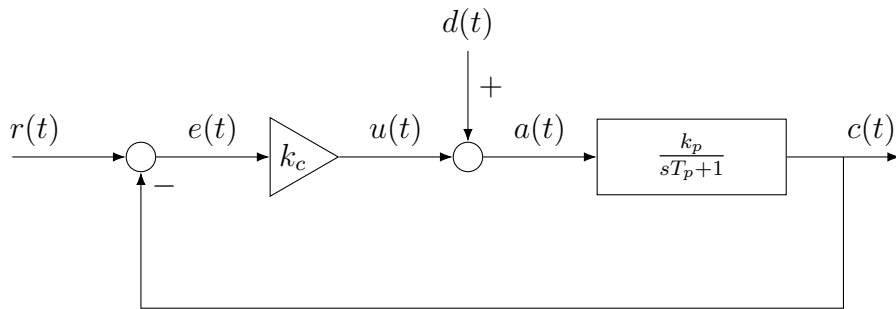
Rysunek 2: Schemat układu pomiarowego (a).

Układ B):



Rysunek 3: Schemat układu pomiarowego (b).

Układ D):



Rysunek 4: Schemat blokowy układu regulacji z zakłóceniem.

4.1 Układ A

Pierwszy badany układ składa się ze sterownika proporcjonalnego (P) oraz obiektu sterowanego w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego. Obiekt sterowany jest szeregowym połączeniem członu całkującego i członu inercyjnego drugiego rzędu.

Na podstawie identyfikacji przeprowadzonej w ćwiczeniu 1, przyjęto następujące parametry modeli:

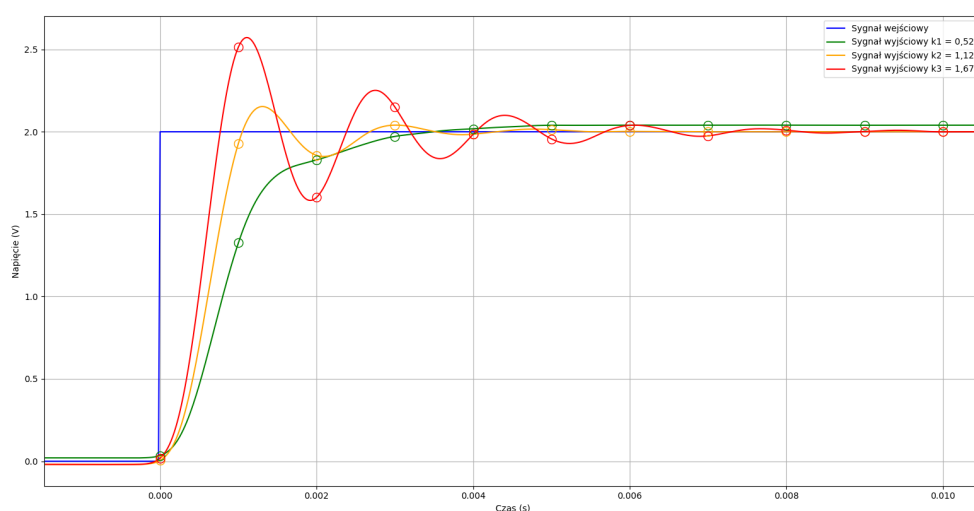
- Człon całkujący: $G(s) = \frac{1}{sT_i}$, gdzie $T_i = 1,33$ ms.
- Człon 2 rzędu: $G(s) = \frac{1}{1+sa_1+s^2a_2} = \frac{1}{1+s2\zeta\tau+s^2\tau^2} = \frac{w_n^2}{w_n^2+s2\zeta w_n+s^2}$, gdzie wyznaczone parametry to $\zeta = 0,336$ i $\omega_n = 2560$ rad/s.

