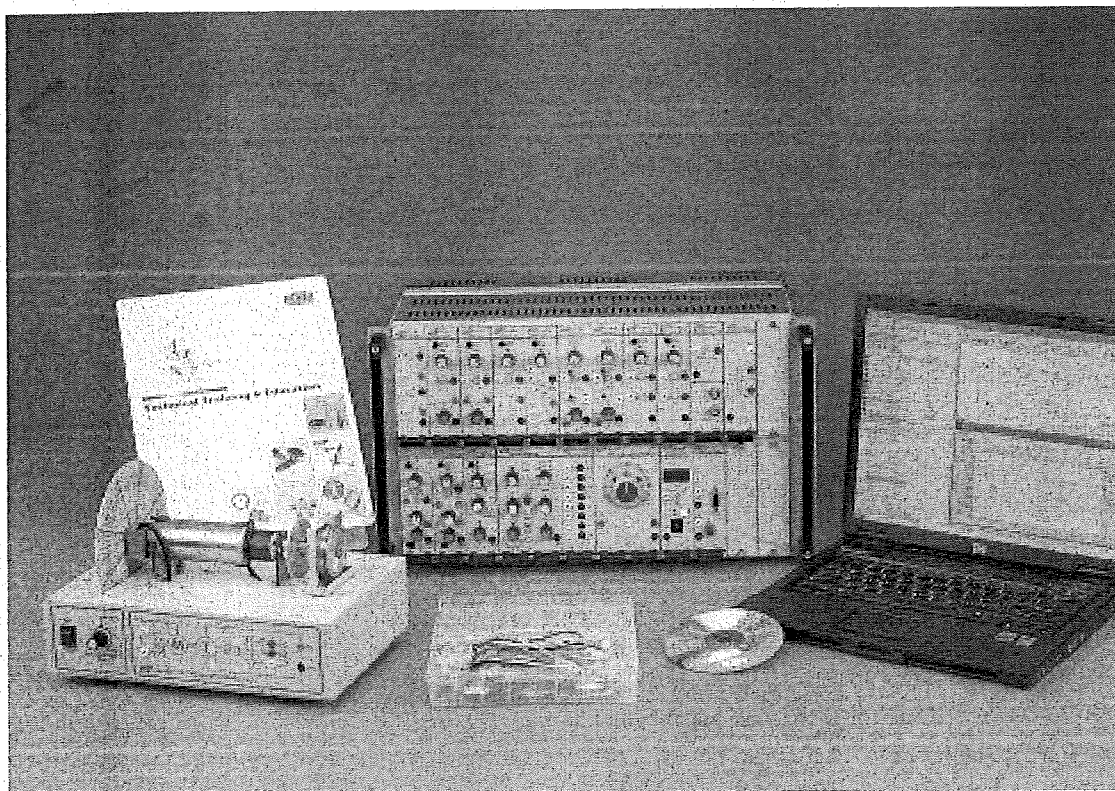


Analogowy system sterowania

ACS-1000

PODRECZNIK DO ĆWICZEŃ (część 1)



K&H MFG CO., LTD.

5F., No.8, Sec. 4, Ziqiang Rd., Sanzhong Dist., New Taipei City 241, Taiwan R.O.C.

TEL : 886-2-2286-0700 FAX : 886-2-2287-3066

E-Mail : education@kandh.com.tw WEB : <http://www.kandh.com.tw>



SPIS TREŚCI (część 1)

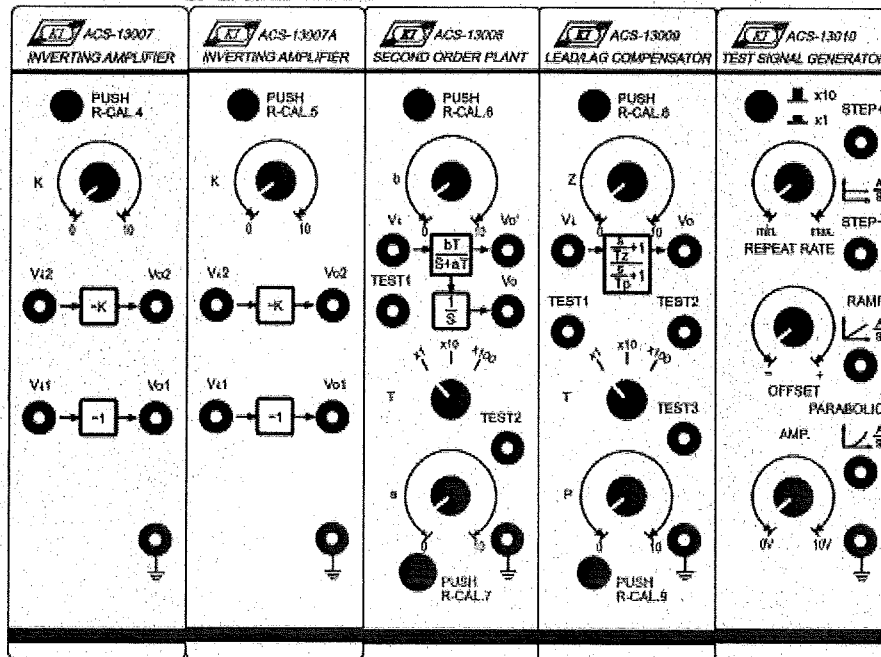
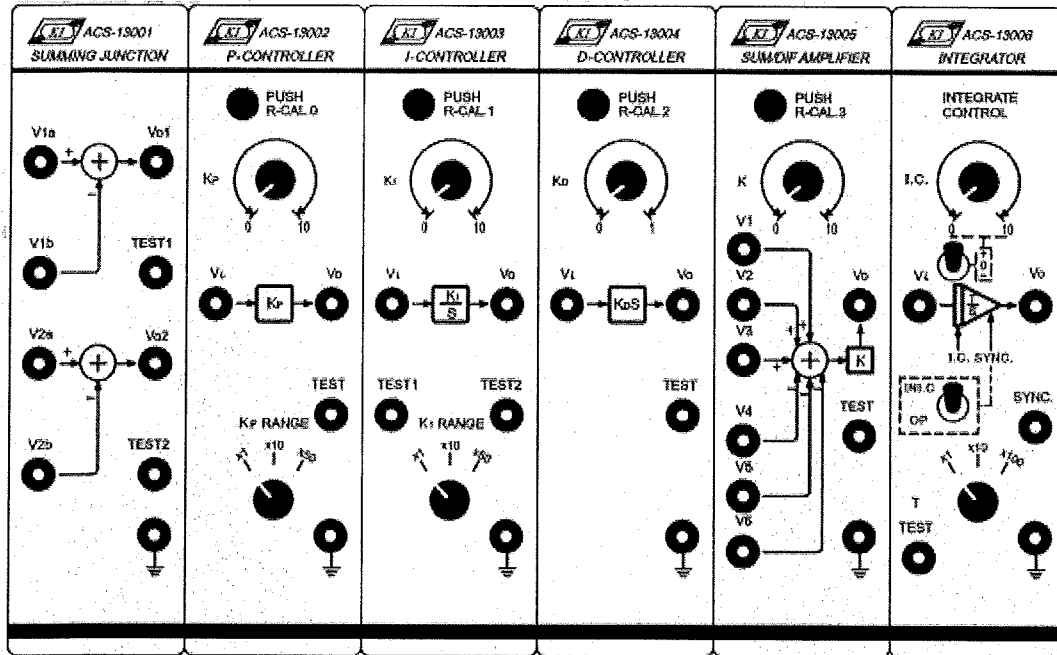
Analogowy system sterowania ACS-1000	1
Wstęp	1
Specyfikacja	3
Opis modułów	6
ACS-13001 UKŁAD SUMUJĄCY.....	7
ACS-13002 REGULATOR PROPORCJONALNY (P-CONTROLLER).....	8
ACS-13003 REGULATOR CAŁKUJĄCY (I-CONTROLLER).....	9
ACS-13004 REGULATOR RÓŻNICZKUJĄCY (D-CONTROLLER).....	12
ACS-13005 WZMACNIACZ SUMUJĄCY/ODEJMUJĄCY.....	13
ACS-13006 UKŁAD CAŁKUJĄCY (INTEGRATOR).....	14
ACS-13007/13007A WZMACNIACZ ODWRACAJĄCY.....	17
ACS-13008 OBIEKT DRUGIEGO RZĘDU.....	18
ACS-13009 WYPRZEDZAJĄCO-OPÓŹNIAJĄCY KOMPENSATOR FAZY.....	20
ACS-13010 GENERATOR SYGNAŁÓW TESTOWYCH.....	22
ACS-13011 GENERATOR FUNKCYJNY.....	25
ACS-13012 SYGNALIZATOR PRZEKROCZENIA ZAKRESU.....	26
ACS-13013 ANALOGOWY STEROWNIK MOCY.....	27
ACS-13014 STEROWNIK PWM SERWOSILNIKA DC.....	28
ACS-13015 LINIOWY POTENCJOMETRYCZNY CZUJNIK KĄTA Z BUFOREM.....	29
ACS-13016 MODUŁ KALIBRACYJNO-POMIAROWY.....	30
Ćwiczenie 1 Transformata Laplace'a	1-1
CEL ĆWICZEŃ.....	1-1
PODSTAWY TEORETYCZNE.....	1-1
PROCEDURA.....	1-2
SYMULACJA SIMULINK.....	1-13
Ćwiczenie 2 Symulacja systemu	2-1
CEL ĆWICZEŃ.....	2-1
PODSTAWY TEORETYCZNE.....	2-1
PROCEDURA.....	2-3
SYMULACJA SIMULINK.....	2-13
Ćwiczenie 3 Uchyb ustalony	3-1
CEL ĆWICZEŃ.....	3-1
PODSTAWY TEORETYCZNE.....	3-1
PROCEDURA.....	3-8
SYMULACJA SIMULINK.....	3-23
Ćwiczenie 4 Systemy pierwszego rzędu	4-1
CEL ĆWICZEŃ.....	4-1
PODSTAWY TEORETYCZNE.....	4-1
PROCEDURA.....	4-5
SYMULACJA SIMULINK.....	4-8
Ćwiczenie 5 Systemy drugiego rzędu	5-1
CEL ĆWICZEŃ.....	5-1
PODSTAWY TEORETYCZNE.....	5-1

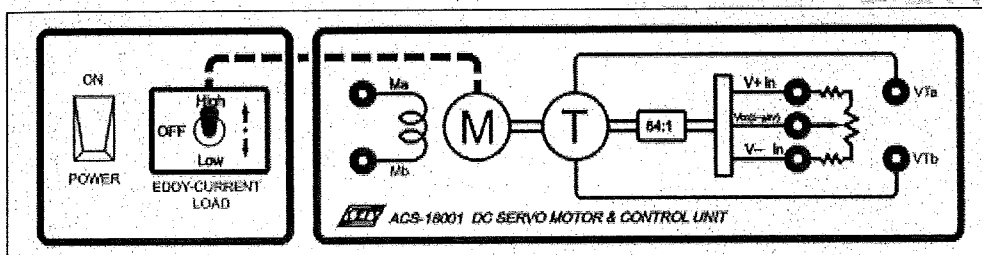
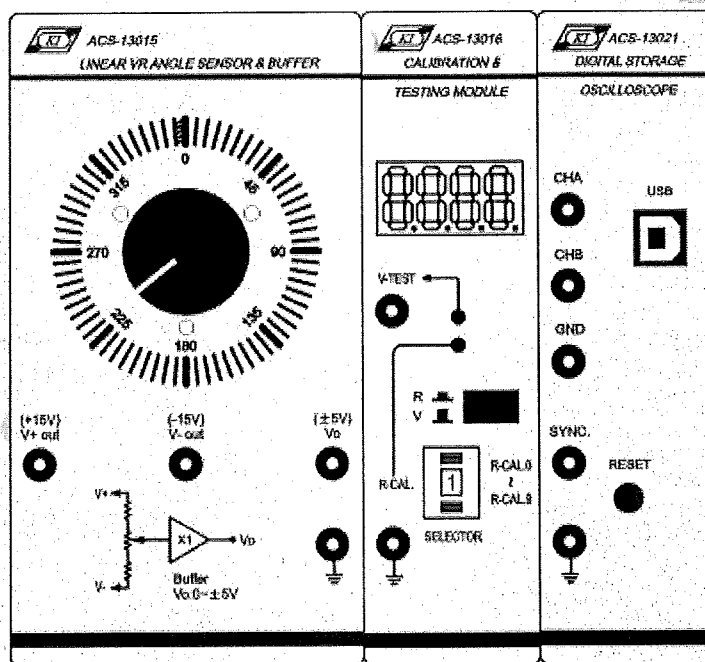
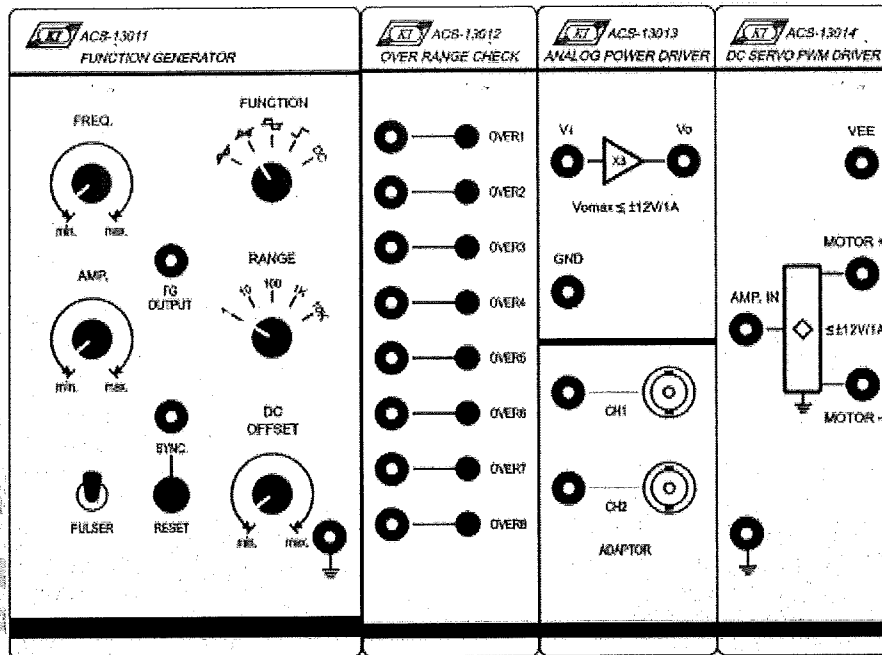
PROCEDURA	5-8
SYMULACJA SIMULINK.....	5-11
Ćwiczenie 6 Charakterystyki systemów w stanie nieustalonym	6-1
CEL ĆWICZEŃ.....	6-1
PODSTAWY TEORETYCZNE.....	6-1
PROCEDURA	6-5
SYMULACJA SIMULINK.....	6-11
Ćwiczenie 7 Efekt zera w systemie pierwszego rzędu.....	7-1
CEL ĆWICZEŃ.....	7-1
PODSTAWY TEORETYCZNE.....	7-1
PROCEDURA	7-3
SYMULACJA SIMULINK.....	7-5
Ćwiczenie 8 Efekt zera w systemie drugiego rzędu.....	8-1
CEL ĆWICZEŃ.....	8-1
PODSTAWY TEORETYCZNE.....	8-1
PROCEDURA	8-5
SYMULACJA SIMULINK.....	8-9
Ćwiczenie 9 Biegun dominujący w systemie drugiego rzędu.....	9-1
CEL ĆWICZEŃ.....	9-1
PODSTAWY TEORETYCZNE.....	9-1
PROCEDURA	9-3
SYMULACJA SIMULINK.....	9-5
Ćwiczenie 10 Charakterystyki serwosilnika DC PM.....	10-1
CEL ĆWICZEŃ.....	10-1
PODSTAWY TEORETYCZNE.....	10-1
PROCEDURA	10-7
Ćwiczenie 11 Regulator proporcjonalny	11-1
CEL ĆWICZEŃ.....	11-1
PODSTAWY TEORETYCZNE.....	11-1
PROCEDURA	11-7
SYMULACJA SIMULINK.....	11-10
Ćwiczenie 12 Zastosowanie regulatora P do kontroli prędkości i położenia serwosilnika prądu stałego	12-1
CEL ĆWICZEŃ.....	12-1
PROCEDURA	12-1

Analogowy system sterowania ACS-1000

Wstęp

Analogowy system sterowania ACS-1000 składa się z 18 modułów sterujących i zespołu sterowania serwowalnikami DC, jak pokazano na rysunku 1. Każdy moduł sterujący reprezentuje jeden z często używanych bloków w systemach sterowania. Moduły zostały zaprojektowane jako pomoc dydaktyczna do nauki teorii analogowych systemów sterowania i ćwiczeń praktycznych z tego zakresu.





Rys. 1 Moduły analogowego systemu sterowania ACS-1000

Specyfikacja

ACS-13001 – UKŁAD SUMUJĄCY

1. 2 obwody sumatorów sygnałów analogowych.
2. Wyjścia testowe przekroczenia zakresu.

ACS-13002 – REGULATOR PROPORCJONALNY (P-CONTROLLER)

1. Ciągła regulacja 0~10 proporcjonalnej stałej K_p (precyzyjny potencjometr 10-obrotowy).
2. Przycisk R-CAL.0 do wyświetlania stałej K_p na wyświetlaczu 7-segmentowym modułu ACS-13016.
3. Przełącznik zakresu stałej K_p : x1, x10, x50
4. Wyjście testowe przekroczenia zakresu.

ACS-13003 – REGULATOR CAŁKUJĄCY (I-CONTROLLER)

1. Ciągła regulacja 0~10 stałej całkowej K_i (precyzyjny potencjometr 10-obrotowy).
2. Przycisk R-CAL.1 do wyświetlania stałej K_i na wyświetlaczu 7-segmentowym modułu ACS-13016.
3. Przełącznik zakresu stałej K_i : x1, x10, x50
4. Wyjście testowe przekroczenia zakresu.

ACS-13004 – REGULATOR RÓŻNICZKUJĄCY (D-CONTROLLER)

1. Ciągła regulacja 0~10 stałej różniczkowej K_D (precyzyjny potencjometr 10-obrotowy).
2. Przycisk R-CAL.2 do wyświetlania stałej K_D na wyświetlaczu 7-segmentowym modułu ACS-13016.
3. Wyjście testowe przekroczenia zakresu.

ACS-13005 – WZMACNIACZ SUMUJĄCY/ODEJMUJĄCY

1. 3 wejścia dodatnie i 3 wejścia ujemne do sumowania sygnałów analogowych.
2. Ciągła regulacja wzmocnienia K w zakresie 0~10 (precyzyjny potencjometr 10-obrotowy).
3. Przycisk R-CAL.3 do wyświetlania stałej K na wyświetlaczu 7-segmentowym modułu ACS-13016.
4. Wyjście testowe przekroczenia zakresu.

ACS-13006 – UKŁAD CAŁKUJĄCY (INTEGRATOR)

1. Wartość początkowa: -10 ~ +10
2. Funkcja regulacji synchronicznej.
3. Ustawienie stałej T : 1, 10, 100
4. Wyjście testowe przekroczenia zakresu.

ACS-13007 – WZMACNIACZ ODWRACAJĄCY

1. Jeden bufor odwracający i jeden wzmacniacz odwracający o wzmocnieniu K 1~10 (precyzyjny potencjometr 10-obrotowy).
2. Przycisk R-CAL.4 do wyświetlania wzmocnienia K na wyświetlaczu 7-segmentowym modułu ACS-13016.

ACS-13007A – WZMACNIACZ ODWRACAJĄCY

1. Jeden bufor odwracający i jeden wzmacniacz odwracający o wzmocnieniu K 1~10 (precyzyjny potencjometr 10-obrotowy).
2. Przycisk R-CAL.5 do wyświetlania wzmocnienia K na wyświetlaczu 7-segmentowym modułu ACS-13016.

ACS-13008 – OBIEKT DRUGIEGO RZĘDU

1. Symulacja obiektów pierwszego i drugiego rzędu.
2. Parametry a i b: 0~10
3. Parametr T: 1, 10, 100
4. Przyciski R-CAL.6 i R-CAL.7 do wyświetlania wartości a i b na wyświetlaczu 7-segmentowym modułu ACS-13016.
5. Wyjścia testowe przekroczenia zakresu.

ACS-13009 – WYPRZEDZAJĄCO-OPÓŹNIAJĄCY KOMPENSATOR FAZY

1. Parametry z i p: 0~10
2. Parametr T: 1, 10, 100
3. Przyciski R-CAL.8 i R-CAL.9 do wyświetlania wartości z i p na wyświetlaczu 7-segmentowym modułu ACS-13016.
4. Wyjścia testowe przekroczenia zakresu.

ACS-13010 – GENERATOR SYGNAŁÓW TESTOWYCH

1. Generacja sygnałów wejściowych dla systemów sterujących.
2. Generator sygnału skokowego (STEP) z wyjściami dodatnim i ujemnym.
3. Generator sygnału narastającego (RAMP) z wyjściem dodatnim.
4. Generator sygnału parabolicznego (PARABOLIC) z wyjściem dodatnim.
5. Amplituda wraz ze składową stałą: -10V ~ +10V
6. Częstotliwość (precyzyjny potencjometr 10-obrotowy):
Zakres x1: 0,05Hz ~ 10Hz
Zakres x10: 0,5Hz ~ 100Hz

ACS-13011 – GENERATOR FUNKCYJNY

1. Przebiegi wyjściowe: sinus, trójkąt, prostokąt, skok, DC.
2. Impulsy skokowe z funkcją regulacji synchronicznej.
3. Amplituda wraz ze składową stałą: -10V ~ +10V
4. Częstotliwość: 0,1Hz ~ 10kHz z regulacją ciągłą
Zakres 1: 0,1Hz ~ 1,0Hz
Zakres 10: 1Hz ~ 10Hz
Zakres 100: 10Hz ~ 100Hz
Zakres 1K: 100Hz ~ 1kHz
Zakres 10K: 1kHz ~ 10kHz
5. Impedancja wyjściowa: 50Ω

ACS-13012 – SYGNALIZATOR PRZEKROCZENIA ZAKRESU

1. 8 detektorów przekroczenia zakresu.
2. Wskaźnik diodowy świeci, gdy napięcie na jego wejściu przekracza +/-12,7V.

ACS-13013 – ANALOGOWY STEROWNIK MOCY

1. Analogowe napięcie wejściowe: 0~+/-4V; impedancja wejściowa: 1kΩ; wzmocnienie: 3
2. Analogowe napięcie wyjściowe: 0~+/-12V; maksymalny prąd wyjściowy: 1A
3. Ogranicznik amplitudy wejściowej: +/-12V
4. Wyjście z zabezpieczeniem przeciwzwarciowym i ograniczaniem prądu: 1,5A
5. Adaptery przejściowe 2mm na BNC.

ACS-13014 – STEROWNIK PWM SERWOSILNIKA DC

1. Analogowe napięcie wejściowe: 0~±12V
2. Impedancja wejściowa: 100kΩ
3. Wyjście PWM: 0~±12V, sterownik mostkowy PWM, maksymalny prąd wyjściowy: 1A
3. Zabezpieczająca funkcja eliminacji strefy martwej.
4. Wyjście z zabezpieczeniem przeciwzwarciowym i ograniczaniem prądu: 1,5A

ACS-13015 – LINIOWY POTENCJOMETRYCZNY CZUJNIK KĄTA Z BUFOREM

1. Rezystancja: 1kΩ
2. Liniowość: 0,1%
3. Zakres detekcji: 0 ~ 350°
4. Przetwarzanie kąta na analogowe napięcie wyjściowe: -5V ~ +5V
5. Rezystancja wyjściowa: 1kΩ

ACS-13016 – MODUŁ KALIBRACYJNO-POMIAROWY

1. Napięcie wejścia analogowego V-TEST: -15V ~ +15V
2. R.CAL: R-CAL.0 ~ R-CAL.9
3. Wyświetlacz 7-segmentowy: 3¹/₂-cyfry, -19.99~19.99V lub 0.00 ~ 100.0kΩ

ACS-18001 – ZESPÓŁ SERWOSILNIKA DC Z OBWODAMI KONTROLNYMI

1. Serwosilnik DC
 - (1) Napięcie: 24VDC
 - (2) Prąd bez obciążenia: 100mA +30%
 - (3) Maksymalny rzeczywisty moment znamionowy: Tr=211 Gcm
 - (4) Maksymalna znamionowa moc użyteczna: Pr=6,7W +/-20%
 - (5) Moment trzymający: Ts=1150 Gcm +/-15%
 - (6) Rezystancja wyprowadzeń: 11,17Ω +/-15%
 - (7) Indukcyjność wyprowadzeń: 8,2mH +/-10%
 - (8) Stała momentu obrotowego: Kt=0,567 kGcm/A +/-15%
2. Tachometr (na wspólnej osi)
Wyjściowa SEM: Ke = 6,00V/kr.p.m. +/-15%
3. Sprzężony przekładniowo potencjometr do detekcji kąta obrotu
 - (1) Przełożenie: 64:1
 - (2) Impedancja: 1kΩ
 - (3) Liniowość: 0,1%
 - (4) Zakres detekcji kąta: 0 ~ 350°
4. Obciążenie wiropądowe (na wspólnej osi)
Selektor obciążenia: High=100Gcm, Low=10Gcm, OFF=0 +/-20%

ACS-13021 – OSCYLOSKOP CYFROWY (opcja)

1. Opcjonalny moduł oscyloskopu cyfrowego (DSO) może być połączony z komputerem PC przez port USB do rejestracji i analizy danych oraz pomiarów.
2. Kanały wejściowe: 2; CHA i CHB z ogranicznikiem amplitudy
3. 17 zakresów częstotliwości próbkowania (Hz): 1M, 500k, 200k, 100k, 50k, 20k, 10k, 5k, 2k, 1k, 500, 200, 100, 50, 20, 10, 5
4. Napięcie sygnału wejściowego: -10V ~ +10V, składowa stała: -10V ~ +10V
5. Rekord rejestracji: 12 bitów, pojemność pamięci: 2kB

Opis modułów

Odpowiednio do pełnionej funkcji moduły analogowego systemu sterowania ACS-1000 można podzielić na poniższe grupy:

1. Moduły sygnałowe

- ACS-13010 GENERATOR SYGNAŁÓW TESTOWYCH
- ACS-13011 GENERATOR FUNKCYJNY
- ACS-13015 LINIOWY POTENCJOMETRYCZNY CZUJNIK KĄTA Z BUFOREM

2. Moduły regulacyjne

- ACS-13001 UKŁAD SUMUJĄCY
- ACS-13002 REGULATOR PROPORCJONALNY
- ACS-13003 REGULATOR CAŁKUJĄCY
- ACS-13004 REGULATOR RÓŻNICZKUJĄCY
- ACS-13005 WZMACNIACZ SUMUJĄCY/ODEJMUJĄCY
- ACS-13007 WZMACNIACZ ODWRACAJĄCY
- ACS-13009 WYPRZEDZAJĄCO-OPÓŹNIAJĄCY KOMPENSATOR FAZY

3. Moduły emulacyjne

- ACS-13006 UKŁAD CAŁKUJĄCY (INTEGRATOR)
- ACS-13008 OBIEKT DRUGIEGO RZĘDU

4. Moduły pomiarowe

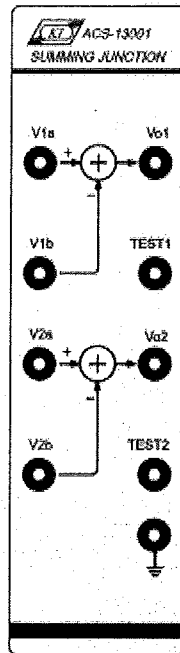
- ACS-13012 SYGNALIZATOR PRZEKROCZENIA ZAKRESU
- ACS-13016 MODUŁ KALIBRACYJNO-POMIAROWY
- ACS-13021 OSCYLOSKOP CYFROWY (opcja)

5. Moduły sterowników

- ACS-13013 ANALOGOWY STEROWNIK MOCY
- ACS-13014 STEROWNIK PWM SERWOSILNIKA DC

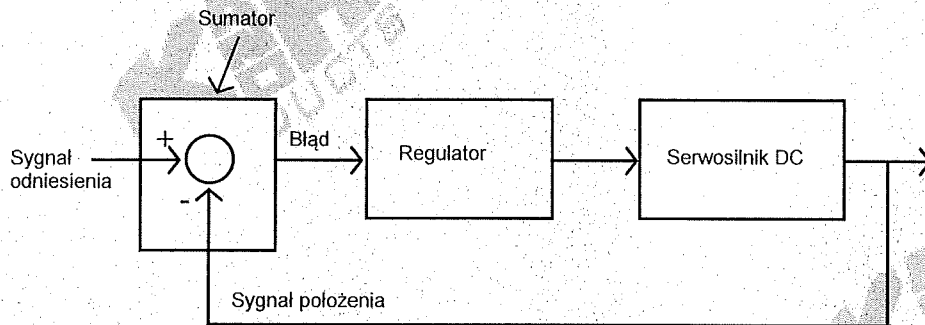
6. Moduły obciążeń

- ACS-18001 ZESPÓŁ SERWOSILNIKA DC Z OBWODAMI KONTROLNYMI



Wprowadzenie

Układ sumujący jest najczęściej używanym elementem systemów sterowania, szczególnie w systemach regulacji ze sprzężeniem zwrotnym. Przykładowo, w systemie regulacji położenia serwośilnika DC pokazanym na rysunku 2 sygnał odniesienia i zwrotny sygnał położenia są podawane na wejścia układu sumującego, który wytwarza sygnał błędny do sterowania zatrzymaniem silnika w zdefiniowanym wcześniej położeniu. Sygnał błędny jest różnicą między dwoma sygnałami wejściowymi sumatora.



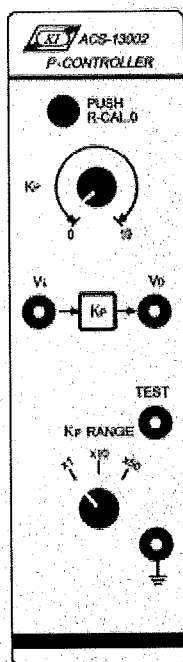
Rys. 2. Schemat blokowy układu regulacji położenia serwośilnika DC

Zastosowanie i testy

1. W module ACS-13011 ustawić na wyjściu FG OUTPUT przebieg sinusoidalny o częstotliwości 100Hz i amplitudzie 1V. Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściem V_{1a} modułu ACS-13001. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć sygnały na wejściu V_{1a} i wyjściu V_{o1} modułu ACS-13001. Oba sygnały powinny mieć taką samą amplitudę i fazę, czyli $V_{o1}=V_{1a}$.
2. Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściem V_{1b} modułu ACS-13001. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć sygnały na wejściu V_{1b} i wyjściu V_{o1} modułu ACS-13001. Te dwa sygnały powinny mieć taką samą amplitudę, ale powinny być przesunięte w fazę o 180° , czyli $V_{o1}=-V_{1b}$.

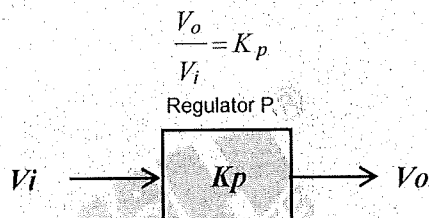
- Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściami V_{1a} i V_{1b} modułu ACS-13001. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć sygnał na wyjściu V_{01} modułu ACS-13001. Zmierzone napięcie powinno mieć wartość $V_{01}=V_{1a}-V_{1b}=0V$.
- Połączyć wyjście TEST1 modułu ACS-13001 z wejściem OVER1 modułu ACS-13012. Potencjometrem DC OFFSET regulować składową stałą sygnału generatora ACS-13011 do zaświecenia się diody OVER1. W takim przypadku napięcie V_{1a} jest większe od +12,7V lub mniejsze od -12,7V.

ACS-13002 REGULATOR PROPORCJONALNY (P-CONTROLLER)



Wprowadzenie

Regulator PID jest jednym z regulatorów najczęściej używanych w przemyśle. Regulator PID jest kombinacją regulatorów: proporcjonalnego (P), całkującego (I) i różniczkującego (D). Dla większej elastyczności regulator PID w systemie ACS-1000 jest podzielony na trzy niezależne regulatory (P, I i D). Rysunek 3 przedstawia schemat blokowy modułu regulatora proporcjonalnego ACS-13002 wraz z opisującym jego działanie równaniem matematycznym.

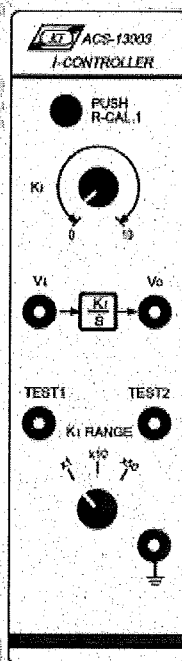


Rys. 3 Regulator proporcjonalny P

Zastosowanie i testy

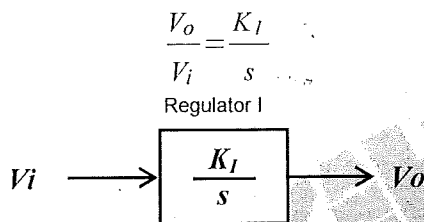
1. W module ACS-13011 ustawić na wyjściu FG OUTPUT przebieg sinusoidalny o częstotliwości 100Hz i amplitudzie 1V, a pokrętkę składowej stałej DC OFFSET przestawić do położenia środkowego. Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściem V_i modułu ACS-13002.
2. W celu ustawienia stałej K_p modułu ACS-13002 na wartość 1 wykonać poniższe kroki:
 - (1) W module ACS-13016 ustawić SELECTOR na 0 (R-CAL.0), a przełącznik R/V ustawić w pozycji R (wciśnięty).
 - (2) W module ACS-13002 nacisnąć przycisk R-CAL.0.
 - (3) Obracać pokrętkę K_p do momentu, aż R-CAL.0 na wyświetlaczu modułu ACS-13016 przyjmie wartość 10, co oznacza, że $K_p=10R$.
3. W module ACS-13002 przestawić selektor K_p RANGE na pozycję x1.
4. Oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_i i wyjściu V_o modułu ACS-13002. Napięcia te powinny być równe $V_o=V_i$.
5. W module ACS-13002 ustawić przełącznik K_p RANGE na pozycji x10. Powtórzyć punkt 4. Napięcia powinny spełniać zależność $V_o=10V_i$.
6. W module ACS-13002 ustawić przełącznik K_p RANGE na pozycji x50. Powtórzyć punkt 4. Napięcia powinny spełniać zależność $V_o=50V_i$.
7. Połączyć punkt testowy TEST modułu ACS-13002 z wejściem OVER1 modułu ACS-13012. Potencjometrem DC OFFSET modułu ACS-13011 regulować składową stałą sygnału do zaświecenia się diody OVER1. W takim przypadku napięcie V_i jest większe od +12,7V lub mniejsze od -12,7V.