Badania przeprowadzono dla trzech różnych wartości wzmocnienia k_c , obliczonych ze wzoru $k_c = 0,47 + n/2$:

- Dla $n_1 = 0,1$: $k_{c1} = 0,47 + 0,1/2 = 0,47 + 0,05 = \mathbf{0,52}$
- Dla $n_2 = 1,3$: $k_{c2} = 0,47 + 1,3/2 = 0,47 + 0,65 = \mathbf{1,12}$
- Dla $n_3 = 2,4$: $k_{c3} = 0,47 + 2,4/2 = 0,47 + 1,20 = \mathbf{1,67}$

4.1.1 Odpowiedzi skokowe

Na poniższym wykresie przedstawiono zarejestrowane odpowiedzi skokowe układu (A) dla trzech wyznaczonych wzmocnień k_c .

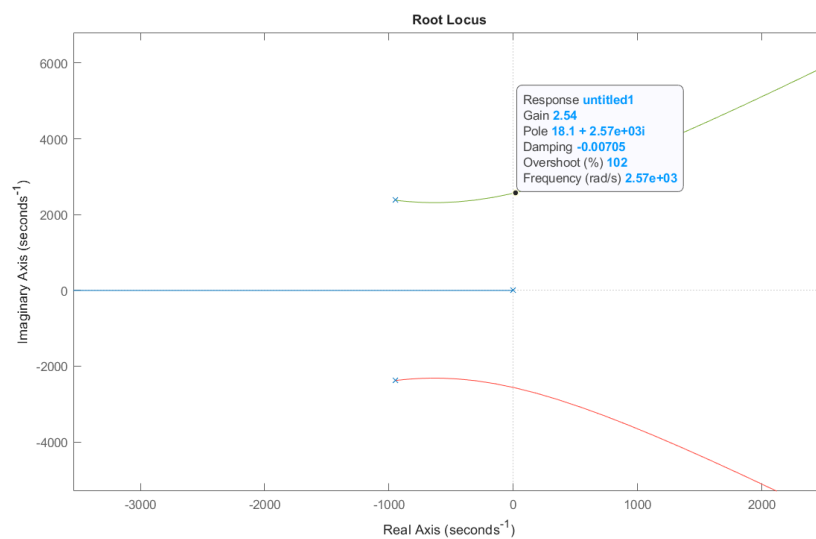


Rysunek 5: Odpowiedź skokowa układu (A) przy różnych wartościach wzmocnienia k_c wykreślona z pliku CSV.

Analiza odpowiedzi skokowych Układu A pokazuje, że zwiększanie wzmocnienia k_c skraca czas narastania, ale jednocześnie znacząco zwiększa przeregulowanie i oscylacyjność odpowiedzi. Niezależnie od wzmocnienia, uchyb ustalony wynosi zero, co jest zasługą członu całkującego w obiekcie sterowania.

4.1.2 Linie pierwiastkowe

Wykres linii pierwiastkowych dla układu otwartego $G_o(s) = k_c \cdot \frac{1}{sT_i} \cdot \frac{w_n^2}{w_n^2 + s2\zeta w_n + s^2}$ przedstawiono poniżej. Zaznaczono na nim położenie biegunów układu zamkniętego dla badanych wzmocnień k_{c1} , k_{c2} i k_{c3} .



Rysunek 6: Linie pierwiastkowe układu otwartego (A).

Wykres linii pierwiastkowych pokazuje, że wraz ze wzrostem k_c bieguny układu zamkniętego zbliżają się do osi urojonej. Powoduje to spadek tłumienia, co bezpośrednio przekłada się na większe oscylacje widoczne na odpowiedziach skokowych. Linie pierwiastkowe wskazują również, że zbyt duże wzmocnienie k_c doprowadzi do niestabilności systemu, ponieważ gałęzie zmierzają w kierunku prawej półpłaszczyzny.

4.1.3 Charakterystyki Bodego

Poniższy wykres przedstawia charakterystyki Bodego układu zamkniętego dla badanych wartości k_c .