ACS-13003 REGULATOR CAŁKUJĄCY (I-CONTROLLER)



Wprowadzenie

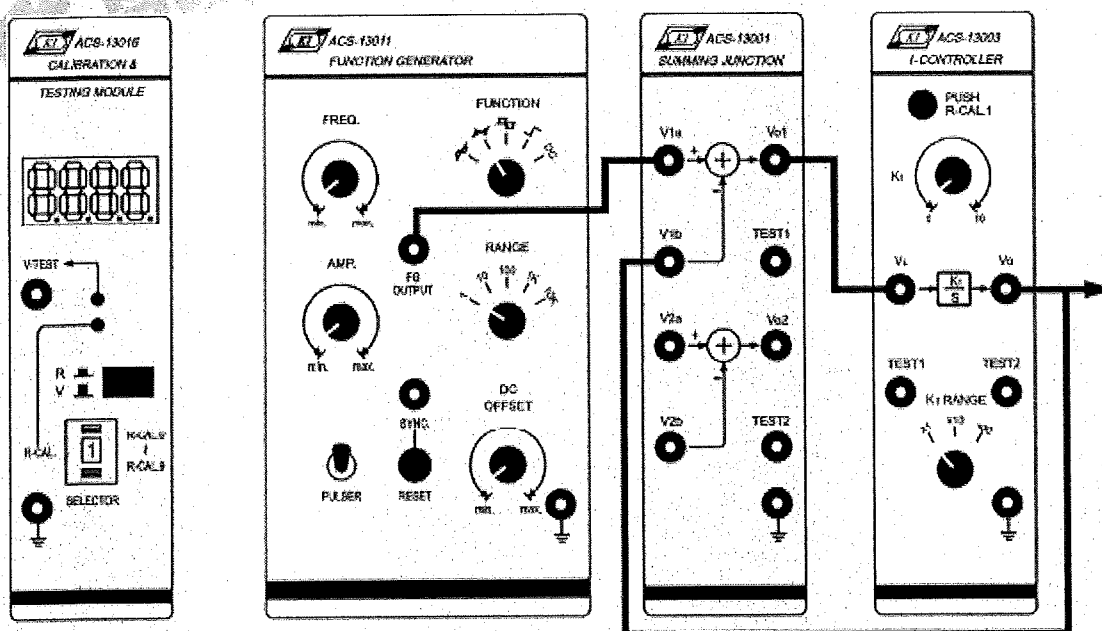
Moduł ACS-13003 I-CONTROLLER realizuje funkcję członu całkującego regulatora PID. Rysunek 4 przedstawia schemat blokowy modułu regulatora całkującego wraz z opisującym jego działanie równaniem matematycznym.



Rys. 4 Regulator całkujący I

Zastosowanie i testy

1. W module ACS-13011 ustawić na wyjściu FG OUTPUT przebieg sinusoidalny o częstotliwości 15,9Hz ($\omega = 100 \text{ rad/s}$) i amplitudzie 1V. Dokonać połączeń modułów zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 5.



Rys. 5 Schemat połączeń obwodu pomiarowego regulatora całkującego

2. W module ACS-13003 przestawić selektor K_I RANGE na pozycję x10.
3. Ustawić stałą K_I na 10 (Odczyt R-CAL.1 na wyświetlaczu modułu ACS-13016 równy jest 100). W tym przypadku wzmocnienie regulatora I jest zgodne z zależnością:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{100}{s}$$

4. Oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_i i wyjściu V_o modułu ACS-13003. Napięcia te powinny być równe $V_o = V_i$, ale napięcie V_o jest opóźnione względem V_i o 90° ponieważ

$$\left\| \frac{V_o}{V_i} \right\| = \left\| \frac{K_I}{s} \right\| = \left\| \frac{100}{j\omega} \right\| = \left\| \frac{100}{j100} \right\| = 1$$

$$\angle \left(\frac{V_o}{V_i} \right) = -90^\circ$$

5. W module ACS-13003 ustawić przełącznik K_I RANGE na pozycji $\times 1$. W tym przypadku wzmocnienie regulatora I jest zgodne z zależnością:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{10}{s}$$

6. Oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_i i wyjściu V_o modułu ACS-13003. $|V_o| = 0,1 |V_i|$ i napięcie V_o jest opóźnione względem V_i o 90° ponieważ

$$\left\| \frac{V_o}{V_i} \right\| = \left\| \frac{K_I}{s} \right\| = \left\| \frac{10}{j\omega} \right\| = \left\| \frac{10}{j100} \right\| = 0,1$$

$$\angle \left(\frac{V_o}{V_i} \right) = -90^\circ$$

7. W module ACS-13003 ustawić przełącznik K_I RANGE na pozycji $\times 50$. W tym przypadku wzmocnienie regulatora I jest zgodne z zależnością:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{500}{s}$$

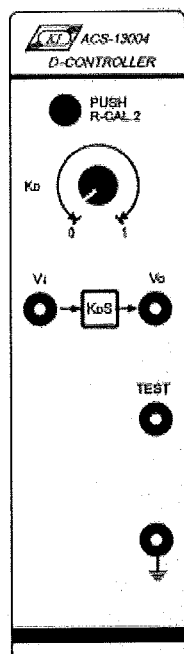
8. Oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_i i wyjściu V_o modułu ACS-13003. $|V_o| = 5 |V_i|$ i napięcie V_o jest opóźnione względem V_i o 90° ponieważ

$$\left\| \frac{V_o}{V_i} \right\| = \left\| \frac{K_I}{s} \right\| = \left\| \frac{500}{j\omega} \right\| = \left\| \frac{500}{j100} \right\| = 5$$

$$\angle \left(\frac{V_o}{V_i} \right) = -90^\circ$$

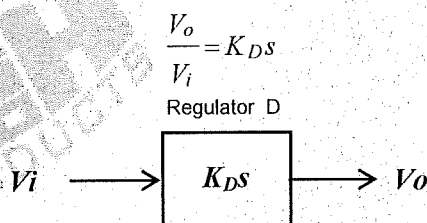
9. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć sygnał na wyjściu TEST1 modułu ACS-13003. Amplituda sygnału jest równa $|TEST1| = \frac{K_I |V_i|}{10}$, gdzie K_I jest stałą ustawioną potencjometrem K_I .

10. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć sygnał na wyjściu TEST2 modułu ACS-13003. Amplituda sygnału jest równa $|TEST2| = \frac{|V_o|}{10 \times K_I \text{ RANGE}}$.



Wprowadzenie

Moduł ACS-13004 D-CONTROLLER realizuje funkcję członu różniczkującego regulatora PID. Rysunek 6 przedstawia schemat blokowy modułu regulatora D wraz z opisującym jego działanie równaniem matematycznym.



Rys. 6 Regulator różniczkujący

Zastosowanie i testy

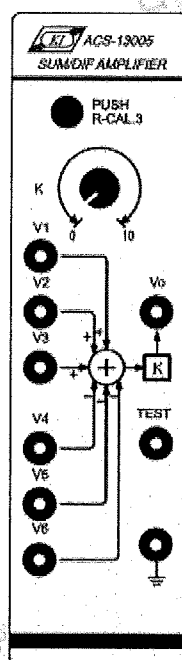
1. W module ACS-13011 ustawić na wyjściu FG OUTPUT przebieg sinusoidalny o częstotliwości 15,9Hz ($\omega = 100 \text{ rad/s}$) i amplitudzie 1V. Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściem V_i modułu ACS-13004.
2. W module ACS-13004 ustawić stałą K_D na wartość 0.1. Odczyt R-CAL.2 na wyświetlaczu modułu ACS-13016 jest równy 10, ponieważ $K_D=0.01R$.
3. Oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_i i wyjściu V_o modułu ACS-13004. $V_o=10V_i$, a napięcie V_o wyprzedza napięcie V_i o 90° ponieważ

$$\left\| \frac{V_o}{V_i} \right\| = \left\| K_D s \right\| = \left\| j0.1\omega \right\| = \left\| j10 \right\| = 10$$

$$\angle \left(\frac{V_o}{V_i} \right) = 90^\circ$$

4. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć sygnał na wyjściu TEST modułu ACS-13004. Amplituda sygnału jest równa $|TEST| = -\frac{K_D |V_i|}{10}$, gdzie K_D jest stałą ustawioną potencjometrem K_D .

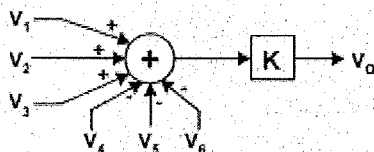
ACS-13005 WZMACNIACZ SUMUJĄCY/ODEJMUJĄCY



Wprowadzenie

Układ sumujący/odejmujący jest jednym z najczęściej używanych elementów w systemach sterowania, który realizuje operacje dodawania lub odejmowania wielu sygnałów wejściowych. Moduł ACS-13005 składa się z członu sumującego/odejmującego oraz wzmacniacza z regulowanym wzmocnieniem K . Na rysunku 7 pokazano schemat blokowy modułu ACS-13005 wraz z opisującym jego działanie równaniem matematycznym.

$$V_o = K(V_1 + V_2 + V_3 - V_4 - V_5 - V_6)$$



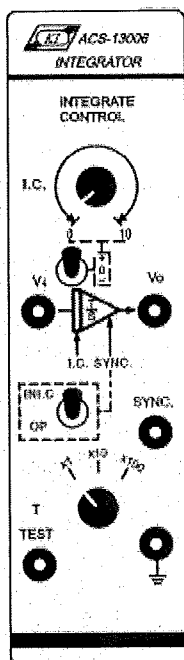
Rys. 7 Wzmacniacz sumujący/odejmujący ACS-13005

Zastosowanie i testy

1. W module ACS-13011 ustawić na wyjściu FG OUTPUT przebieg sinusoidalny o częstotliwości 15,9Hz ($\omega = 100$ rad/s) i amplitudzie 1V. Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściem V_1 modułu ACS-13005.
2. W module ACS-13005 ustawić wzmocnienie K na 1 (odczyt R-CAL.3 na wyświetlaczu modułu ACS-13016 jest równy 10).

3. Oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_1 i wyjściu V_o modułu ACS-13005. Powinna być spełniona zależność $V_o = V_1$.
4. Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściem V_2 modułu ACS-13005 i oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_2 i wyjściu V_o modułu ACS-13005. Powinna być spełniona zależność $V_o = V_2$.
5. Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściem V_3 modułu ACS-13005 i oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_3 i wyjściu V_o modułu ACS-13005. Powinna być spełniona zależność $V_o = V_3$.
6. Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściem V_4 modułu ACS-13005 i oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_4 i wyjściu V_o modułu ACS-13005. Powinna być spełniona zależność $V_o = V_4$.
7. Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściem V_5 modułu ACS-13005 i oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_5 i wyjściu V_o modułu ACS-13005. Powinna być spełniona zależność $V_o = V_5$.
8. Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściem V_6 modułu ACS-13005 i oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_6 i wyjściu V_o modułu ACS-13005. Powinna być spełniona zależność $V_o = V_6$.
9. Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściami V_1, V_2, V_3 modułu ACS-13005. Oscyloskopem zmierzyć sygnał na wyjściu TEST modułu ACS-13005. Sygnał wyjściowy spełnia warunek $|TEST| = |V_1 + V_2 + V_3|$.

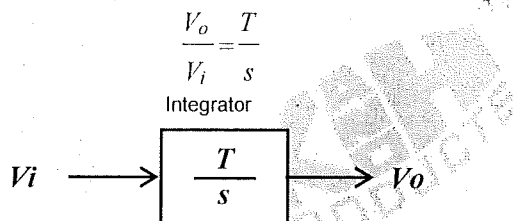
ACS-13006 UKŁAD CAŁKUJĄCY (INTEGRATOR)



Wprowadzenie

Mimo, że równania różniczkowe są zwykle używane do opisu obiektów lub rzeczywistych systemów, to układ różniczkujący nie ma zastosowania w symulacji takich systemów. Podstawowym tego powodem jest fakt, że wzmocnienie układu różniczkującego zwiększa się w miarę wzrostu częstotliwości sygnału. Ponieważ zasadniczo szum jest sygnałem o wysokiej częstotliwości, to zastosowanie w obwodzie układu różniczkującego znacząco pogarsza jakość sygnału. W konsekwencji układ całkujący jest istotnym elementem w symulacji systemów analogowych.

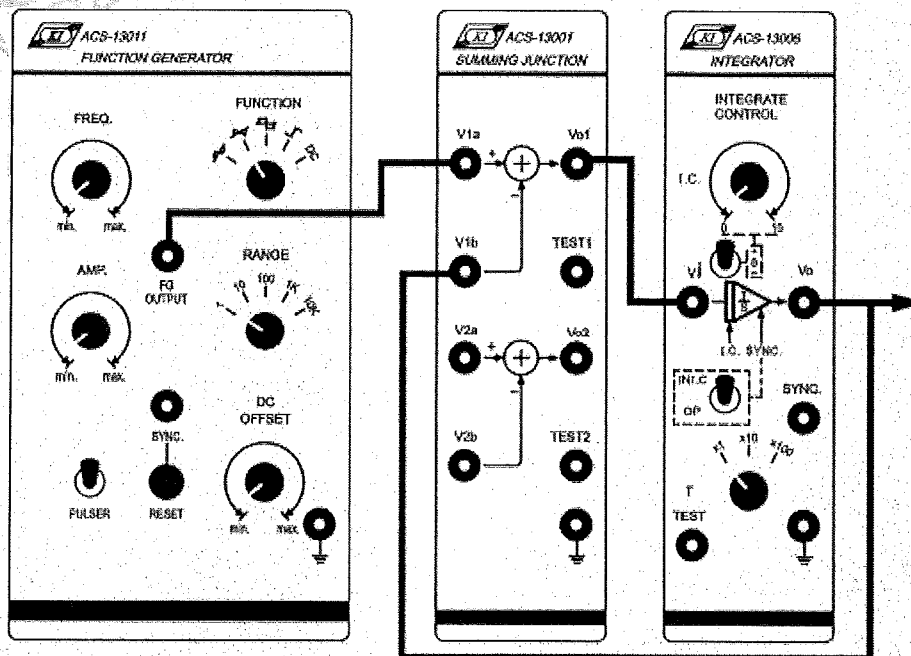
Analogowy system sterowania ACS-1000 zawiera 2 moduły całkujące ACS-13006. Na rysunku 8 pokazano schemat blokowy modułu ACS-13006 wraz z opisującym jego działanie równaniem matematycznym.



Rys. 8 Układ całkujący ACS-13006

Zastosowanie i testy

1. W module ACS-13011 ustawić na wyjściu FG OUTPUT przebieg sinusoidalny o częstotliwości 1,59Hz ($\omega = 100$ rad/s) i amplitudzie 1V. Wykonać połączenia modułów zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 9.



Rys. 9 Schemat połączeń obwodu pomiarowego układu całkującego

2. W module ACS-13006 ustawić przełącznik SYNC w pozycji INI.C, a przełącznik I.C. w pozycji +. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć sygnał na wyjściu V_o modułu ACS-13006. Potencjometrem I.C. można regulować wartość V_o w zakresie od 0 do 10V.
3. W module ACS-13006 ustawić przełącznik I.C. w pozycji -. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć sygnał na wyjściu V_o modułu ACS-13006. Potencjometrem I.C. można regulować teraz wartość V_o w zakresie od 0 do -10V.
4. W module ACS-13006 ustawić przełącznik I.C. w pozycji 0. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć sygnał na wyjściu V_o modułu ACS-13006. Przy takim ustawieniu $V_o=0V$ niezależnie od położenia potencjometru I.C.
5. Wartość początkowa całkowania może być ustawiona w punktach 2 do 4. Przed rozpoczęciem całkowania należy ustawić przełącznik SYNC w pozycji INI.C, aby całkowanie rozpoczęło się od ustawionej wartości początkowej.
6. W module ACS-13006 przestawić przełącznik SYNC na pozycję OP i ustawić selektor T na pozycji $\times 10$. Zależność między V_o i V_i opisuje poniższe równanie.

$$\left\| \frac{V_o}{V_i} \right\| = \left\| \frac{T}{s} \right\| = \left\| \frac{10}{j\omega} \right\| = \left\| \frac{10}{j10} \right\| = 1$$

$$\angle \left(\frac{V_o}{V_i} \right) = -90^\circ$$

7. Oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_i i wyjściu V_o modułu ACS-13006. V_o i V_i będą miały taką samą amplitudę, przy czym napięcie V_o będzie wyprzedzało napięcie V_i o 90° .
8. W module ACS-13006 przestawić selektor T na pozycję x1. Zależność między V_o i V_i opisuje poniższe równanie.

$$\left\| \frac{V_o}{V_i} \right\| = \left\| \frac{T}{s} \right\| = \left\| \frac{1}{j\omega} \right\| = \left\| \frac{1}{j10} \right\| = 0,1$$

$$\angle \left(\frac{V_o}{V_i} \right) = -90^\circ$$

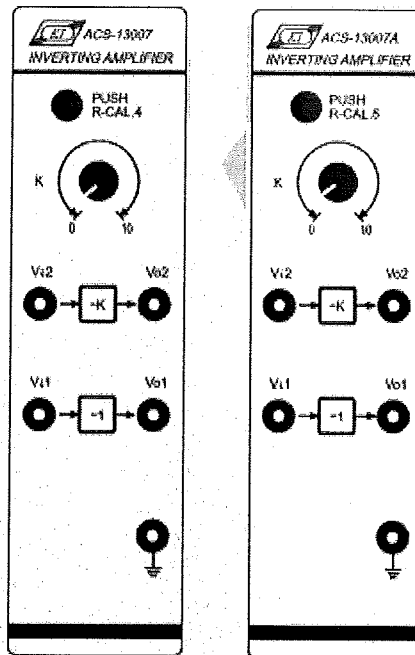
9. Oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_i i wyjściu V_o modułu ACS-13006. $V_o = 0,1V_i$, a napięcie V_o będzie opóźnione względem napięcia V_i o 90° .
10. W module ACS-13006 przestawić selektor T na pozycję x100. Zależność między V_o i V_i opisuje poniższe równanie.

$$\left\| \frac{V_o}{V_i} \right\| = \left\| \frac{T}{s} \right\| = \left\| \frac{100}{j\omega} \right\| = \left\| \frac{100}{j10} \right\| = 10$$

$$\angle \left(\frac{V_o}{V_i} \right) = -90^\circ$$

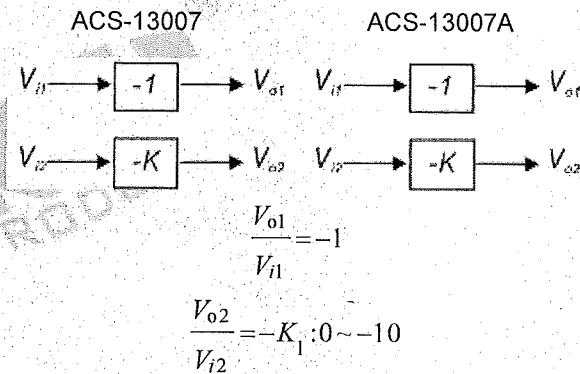
11. Oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_i i wyjściu V_o modułu ACS-13006. $V_o = 10V_i$, a napięcie V_o będzie opóźnione względem napięcia V_i o 90° .
12. Połączyć wyjście TEST modułu ACS-13006 z wejściem OVER1 modułu ACS-13012. Potencjometrem DC OFFSET regulować składową stałą sygnału generatora ACS-13011 do zaświecenia się diody OVER1. W takim przypadku napięcie V_o jest większe od +12,7V lub mniejsze od -12,7V.
13. Aby zsynchronizować oba układy całkujące, połączyć ze sobą oba wejścia SYNC, przełącznik SYNC drugiego integratora ustawić na pozycji OP, a następnie sterować procesem całkowania obu integratorów, używając przełącznika SYNC pierwszego układu całkującego.

ACS-13007/13007A WZMACNIACZ ODWRACAJĄCY



Wprowadzenie

Moduły ACS-13007 i ACS-13007A zawierają po dwa wzmacniacze odwracające. Jeden o wzmacnieniu -1 , a drugi o wzmacnieniu regulowanym. Na rysunku 10 pokazano schematy blokowe wzmacniaczy odwracających wraz z opisującymi ich działania równaniami matematycznymi.



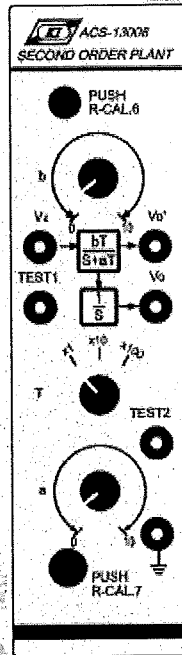
Rys. 10 Schematy blokowe i równania opisujące wzmacniacze odwracające

Zastosowanie i testy

1. W module ACS-13011 ustawić na wyjściu FG OUTPUT przebieg sinusoidalny o częstotliwości 100Hz ($\omega = 100 \text{ rad/s}$) i amplitudzie 1V. Połączyć wyjście FG OUTPUT z wejściem V_{i1} modułu ACS-13007.
2. Oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_{i1} i wyjściu V_{o1} modułu ACS-13007. Napięcia te będą spełniały zależność $V_{o1} = -V_{i1}$.
3. W module ACS-13007 ustawić wzmacnienie K na wartość 2. Odczyt R-CAL.4 na wyświetlaczu modułu ACS-13016 jest równy 20, ponieważ $K=0.1R$.
4. Połączyć wyjście FG OUTPUT z wejściem V_{i2} modułu ACS-13007.
5. Oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_{i2} i wyjściu V_{o2} modułu ACS-13007. $V_{o2} = -2V_{i2}$.

6. W module ACS-13007 ustawić wzmocnienie K na wartość 5. Odczyt R-CAL.4 na wyświetlaczu modułu ACS-13016 jest równy 50.
7. Oscyloskopem zmierzyć sygnały na wejściu V_{i2} i wyjściu V_{o2} modułu ACS-13007. $V_{o2} = -5V_{i2}$.
8. Powtórzyć kroki 1 do 7 w celu przetestowania modułu ACS-13007A. Należy zauważyć, że wartość wzmocnienia K zależy do ustawienia przycisku R-CAL.5 i potencjometru K.

ACS-13008 OBIEKT DRUGIEGO RZĘDU

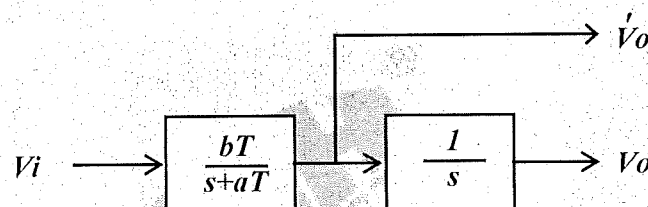


Wprowadzenie

Ponieważ obiekty pierwszego i drugiego rzędu są często używane do symulacji systemów sterowania analogowego, dla wygody system ACS-1000 zawiera moduł ACS-13008 do symulacji obiektów pierwszego i drugiego rzędu. Rysunek 11 prezentuje schemat blokowy modułu ACS-13008 oraz opisujące jego działanie równania matematyczne.

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{bT}{s(s+aT)}$$

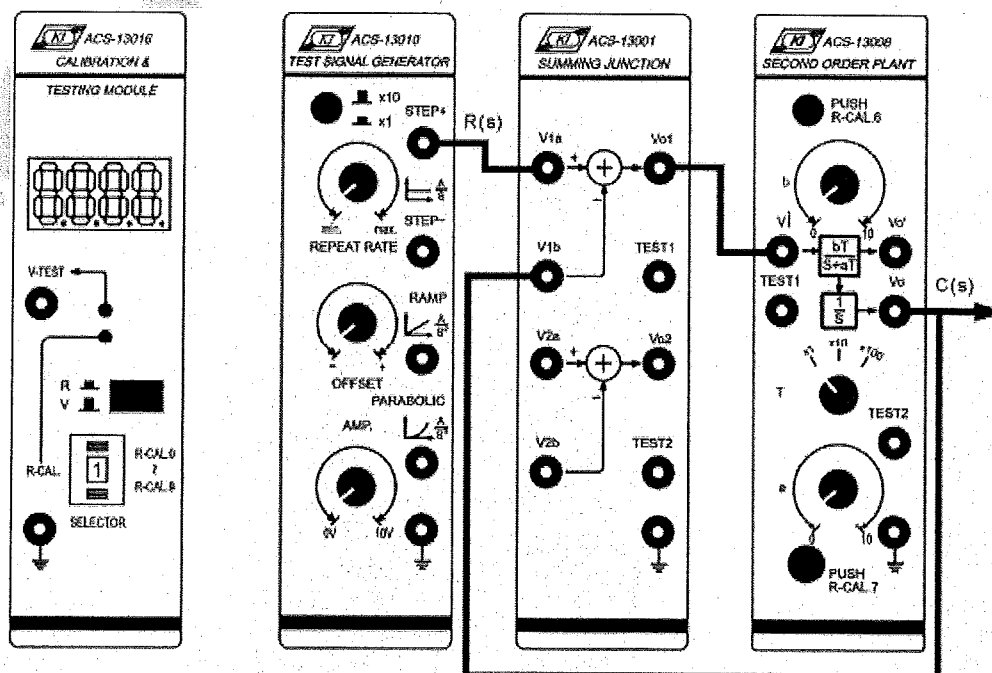
$$\frac{\dot{V}_o}{V_i} = \frac{bT}{s+aT}$$



Rys. 11 Schemat blokowy i równania opisujące obiekt drugiego rzędu

Zastosowanie i testy

1. Połączyć wyjście V_{o1} modułu ACS-13001 z wejściem V_i modułu ACS-13008, wyjście V_o modułu 13008 z wejściem V_{1b} modułu ACS-13001 i wyjście STEP+ modułu ACS-13010 z wejściem V_{1a} modułu ACS-13001, jak pokazano na rysunku 12.
2. Potencjometrem AMP modułu ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ amplitudę 1V przebiegu prostokątnego, a potencjometrem REPEAT RATE ustawić częstotliwość 0,1Hz tego przebiegu.
3. W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10.
4. W module ACS-13008 ustawić potencjometr a na wartość 1 (na wyświetlaczu modułu ACS-13016 odczyt R-CAL.7 wynosi 10).
5. W module ACS-13008 ustawić potencjometr b na wartość 10 (na wyświetlaczu modułu ACS-13016 odczyt R-CAL.6 wynosi 100).



Rys. 12 Schemat połączeń obwodu pomiarowego modułu ACS-13008

6. Funkcja przejściowa systemu ma postać:

$$\frac{C(s)}{R(s) - C(s)} = \frac{bT}{s(s + aT)}$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{100}{s^2 + 10s + 100}$$

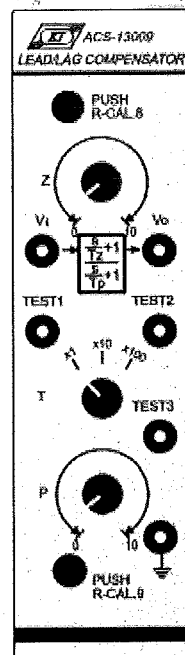
$$\therefore \omega_n = 10, \zeta = 0,5$$

7. Oscyloskopem zmierzyć sygnał na wyjściu V_o modułu ACS013008. Sygnał V_o charakteryzuje się przerostem napięcia. Maksymalny przerost = 16,3% przy 0,36s.
8. Oscyloskopem zmierzyć sygnał na wyjściu TEST1 modułu ACS013008. Sygnał TEST1 jest równy:

$$|TEST1| = -\frac{b|V_i|}{10}$$

9. Oscyloskopem zmierzyć sygnał na wyjściu TEST2 modułu ACS013008. Sygnał TEST2 jest równy:

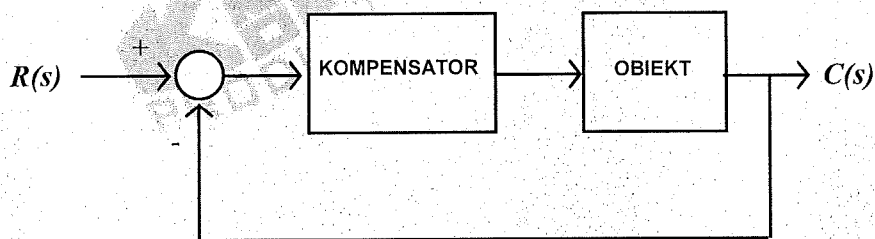
$$|TEST2| = -|V_o|$$



Wprowadzenie

Przy projektowaniu systemów zamkniętych z pętlą sprzężenia zwrotnego konstruktorzy zawsze dążą do stanu, w którym sygnał wyjściowy jest zawsze identyczny z komendą wejściową. Niestety między sygnałem wejściowym a wyjściowym zawsze pojawiają się błędy wynikające z ograniczeń charakterystyki obiektów.

Zwykle przy projektowaniu sterownika w zamknięty system sterowania włączany jest kompensator. Obwód systemu zamkniętego z kompensatorem pokazano na rysunku 13. Kompensatorem jest kompensator wyprzedzający i/lub opóźniający fazy.

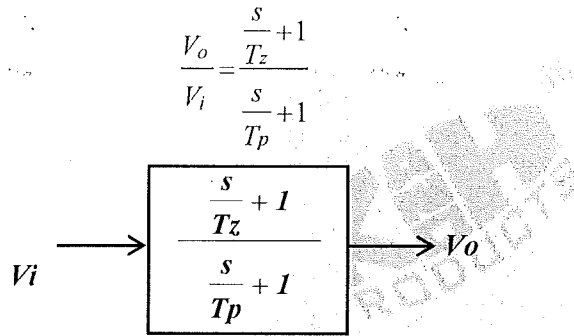


Rys. 13 System zamknięty z kompensatorem

Kompensator z wyprzedzeniem fazy skutecznie poprawia charakterystykę odpowiedzi impulsowej systemu z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego, jak również błąd w stanie ustalonym.

Kompensator z opóźnieniem fazy skutecznie koryguje błąd w stanie ustalonym systemu z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego, ale zmniejsza szybkość odpowiedzi wyjścia.

Moduł ACS-13009 jest kombinacją kompensatorów z wyprzedzeniem i opóźnieniem fazy. Rysunek 14 prezentuje schemat blokowy modułu ACS-13009 wraz z opisującym jego działanie równaniem matematycznym.



Rys. 11 Schemat blokowy i równanie opisujące kompensator fazy ACS-13009

Zastosowanie i testy

1. W module ACS-13011 ustawić na wyjściu FG OUTPUT przebieg sinusoidalny o częstotliwości 15,9Hz ($\omega = 100 \text{ rad/s}$) i amplitudzie 1V. Połączyć wyjście FG OUTPUT z wejściem V_i modułu ACS-13009.
2. W module ACS-13009 ustawić przełącznik T na pozycji x10.
3. W module ACS-13009 ustawić potencjometr z na 1 (odczyt R-CAL.8 w module ACS-13016 wynosi 10).
4. W module ACS-13009 ustawić potencjometr p na 10 (odczyt R-CAL.9 w module ACS-13016 wynosi 100).
5. Funkcja przejściowa systemu będzie miała postać:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{s}{10} + 1}{\frac{s}{100} + 1}$$

6. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć sygnały na wejściu V_i i wyjściu V_o modułu ACS-13009. $V_o = 7,11V_i$ ponieważ:

$$\left\| \frac{V_o}{V_i} \right\| = \left\| \frac{\frac{s}{10} + 1}{\frac{s}{100} + 1} \right\| = \left\| \frac{\frac{j100}{10} + 1}{\frac{j100}{100} + 1} \right\| \approx 7.11$$

7. Zmienić częstotliwość na 1,59Hz ($\omega = 10 \text{ rad/s}$), pozostawiając amplitudę 1V.
8. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć sygnały na wejściu V_i i wyjściu V_o modułu ACS-13009. $V_o = 1,41V_i$ ponieważ:

$$\left\| \frac{V_o}{V_i} \right\| = \left\| \frac{\frac{s}{10} + 1}{\frac{s}{100} + 1} \right\| = \left\| \frac{\frac{j10}{10} + 1}{\frac{j10}{100} + 1} \right\| \approx 1.41$$

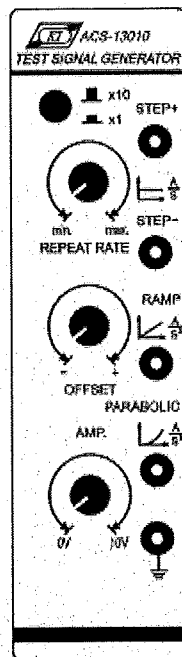
9. W module ACS-13009 zmienić ustawienie regulatora z na 10 a regulatora p na 1. Funkcja przejściowa systemu będzie miała postać:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{s}{100} + 1}{\frac{s}{10} + 1}$$

10. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć sygnały na wejściu V_i i wyjściu V_o modułu ACS-13009. $V_o=0,71V_i$ ponieważ:

$$\left\| \frac{V_o}{V_i} \right\| = \left\| \frac{\frac{s}{100} + 1}{\frac{s}{10} + 1} \right\| = \left\| \frac{j10}{100} + 1 \right\| \approx 0,71$$

ACS-13010 GENERATOR SYGNAŁÓW TESTOWYCH



Wprowadzenie

Moduł generatora ACS-13010 dostarcza trzy sygnały testowe do pomiarów i oceny pracy systemu sterowania. Najczęściej używanymi sygnałami testowymi są:

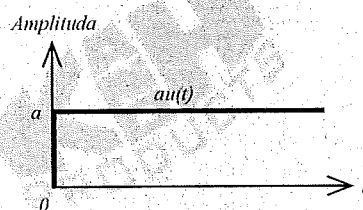
1. Sygnał skoku jednostkowego:

$$r(t) = \begin{cases} a & \text{jeżeli } t \geq 0 \\ 0 & \text{jeżeli } t < 0 \end{cases} \quad \text{lub} \quad r(t) = au(t)$$

Przekształcenie w dziedzinę Laplace'a

$$R(s) = \frac{a}{s}$$

Przebieg skoku jednostkowego w dziedzinie czasu pokazano na rysunku 15.