Rysunek 7: Charakterystyki Bodego układu zamkniętego (A).

4.1.4 Charakterystyki Nyquista

Na wykresie Nyquista układu otwartego można zbadać stabilność układu zamkniętego.

Rysunek 8: Charakterystyka Nyquista układu otwartego (A).

4.2 Układ B

Drugi badany układ składa się ze sterownika proporcjonalnego (P) oraz obiektu będącego szeregowym połączeniem członu całkującego i członu nieminimalnofazowego.

Na podstawie identyfikacji przeprowadzonej w ćwiczeniu 1, przyjęto następujące parametry modeli:

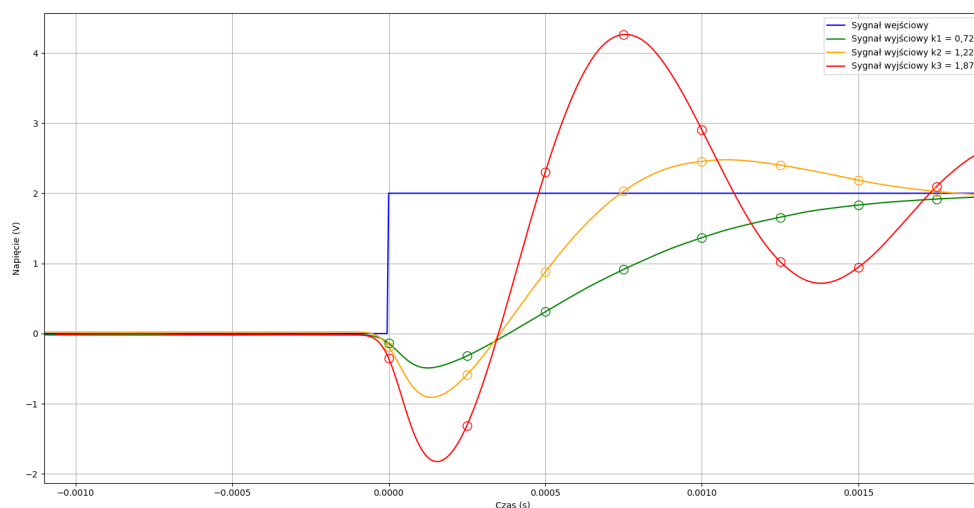
- Człon całkujący: $G(s) = \frac{1}{sT_i}$, gdzie $T_i = 1,33$ ms.
- Człon nieminimalnofazowy: $G(s) = \frac{1-sT_x}{1+sT_y}$, gdzie: $T_x = 0,396$ ms i $T_y = 0,113$ ms.

Badania przeprowadzono dla trzech wartości wzmocnienia k_c , obliczonych ze wzoru $k_c = 0,47 + n/2$:

- Dla $n_1 = 0,5$: $k_{c1} = 0,47 + 0,5/2 = 0,47 + 0,25 = \mathbf{0,72}$
- Dla $n_2 = 1,5$: $k_{c2} = 0,47 + 1,5/2 = 0,47 + 0,75 = \mathbf{1,22}$
- Dla $n_3 = 2,8$: $k_{c3} = 0,47 + 2,8/2 = 0,47 + 1,40 = \mathbf{1,87}$

4.2.1 Odpowiedzi skokowe

Na poniższym wykresie przedstawiono zarejestrowane odpowiedzi skokowe układu (B) dla trzech wyznaczonych wzmocnień k_c .



Rysunek 9: Odpowiedź skokowa układu (B) przy różnych wartościach wzmocnienia k_c .

4.2.2 Linie pierwiastkowe

Wykres linii pierwiastkowych dla układu otwartego $G_o(s) = k_c \cdot \frac{1}{sT_i} \cdot \frac{1-sT_x}{1+sT_y}$ przedstawiono poniżej. Zaznaczono na nim położenie biegunów układu zamkniętego dla badanych wzmocnień k_{c1} , k_{c2} i k_{c3} .