Rys. 15 Sygnał skoku jednostkowego

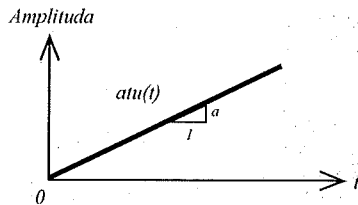
2. Sygnał narastający liniowo (*Ramp*):

$$r(t) = \begin{cases} at & \text{jeżeli } t \geq 0 \\ 0 & \text{jeżeli } t < 0 \end{cases} \quad \text{lub} \quad r(t) = atu(t)$$

Przekształcenie w dziedzinę Laplace'a

$$R(s) = \frac{a}{s^2}$$

Przebieg sygnału narastającego liniowo w dziedzinie czasu pokazano na rysunku 16.



Rys. 16 Sygnał narastający liniowo (*Ramp*)

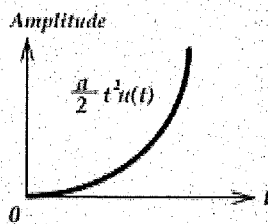
3. Sygnał narastający wykładniczo (*Parabolic*):

$$r(t) = \begin{cases} \frac{a}{2}t^2 & \text{jeżeli } t \geq 0 \\ 0 & \text{jeżeli } t < 0 \end{cases} \quad \text{lub} \quad r(t) = \frac{a}{2}t^2 u(t)$$

Przekształcenie w dziedzinę Laplace'a

$$R(s) = \frac{a}{s^3}$$

Przebieg sygnału narastającego wykładniczo w dziedzinie czasu pokazano na rysunku 17.



Rys. 17 Sygnał narastający wykładniczo (*Parabolic*)

Zastosowanie i testy

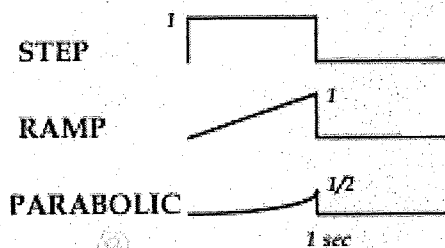
1. Oscyloskopem zmierzyć napięcie na wyjściu STEP+ modułu ACS-13010, potencjometrem AMP wyregulować amplitudę na 1V, przełącznik x1/x10 ustawić na pozycji x10, a pokrętelem REPEAT RATE ustawić częstotliwość powtarzania na 0,5Hz. Sygnały na wyjściach STEP, RAMP i PARABOLIC opisują zależności:

$$\text{STEP} = \frac{1}{s}$$

$$\text{RAMP} = \frac{1}{s^2}$$

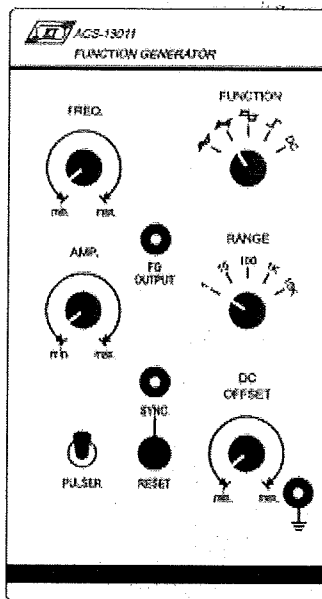
$$\text{PARABOLIC} = \frac{1}{s^3}$$

2. Ponieważ sygnał skoku jednostkowego zmienia swój stan w chwili $t=0$, to dla wygody użytkownika wszystkie trzy sygnały testowe są generowane w formie przebiegów okresowych. Za pomocą oscyloskopu zmierz sygnały na wyjściach STEP, RAMP i PARABOLIC, które będą wyglądać jak na poniższym rysunku.



3. Regulować pokrętelem REPEAT RATE i sprawdzać częstotliwość wyjściową:
przełącznik x1/x10 w pozycji x1: 0,05Hz ~ 10Hz
przełącznik x1/x10 w pozycji x10: 0,5Hz ~ 100Hz

ACS-13011 GENERATOR FUNKCYJNY



Wprowadzenie

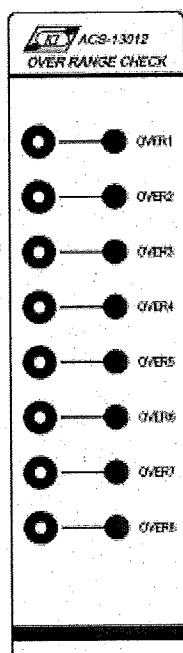
Moduł generatora funkcyjnego ACS-13011 dostarcza sygnały wymagane do ćwiczeń i testów systemu sterowania.

1. Przebiegi wyjściowe:
 - (1) Sinus
 - (2) Trójkąt
 - (3) Prostokąt
 - (4) Skok
 - (5) DC
2. Możliwość regulacji amplitudy dodatniej i ujemnej oraz składowej stałej. Amplituda i częstotliwość wyjściowa sygnałów generatora wynoszą:
 - (1) Amplituda: regulowana potencjometrem AMP w zakresie 0 ~ +/-10V
 - (2) Składowa stała: regulowana potencjometrem DC OFFSET w zakresie 0 ~ +/-10V
 - (3) Częstotliwość: ustawiana potencjometrem FREQ w zależności od pozycji przełącznika zakresów RANGE:
 - Pozycja 1: 0,1Hz ~ 1,0Hz
 - Pozycja 10: 1Hz ~ 10Hz
 - Pozycja 100: 10Hz ~ 100Hz
 - Pozycja 1K: 100Hz ~ 1kHz
 - Pozycja 10K: 1kHz ~ 10kHz
3. Impedancja wyjściowa: 1k Ω

Zastosowanie i testy

1. Ustawiać przełącznik zakresów RANGE na kolejnych pozycjach, kontrolując częstotliwość wyjściową:
Pozycja 1: 0,1Hz ~ 1,0Hz
Pozycja 10: 1Hz ~ 10Hz
Pozycja 100: 10Hz ~ 100Hz
Pozycja 1K: 100Hz ~ 1000Hz
Pozycja 10K: 1000Hz ~ 10000Hz
2. W module ACS-13011 ustawić przełącznik funkcji wyjściowej FUNCTION na pozycji przebiegu impulsowego. Oscyloskopem zmierzyć sygnał na wyjściu FG OUTPUT i nacisnąć przycisk PULSER. Na wyjściu powinien pojawić się skok napięcia o poziomie ustawionym potencjometrem AMP. Zwolnić przycisk PULSER. Na wyjściu powinien pojawić się stan niski o poziomie ustawionym potencjometrem AMP.
3. Połączyć wyjście SYNC modułu ACS-13011 z wejściem SYNC modułu ACS-13006 i przełącznik SYNC w module ACS-13006 przestawić na pozycję OP. W takim przypadku przycisk PULSER służy do sterowania operacją całkowania w module ACS-13006. Nacisnąć przycisk PULSER, aby rozpocząć proces całkowania. Po zwolnieniu przycisku PULSER całkowanie trwa nadal, aż do naciśnięcia przycisku RESET.

ACS-13012 SYGNALIZATOR PRZEKROCZENIA ZAKRESU



Wprowadzenie

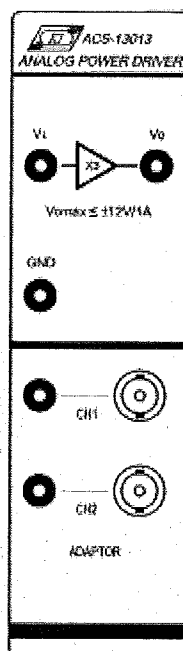
W automatycznych systemach sterowania stan nasycenia lub sygnał przekraczający dopuszczalny zakres może powodować uszkodzenie systemu lub utratę kontroli nad sterowanym obiektem. Z tego powodu sygnał wyjściowy każdego stopnia systemu musi być monitorowany w czasie rzeczywistym.

Moduł ACS-13012 zawiera 8 kanałów monitorujących sygnały – wejścia od OVER1 do OVER8. Gdy napięcie podane na wejście danego kanału jest większe od +12,7V lub mniejsze od -12,7V, zapala się dioda LED tego kanału, ostrzegając użytkownika o przekroczeniu poziomu dopuszczalnego przez kontrolowany sygnał.

Zastosowanie i testy

1. Na wyjściu FG OUTPUT modułu ACS-13011 ustawić sygnał prostokątny o częstotliwości 100Hz i amplitudzie 1V z zerową składową stałą (pokrętko DC OFFSET w położeniu środkowym).
2. Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściem OVER1 modułu ACS-13012. Powoli obracać pokrętko DC OFFSET w prawo, aby zwiększyć wartość składowej stałej sygnału, i oscyloskopem mierzyć sygnał na wyjściu FG OUTPUT. Gdy napięcie wyjściowe jest większe od +12,7V, zapala się dioda OVER1.
3. Obracać pokrętko DC OFFSET w lewo i oscyloskopem mierzyć sygnał na wyjściu FG OUTPUT. Gdy napięcie wyjściowe będzie mniejsze od -12,7V, zapali się dioda OVER1.
4. Powtórzyć punkty 1 do 3, podłączając sygnał wyjściowy generatora kolejno do wejść od OVER2 do OVER8.

ACS-13013 ANALOGOWY STEROWNIK MOCY

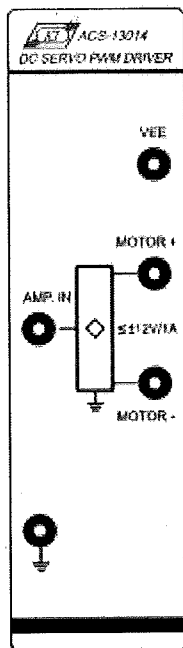


Wprowadzenie

Moduł ACS-13013 jest zbudowany w oparciu o 20W wzmacniacz analogowy w układzie przeciwsobnym. Moduł ten jest używany do sterowania obciążeniami analogowymi, jak silniki DC, serwo-silniki DC czy grzałki elektryczne.

Zastosowanie i testy

1. Na wyjściu FG OUTPUT modułu ACS-13011 ustawić sygnał prostokątny o częstotliwości 100Hz i amplitudzie 1V z zerową składową stałą (pokrętko DC OFFSET w położeniu środkowym).
2. Połączyć wyjście FG OUTPUT modułu ACS-13011 z wejściem V_i modułu ACS-13013. Oscyloskopem zmierzyć sygnał na wyjściu V_o modułu ACS-13013. Stosunek amplitudy wyjściowej do wejściowej (wzmocnienie) wzmacniacza powinien być równy 3.

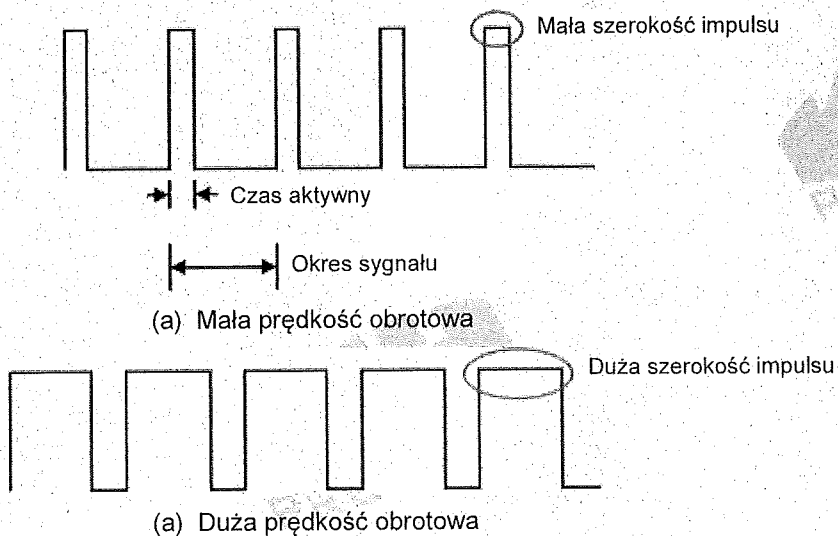


Wprowadzenie

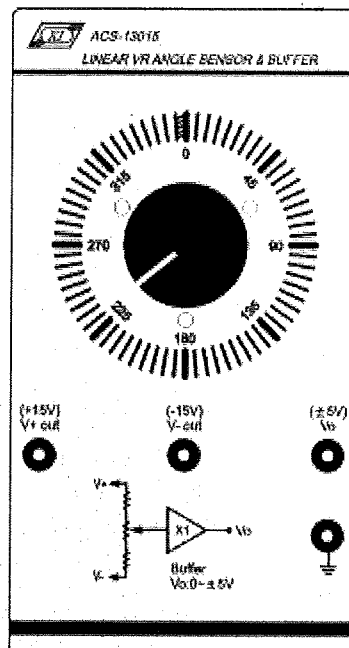
Moduł ACS-13014 jest przeznaczony do sterowania serwośilnika DC modułu ACS-18001. Zastosowana w sterowniku technika PWM (modulacja szerokości impulsów) znacząco poprawia sprawność energetyczną procesu sterowania.

Zasadę pracy układu PWM obrazuje rysunek 18. Na rysunku poziom wysoki odpowiada czasowi aktywnemu (zasilania) silnika, natomiast stan niski – brakowi aktywności silnika (brak zasilania). Suma odcinka wysokiego i sąsiedniego odcinka niskiego przebiegu określana jest okresem sygnału. Stosunek czasu, w którym sygnał ma poziom wysoki (szerokość impulsu), do okresu sygnału, określany jest współczynnikiem wypełnienia przebiegu.

Ponieważ uzwojenie silnika jest elementem o wysokiej indukcyjności, to gdy sygnał PWM jest podawany na zaciski twornika, o prędkości obrotowej silnika decyduje średni prąd płynący przez uzwojenie twornika. Zwiększenie współczynnika wypełnienia sygnału zasilającego silnik zwiększa średnią wartość prądu płynącego przez uzwojenie twornika i w efekcie wirnik silnika obraca się szybciej. W przypadku odwrotnym, zmniejszenie współczynnika wypełnienia sygnału zasilającego zmniejsza średnią wartość prądu płynącego przez uzwojenie silnika, powodując spadek jego prędkości obrotowej.



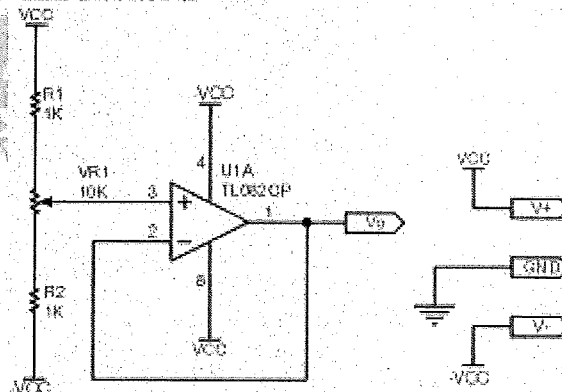
Rys. 18 Działanie regulatora PWM



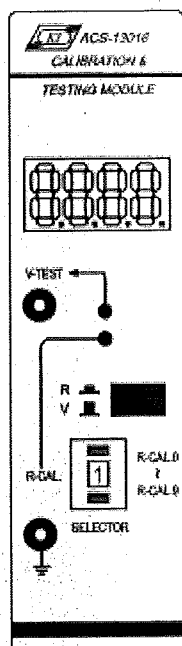
Wprowadzenie

Moduł ACS-13015 składa się z obrotowego liniowego potencjometru o dużym kącie obrotu oraz bufora. W analogowych systemach sterowania potencjometr liniowy jest zwykle używany do detekcji pozycji kątowej.

W celu uniknięcia błędów powodowanych przez obciążenie układu potencjometrycznego zastosowano bufor napięciowy pokazany na rysunku 19.



Rys. 19 Schemat ideowy modułu ACS-13015 z potencjometrem i buforem



Wprowadzenie

Moduł kalibracyjno-pomiarowy ACS-13016 jest przeznaczony do pomiarów i odczytu napięć i rezystancji pokręteł regulacyjnych pozostałych modułów. Do funkcji modułu należą:

1. V-TEST: pomiar napięcia sygnału w zakresie 0 ~ +/-15V
2. R-CAL: pomiar parametrów rezystancyjnych w zakresie 0 ~ 100kΩ
3. Wyświetlacz: 3¹/₂ cyfry, 0000 ~ 15.00V lub 0000 ~ 100.0kΩ

Ćwiczenie 1 Transformata Laplace'a

CEL ĆWICZEŃ

1. Poznanie zastosowań transformaty Laplace'a.
2. Symulacja par transformat Laplace'a poleceniem Simulink.
3. Weryfikacja par transformat Laplace'a z użyciem analogowego systemu sterowania ACS-1000.

PODSTAWY TEORETYCZNE

Podczas studiowania teorii systemów sterowania transformata Laplace'a jest zwykle wykorzystywana do opisu układu sterowania w dziedzinie zespolonej „s”, ponieważ skomplikowane systemy sterowania opisywane są równaniami różniczkowymi wyższego rzędu. Przez zastosowanie transformaty Laplace'a do równań różniczkowych wyższego rzędu, wyrażenia całkowe i różniczkowe są eliminowane i transformowane do postaci wielomianów z argumentem zespolonym „s”. Metoda ta jest szeroko stosowana do wyznaczania stabilności systemów sterowania, dlatego transformata Laplace'a pełni znaczącą rolę w badaniu takich systemów.

Matematycznie transformata Laplace'a jest definiowana jako:

Jeżeli funkcja $f(t)$ spełnia warunek:

$$\int_0^{\infty} |f(t)e^{\sigma t}| dt < \infty$$

gdzie σ jest arbitralnie określoną stałą rzeczywistą, to transformata Laplace'a funkcji $f(t)$ jest opisywana równaniem:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt$$

Przykładowo, jeżeli

$$f(t) = u_s(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

to przekształcenie sygnału skoku jednostkowego w dziedzinę Laplace'a będzie miało postać

$$F(s) = \int_0^{\infty} u_s(t)e^{-st} dt = \frac{1}{s} e^{-st} \Big|_0^{\infty} = \frac{1}{s}$$

W tabeli 1-1 zestawiono pary obliczonych zgodnie z powyższą definicją transformat Laplace'a powszechnie używanych sygnałów.

Tabel 1-1 Pary najczęściej używanych transformat Laplace'a

Dziedzina czasu $f(t)$	Dziedzina zespolona s $F(s)$
a	$\frac{a}{s}$
at	$\frac{a}{s^2}$
$\frac{a}{2} t^2$	$\frac{a}{s^3}$
$\frac{a}{n!} t^n$	$\frac{a}{s^{n+1}}$
e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
$1 - e^{-at}$	$\frac{1}{s} - \frac{1}{s+a}$
te^{-at}	$\frac{1}{(s+a)^2}$
$\sin \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
$\cos \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$e^{-at} \sin \omega t$	$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$

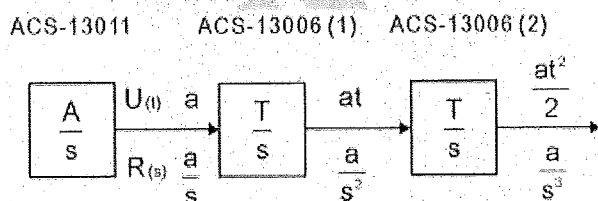
PROCEDURA

A. Weryfikacja funkcji algebraicznych

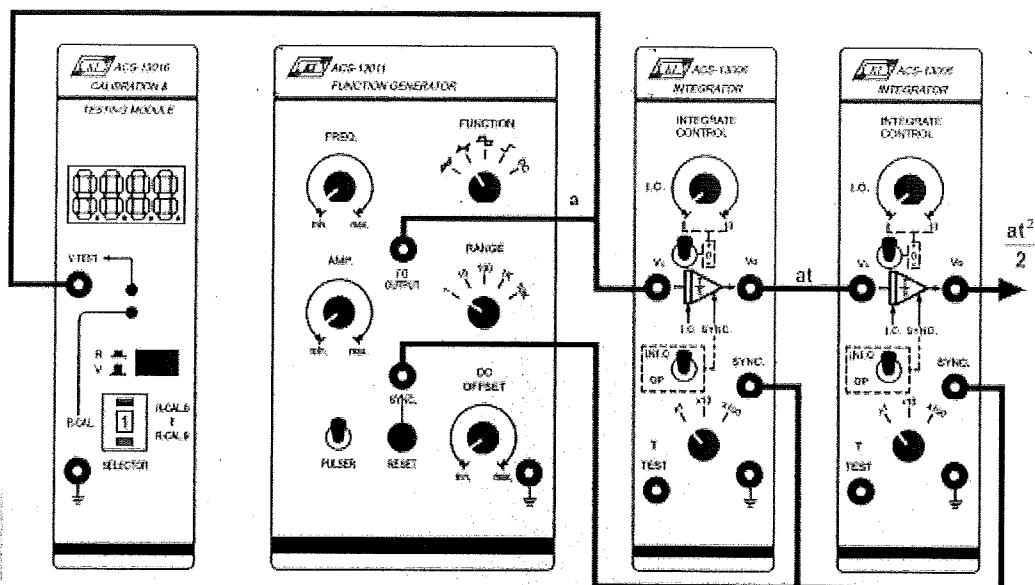
$$a \Leftrightarrow \frac{a}{s}, \quad at \Leftrightarrow \frac{a}{s^2}, \quad \frac{a}{2} t^2 \Leftrightarrow \frac{a}{s^3}$$

Zgodnie z definicją transformaty Laplace'a, jest ona zasadniczo przekształceniem całkowym. Przeprowadzić poniższe czynności z użyciem modułu całującego ACS-13006.

- Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń pokazanymi na rysunku 1-1.



(a) Schemat blokowy



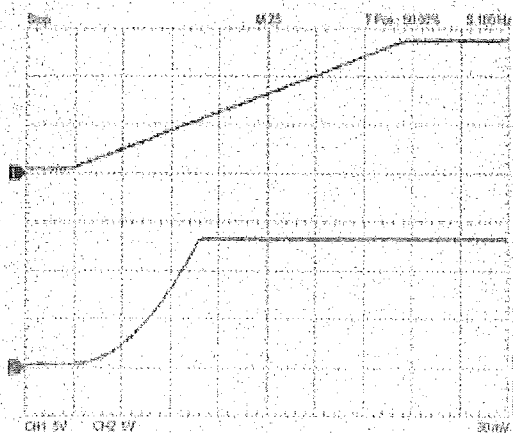
(b) Schemat połączeń układu pomiarowego

Rys. 1-1

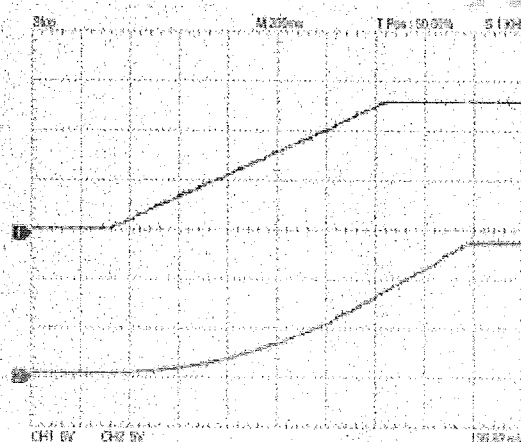
- W module ACS-13011 ustawić przełącznik FUNCTION na pozycję przebiegu impulsowego, potencjometrami DC OFFSET i AMP wyregulować amplitudę impulsu na wyjściu FG OUTPUT na 1Vpp (poziom niski = 0V). Nacisnąć przycisk RESET, aby zatrzymać proces całkowania w integratorach ACS-13006(1) i ACS-13006(2).
- Ustawić przełączniki modułów ACS13006(1) i ACS-13006(2) zgodnie z poniższą tabelą:

Przełącznik	ACS-13006(1)	ACS-13006(2)
T	x1	x1
I.C.	0	0
SYNC.	OP	OP

- Nacisnąć przełącznik PULSER w module ACS-13011. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_o modułów ACS-13006(1) i ACS-13006(2), które pokazano na rysunku 1-2(a). Sygnałami wyjściowymi modułów są odpowiednio sygnały t i $t^2/2$. Zaobserwować czas całkowania od startu procesu do nasycenia.



(a) Sygnał narastający liniowo i paraboliczny



(b) $T_1=10, T_2=1$

Rys. 1-2

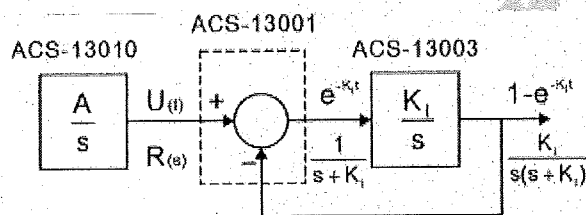
Ponieważ integratory ACS-13006(1) i ACS-13006(2) są wykorzystywane do realizacji operacji całkowania, to wyjścia obu tych układów ulegają nasyceniu po określonym czasie i od tego momentu sygnały nie są już przebiegami t i $t^2/2$. Aby zaobserwować przebiegi t i $t^2/2$, należy przełączyć przełącznik SYNC z pozycji OP na pozycję INI.C i ustawić wartość początkową sygnału na 0 (potencjometr I.C. w pozycji 0). Następnie nacisnąć przycisk PULSER modułu ACS-13011. Integratory ACS-13006 rozpoczną kolejny cykl całkowania.

5. W module ACS-13006(1) zmienić położenie selektora T na pozycję x10. Nacisnąć najpierw przycisk RESET modułu ACS-13011, a następnie przycisk PULSER i za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_o modułów ACS-13006(1) i ACS-13006(2), które pokazano na rysunku 1-2(b).
6. W module ACS-13011 ustawić przełącznik FUNCTION na pozycję przebiegu impulsowego, potencjometrami DC OFFSET i AMP wyregulować amplitudę impulsu na wyjściu FG OUTPUT na 2Vpp (poziom niski = 0V). Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_o modułów ACS-13006(1) i ACS-13006(2). Sygnałami wyjściowymi modułów są odpowiednio sygnały $2t$ i t^2 .

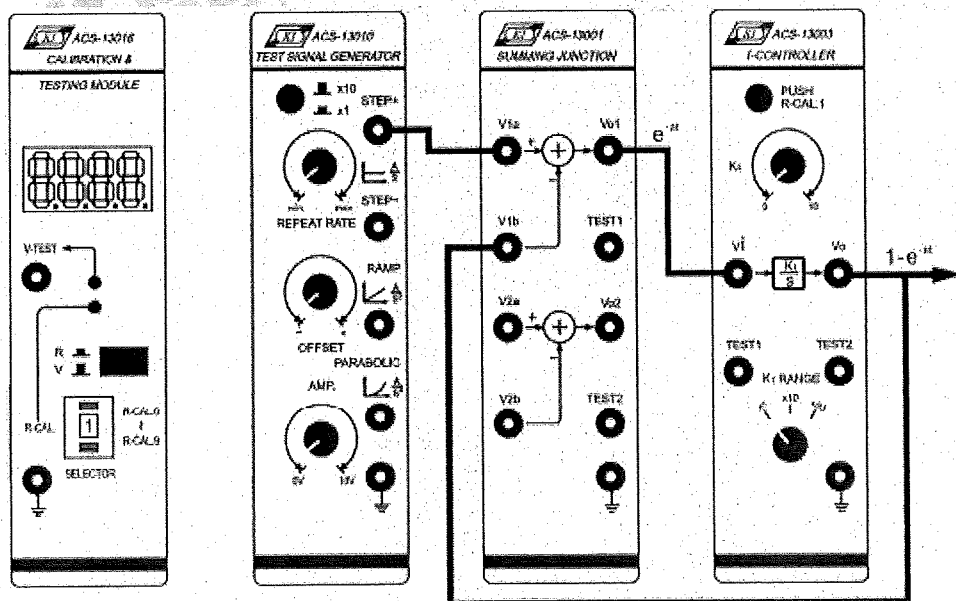
B. Weryfikacja funkcji wykładniczych

$$e^{-at} \Leftrightarrow \frac{1}{s+a}, \quad 1 - e^{-at} \Leftrightarrow \frac{a}{s(s+a)}$$

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń pokazanymi na rysunku 1-3.



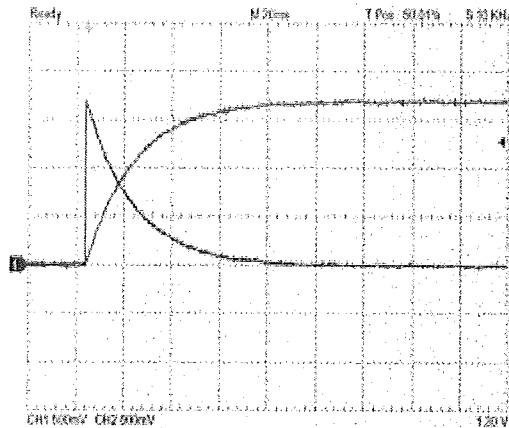
(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń układu pomiarowego

Rys. 1-3

2. W module ACS-13003 ustawić przełącznik K_1 RANGE na pozycję $\times 10$, a potencjometrem K_1 ustawić stałą na $K_1=5$. Takie ustawienie powoduje, że funkcja przejściowa regulatora ACS-13003 będzie równa $50/s$.
3. W module ACS-13010 potencjometrami REPEAT RATE i AMP ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o częstotliwości $0,5\text{Hz}$ i amplitudzie $1,8\text{V}$.
4. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_{o1} modułu ACS-13001 i V_o modułu ACS-13003, które pokazano na rysunku 1-4. Sygnałami wyjściowymi modułów są odpowiednio sygnały e^{-at} i $1 - e^{-at}$.

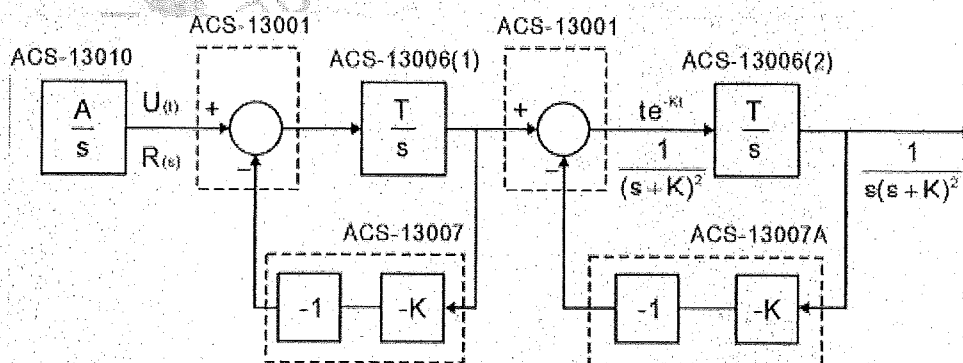


Rys. 1-4 e^{-at} (CH1) i $1 - e^{-at}$ (CH2), $a=50$

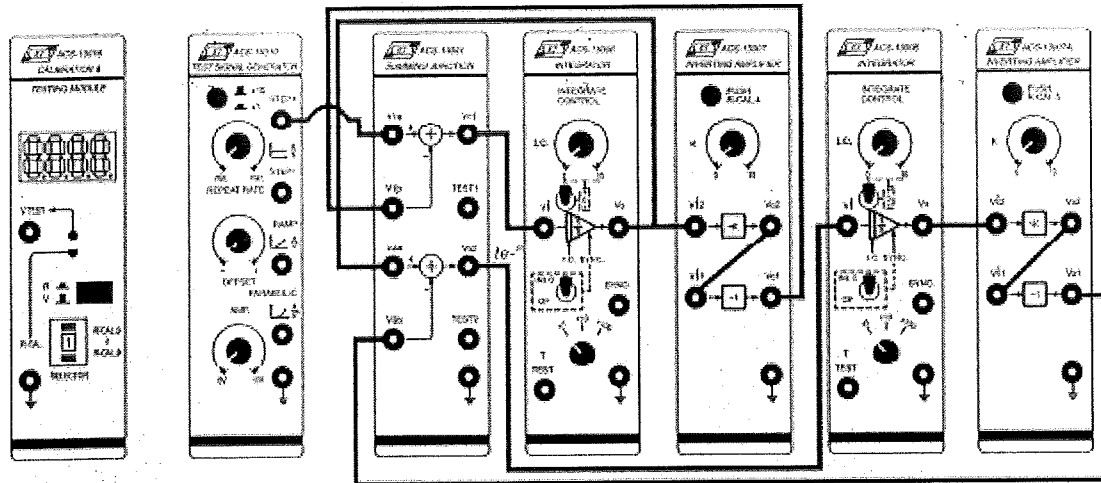
C. Weryfikacja funkcji te^{-at}

$$te^{-at} \leftrightarrow \frac{1}{(s+a)^2}$$

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń pokazanymi na rysunku 1-5.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń układu pomiarowego