Rysunek 10: Linie pierwiastkowe układu otwartego (B).

4.2.3 Charakterystyki Bodego

Rysunek 11: Charakterystyki Bodego układu zamkniętego (B).

4.2.4 Charakterystyki Nyquista

Rysunek 12: Charakterystyka Nyquista układu otwartego (B).

4.3 Układ D

Ostatni badany układ to układ regulacji z zakłóceniem, składający się ze sterownika proporcjonalnego (P) i obiektu inercyjnego pierwszego rzędu.

Na podstawie identyfikacji przeprowadzonej w ćwiczeniu 1, przyjęto następujące parametry modeli:

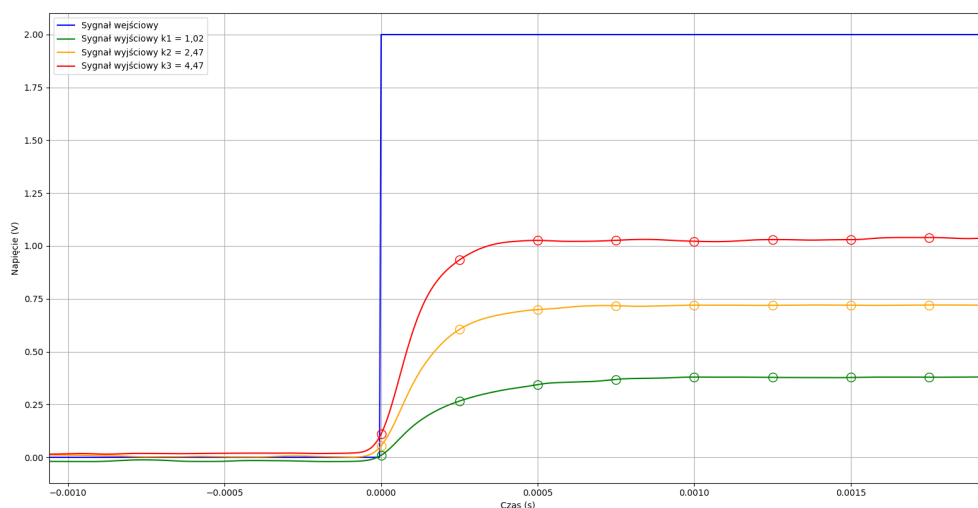
- Człon inercyjny 1 rzędu: $G(s) = \frac{k_p}{1+sT_p}$, gdzie $k_p = 0,871$ i $T_p = 0,78$ ms.

Badania przeprowadzono dla trzech wartości wzmocnienia k_c , obliczonych ze wzoru $k_c = 0,47 + n/2$:

- Dla $n_1 = 1,1$: $k_{c1} = 0,47 + 1,1/2 = 0,47 + 0,55 = \mathbf{1,02}$
- Dla $n_2 = 4,0$: $k_{c2} = 0,47 + 4,0/2 = 0,47 + 2,00 = \mathbf{2,47}$
- Dla $n_3 = 8,0$: $k_{c3} = 0,47 + 8,0/2 = 0,47 + 4,00 = \mathbf{4,47}$

4.3.1 Odpowiedzi skokowe

Na poniższym wykresie przedstawiono zarejestrowane odpowiedzi skokowe układu (D) dla trzech wyznaczonych wzmocnień k_c .



Rysunek 13: Odpowiedź skokowa układu (D) przy różnych wartościach wzmocnienia k_c .

4.3.2 Linie pierwiastkowe

Rysunek 14: Linie pierwiastkowe układu otwartego (D).

4.3.3 Charakterystyki Bodego

Rysunek 15: Charakterystyki Bodego układu zamkniętego (D).

4.3.4 Charakterystyki Nyquista

Rysunek 16: Charakterystyka Nyquista układu otwartego (D).

5 Wnioski

Tutaj wnioski