Rys. 1-5

2. W modułach ACS-13007 i ACS-13007A potencjometrami K ustawić stałą $K=5$.
3. W module ACS-13010 potencjometrami REPEAT RATE i AMP ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o częstotliwości 0,5Hz i amplitudzie 5V.
4. Ustawić przełączniki modułów ACS13006(1) i ACS-13006(2) zgodnie z poniższą tabelą:

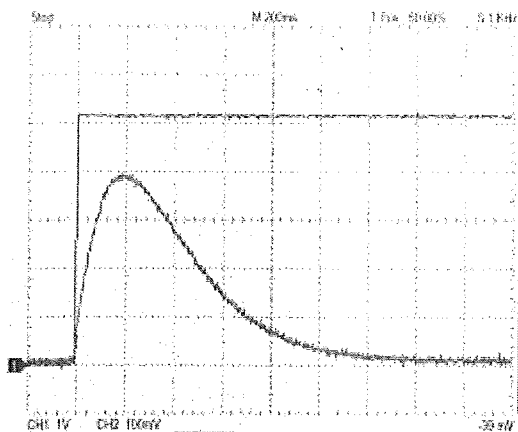
Przełącznik	ACS-13006(1)	ACS-13006(2)
T	x1	x1
I.C.	0	0
SYNC.	OP	OP

5. Zgodnie ze schematem blokowym z rysunku 1-5 sygnał na wyjściu V_{02} modułu ACS-13001(2) będzie wynosił:

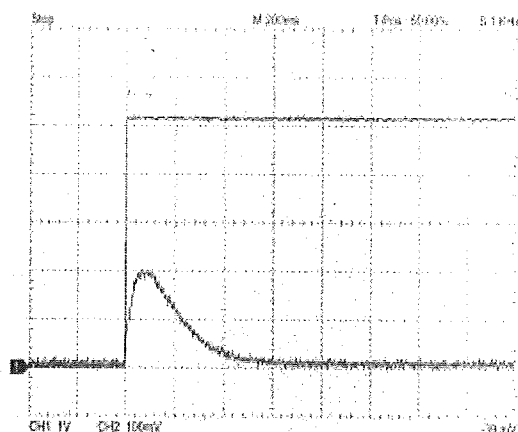
$$\frac{1}{(s+a)^2} = \frac{1}{(s+5)^2}$$

$$\pm^{-1} \left(\frac{1}{(s+5)^2} \right) = te^{-5t}$$

6. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_{02} modułu ACS-13001(2) i STEP+ modułu ACS-13010, które pokazano na rysunku 1-6.



Rys. 1-6



Rys. 1-7

7. W modułach ACS-13007 i ACS-13007A potencjometrami K ustawić stałą K=10.
8. Zgodnie ze schematem blokowym z rysunku 1-5 sygnał na wyjściu V_{02} modułu ACS-13001(2) będzie wynosił:

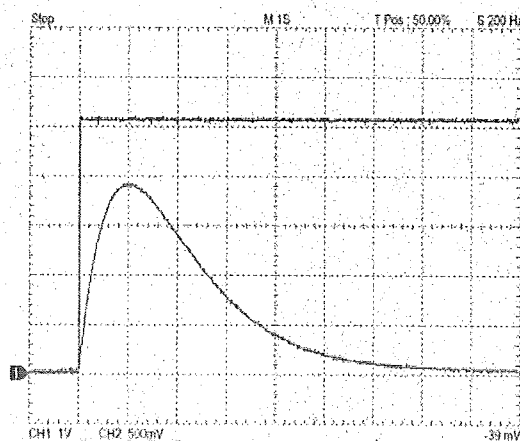
$$\frac{1}{(s+a)^2} = \frac{1}{(s+10)^2}$$

$$\pm^{-1} \left(\frac{1}{(s+10)^2} \right) = te^{-10t}$$

9. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_{02} modułu ACS-13001(2) i STEP+ modułu ACS-13010, które pokazano na rysunku 1-7.
10. W modułach ACS-13007 i ACS-13007A potencjometrami K ustawić stałą K=1.
11. Zgodnie ze schematem blokowym z rysunku 1-5 sygnał na wyjściu V_{02} modułu ACS-13001(2) będzie wynosił:

$$\frac{1}{(s+a)^2} = \frac{1}{(s+1)^2}$$

12. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_{02} modułu ACS-13001(2) i STEP+ modułu ACS-13010, które pokazano na rysunku 1-8.

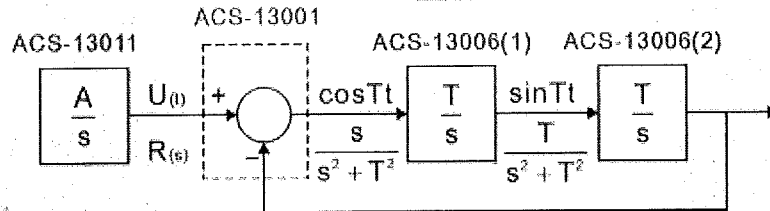


Rys. 1-8

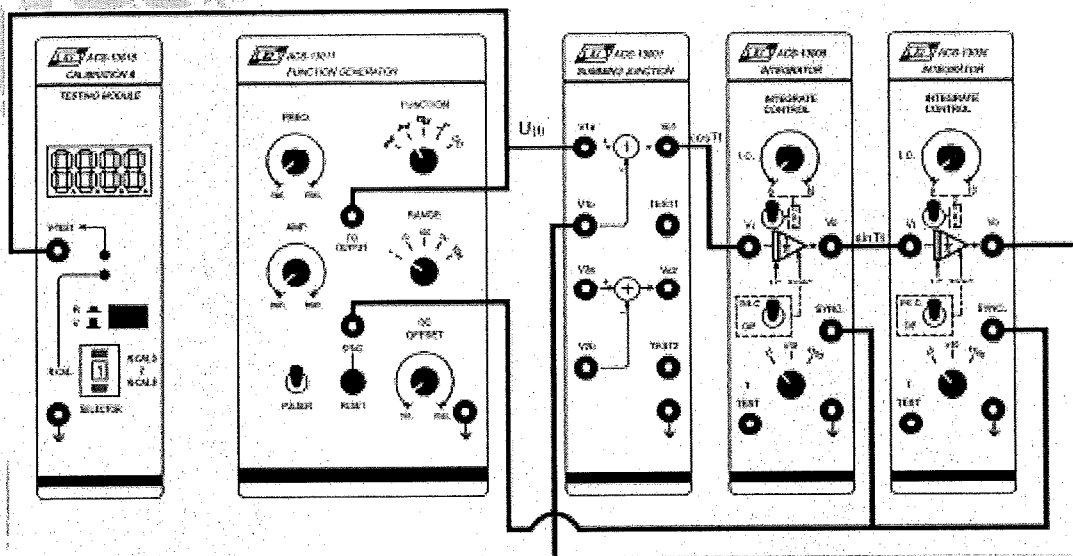
D. Weryfikacja funkcji sinusoidalnych

$$\sin \omega t \leftrightarrow \frac{\omega}{s^2 + \omega^2}, \quad \cos \omega t \leftrightarrow \frac{s}{s^2 + \omega^2}$$

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń pokazanymi na rysunku 1-9.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń układu pomiarowego

Rys. 1-9

2. W module ACS-13011 ustawić przełącznik FUNCTION na pozycję przebiegu impulsowego, potencjometrami DC OFFSET i AMP wyregulować amplitudę impulsu na wyjściu FG OUTPUT na 1Vpp (poziom niski = 0V). Nacisnąć przycisk RESET w celu zatrzymania działania integratorów ACS-13006(1) i ACS-13006(2).
3. Ustawić przełączniki modułów ACS13006(1) i ACS-13006(2) zgodnie z poniższą tabelą:

Przełącznik	ACS-13006(1)	ACS-13006(2)
T	x1	x1
I.C.	0	0
SYNC.	OP	OP

4. Zgodnie ze schematem blokowym z rysunku 1-9 sygnał na wyjściu V_{01} modułu ACS-13001 będzie wynosił:

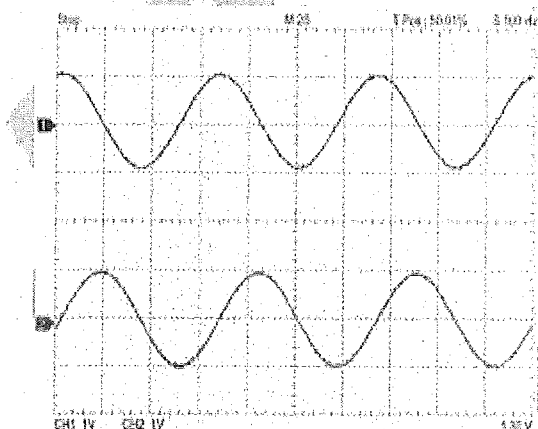
$$\frac{s}{s^2 + T^2} = \frac{s}{s^2 + 1}$$

5. Zgodnie ze schematem blokowym z rysunku 1-9 sygnał na wyjściu V_o modułu ACS-13006(1) będzie wynosił:

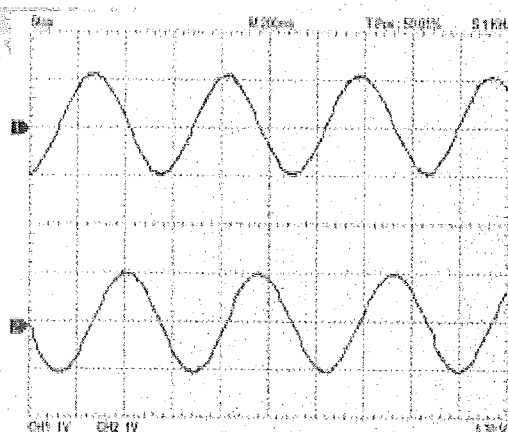
$$\frac{T}{s^2 + T^2} = \frac{1}{s^2 + 1}$$

$$\pm^{-1} \left(\frac{1}{s^2 + 1} \right) = \sin t$$

6. Nacisnąć przycisk PULSER w module ACS-13011. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_{o1} modułu ACS-13001 i V_o modułu ACS-13006(1), które pokazano na rysunku 1-10.



Rys. 1-10



Rys. 1-11

W chwili naciśnięcia przycisku PULSER sygnał wyjściowy może być bardzo duży (aż do nasycenia), a następnie jego amplituda stopniowo maleje, ale częstotliwość oscylacji ω pozostaje stała. Po określonym okresie czasu oscylacje zatrzymują się. Wynika to z wewnętrznej rezystancji kondensatora w obwodzie integratora. Im większa jest ta rezystancja, tym mniejszy jest kąt strat.

Funkcja przejściowa rzeczywistego integratora wynosi $\frac{1}{S + K}$, ponieważ zaś K jest zazwyczaj

bardzo mała (z powodu dużej rezystancji), to może być pominięta. Amplituda wyjściowa oscylatora SIN/COS drugiego rzędu będzie malała lub oscylator przestanie pracować ze względu na straty. Ta sytuacja będzie symulowana później.

7. W modułach ACS-13006(1) i ACS-13006(2) ustawić przełącznik T w pozycji x10.
8. Zgodnie ze schematem blokowym z rysunku 1-9 sygnał na wyjściu V_{o1} modułu ACS-13001 będzie wtedy wynosił:

$$\frac{s}{s^2 + T^2} = \frac{s}{s^2 + 10^2}$$

$$\pm^{-1} \left(\frac{s}{s^2 + 10^2} \right) = \cos 10t$$

9. Natomiast zgodnie ze schematem blokowym z rysunku 1-9 sygnał na wyjściu V_{o1} modułu ACS-13006(1) będzie wtedy wynosił:

$$\frac{T}{s^2 + T^2} = \frac{10}{s^2 + 10^2}$$

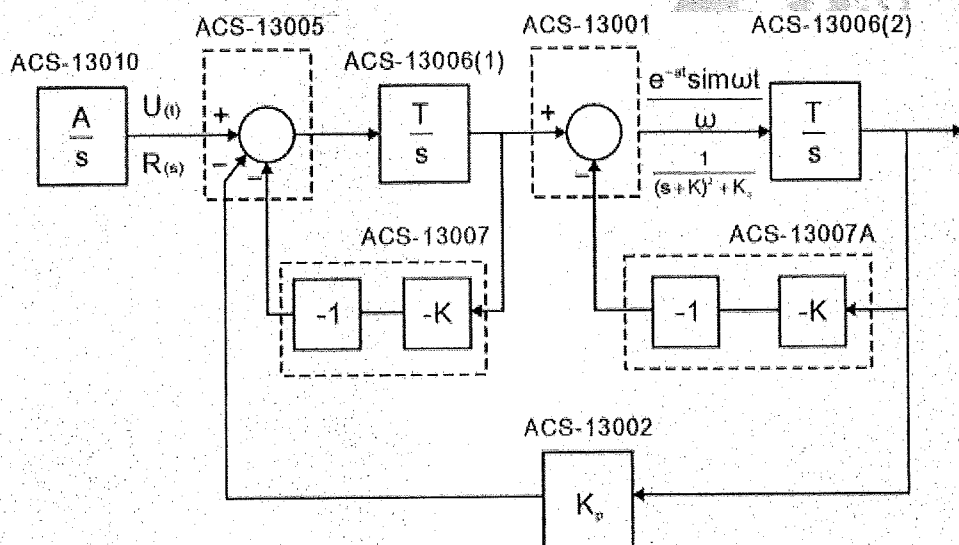
$$\pm^{-1} \left(\frac{10}{s^2 + 10^2} \right) = \sin 10t$$

10. Nacisnąć przycisk PULSER w module ACS-13011. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_{o1} modułu ACS-13001 i V_o modułu ACS-13006(1), które pokazano na rysunku 1-11.

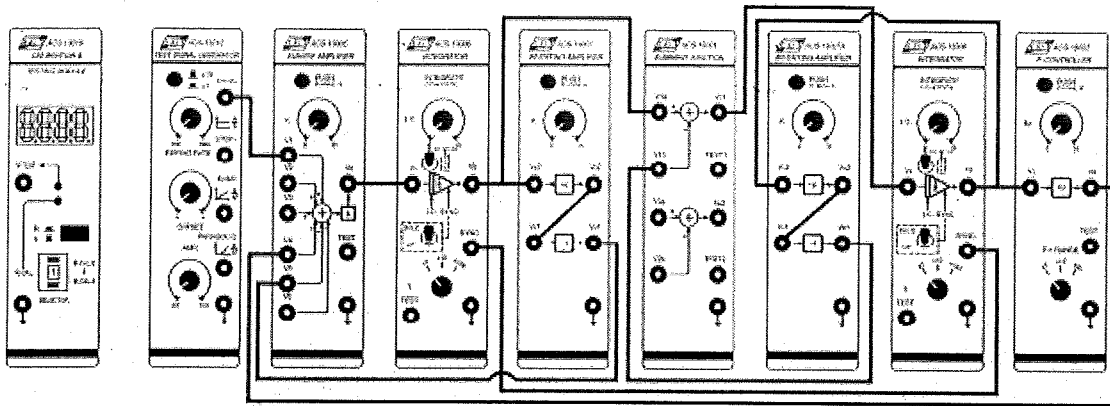
E. Weryfikacja funkcji sinusoidalnej $e^{-at} \sin \omega t$

$$e^{-at} \sin \omega t \leftrightarrow \frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$$

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń pokazanymi na rysunku 1-12.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń układu pomiarowego

Rys. 1-12

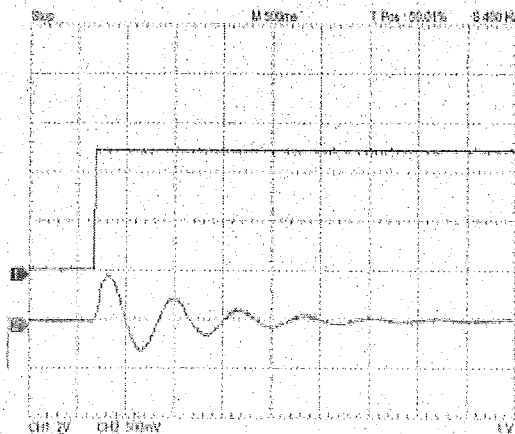
2. W modułach ACS-13007 i ACS-13007A potencjometrami K ustawić stałą K=1.
3. W module ACS-13002 ustawić K_p na 81 ($\omega^2=81$).
4. W module ACS-13005 ustawić K na 1.
5. W module ACS-13010 potencjometrami REPEAT RATE i AMP ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o częstotliwości 0,1Hz i amplitudzie 5V.
6. Ustawić przełączniki modułów ACS13006(1) i ACS-13006(2) zgodnie z poniższą tabelą.

Przełącznik	ACS-13006(1)	ACS-13006(2)
T	x1	x1
I.C.	0	0
SYNC.	OP	OP

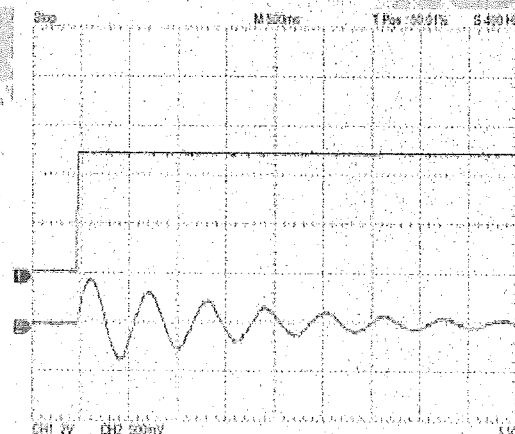
7. Zgodnie ze schematem blokowym z rysunku 1-12 sygnał na wyjściu V_{01} modułu ACS-13001 będzie wynosił:

$$\pm 1 \left(\frac{1}{(s+1)^2 + 9^2} \right) = \frac{e^{-t} \sin 9t}{9}$$

8. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_{01} modułu ACS-13001 i STEP+ modułu ACS-13010, które pokazano na rysunku 1-13.



Rys. 1-13



Rys. 1-14

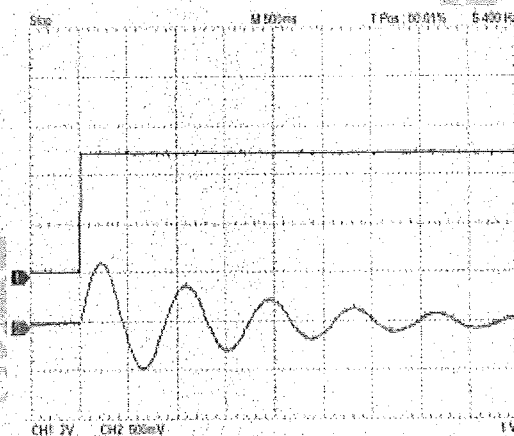
9. W modułach ACS-13007 i ACS-13007A potencjometrami K ustawić stałą $K=0,5$, a w module ACS-13002 selektor K_p ustawić na pozycji $\times 10$, $K_p=10$.
10. Na podstawie schematu blokowego z rysunku 1-12 sygnał na wyjściu V_{01} modułu ACS-13001 będzie wynosił:

$$\pm^{-1} \left(\frac{1}{(s + 0,5)^2 + 10^2} \right) = \frac{e^{-0,5t} \sin 10t}{10}$$

11. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_{01} modułu ACS-13001 i STEP+ modułu ACS-13010, które pokazano na rysunku 1-14.
12. W module ACS-13002 ustawić K_p na 49 ($\omega=7$). Potencjometry K_1 i K_2 pozostawić na poprzedniej pozycji.
13. Na podstawie schematu blokowego z rysunku 1-12 sygnał na wyjściu V_{01} modułu ACS-13001 będzie wynosił:

$$\pm^{-1} \left(\frac{1}{(s + 0,5)^2 + 7^2} \right) = \frac{e^{-0,5t} \sin 7t}{7}$$

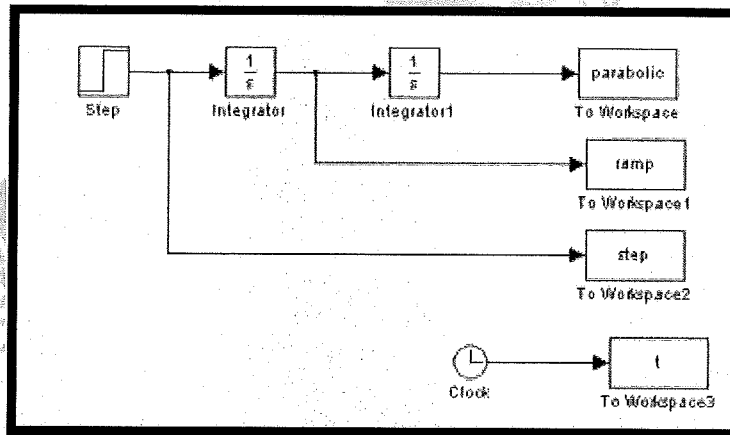
14. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_{01} modułu ACS-13001 i STEP+ modułu ACS-13010, które pokazano na rysunku 1-15.



Rys. 1-15

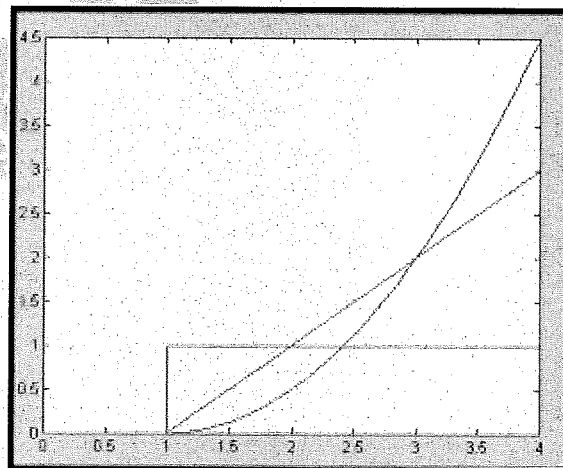
SYMULACJA SIMULINK

1. Otworzyć okno programu MATLAB.
2. W oknie poleceń MATLAB wpisać simulink < J >.
3. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 1-16.



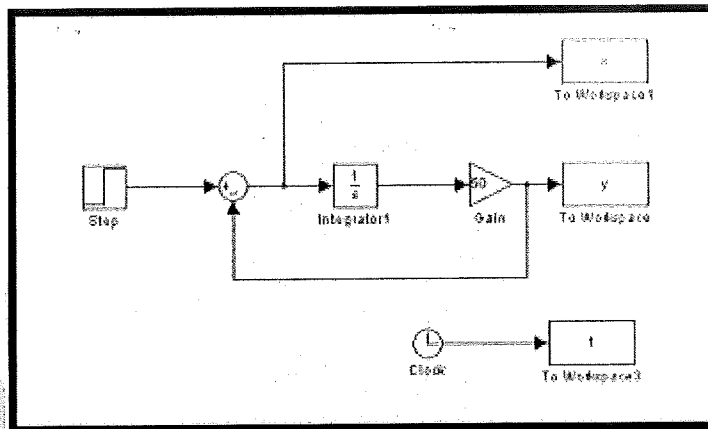
Rys. 1-16

4. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku (*Step time*) na 1.
5. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i zmienić czas Stop na 4.
6. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_1_1.mdl.
7. Uruchomić symulację i uzyskać wynik jak na rysunku 1-17.



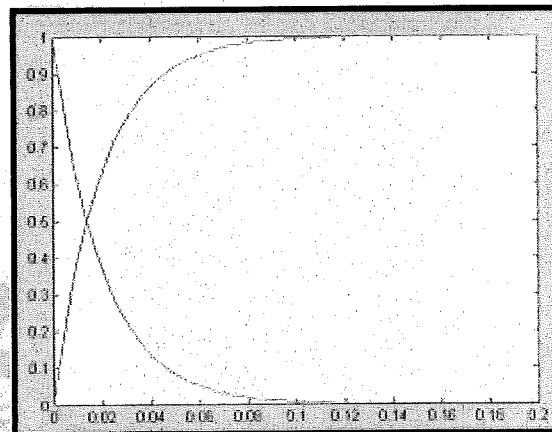
Rys. 1-17

8. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 1-18.



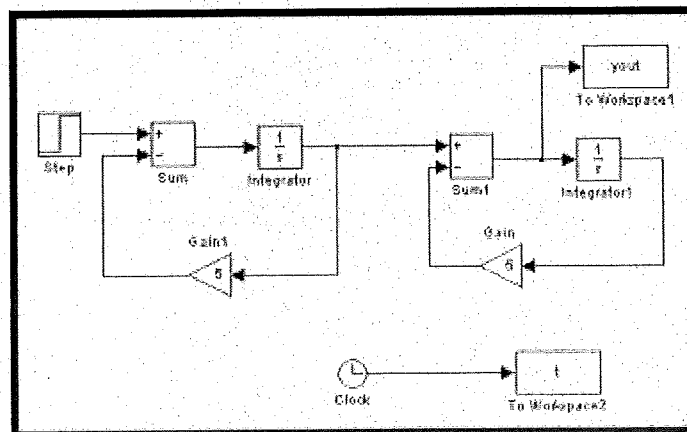
Rys. 1-18

9. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1, czas skoku na 0.
 10. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i zmienić czas Stop na 0.2.
 11. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_1_2.mdl.
 12. Uruchomić symulację i uzyskać wynik jak na rysunku 1-19. Powtórzyć ten krok dla wzmocnienia Gain=10, 100 i zaobserwować zmiany sygnałów wyjściowych X i Y.



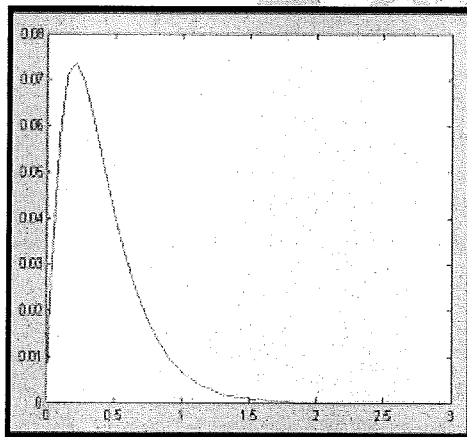
Rys. 1-19

13. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 1-20.



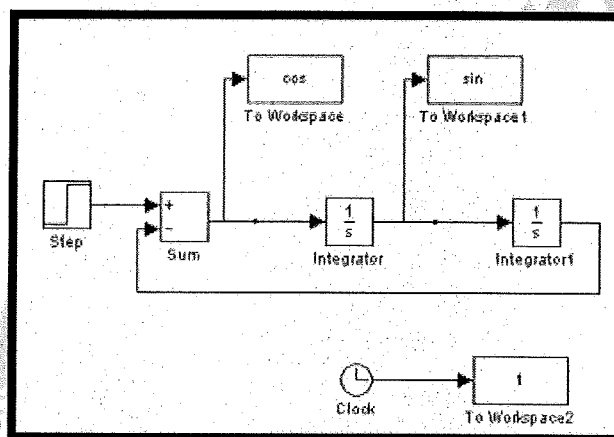
Rys. 1-20

14. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1, a czas skoku na 0.
15. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i zmienić czas Stop na 3.
16. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_1_3.mdl.
17. Uruchomić symulację i uzyskać wynik jak na rysunku 1-21.



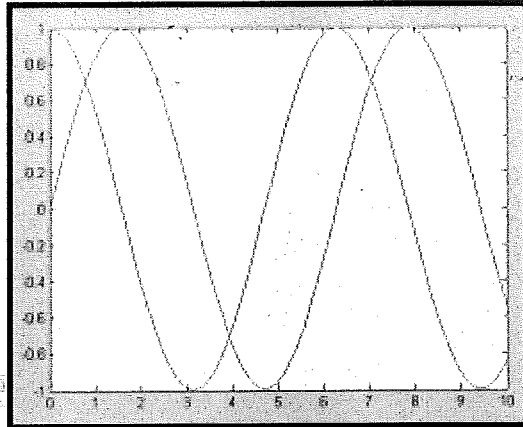
Rys. 1-21

18. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 1-22.



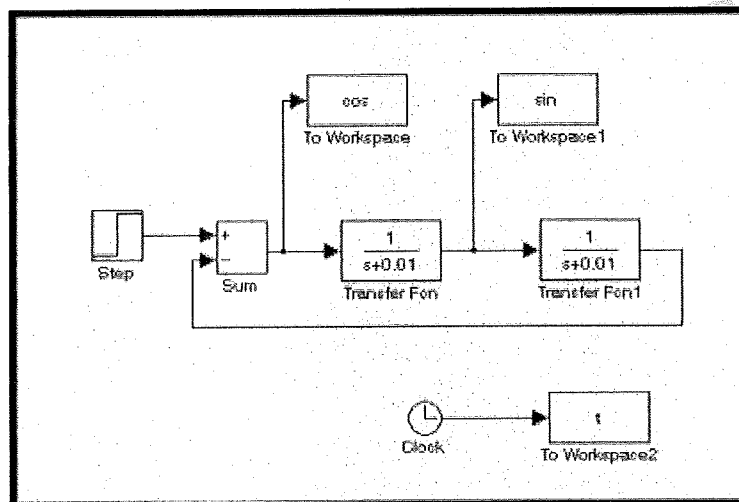
Rys. 1-22

19. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1, a czas skoku na 0.
20. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters. W oknie dialogowym czasu symulacji zmienić czas Stop na 10.
21. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_1_4.mdl.
22. Uruchomić symulację i uzyskać wynik jak na rysunku 1-23.



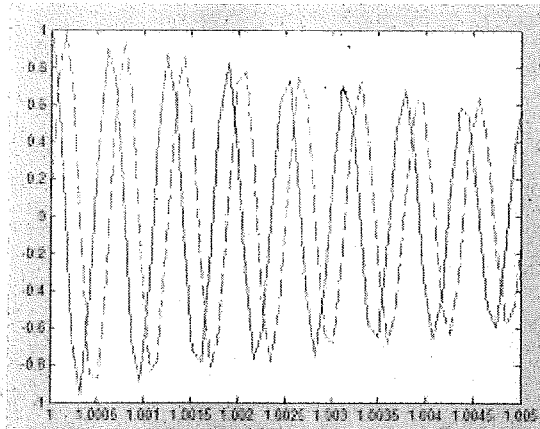
Rys. 1-23

23. W obwodzie rzeczywistego integratora straty w kondensatorze całkującym powodują, że funkcja przejściowa integratora przybiera postać $\frac{1}{s + K}$, gdzie zmienna K określa zanik oscylacji. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 1-24. Wartość K jest ustawiona na 0.01.



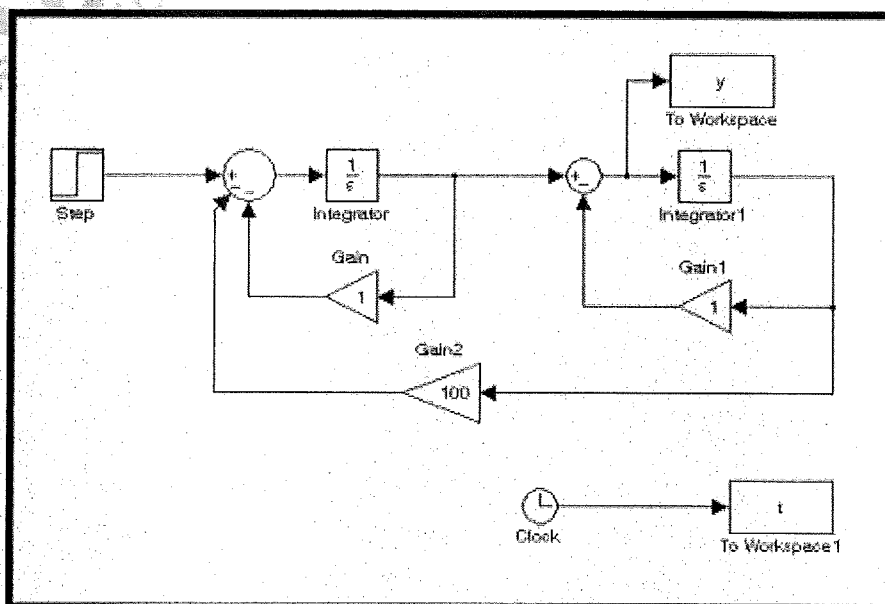
Rys. 1-24 Oscylator 2. rzędu zbudowany z dwóch układów całkujących

24. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1, a czas skoku na 0.
25. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters. W oknie dialogowym czasu symulacji ustawić czas startowy (*Start*) na 10000 i czas stopu (*Stop*) na 10050.
26. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_1_4a.mdl.
27. Uruchomić symulację i uzyskać wynik jak na rysunku 1-25.



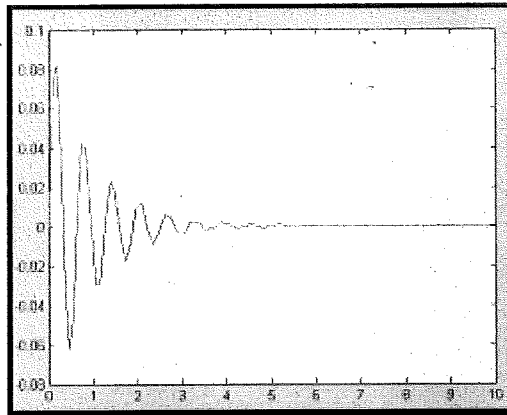
Rys. 1-25

28. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 1-26.



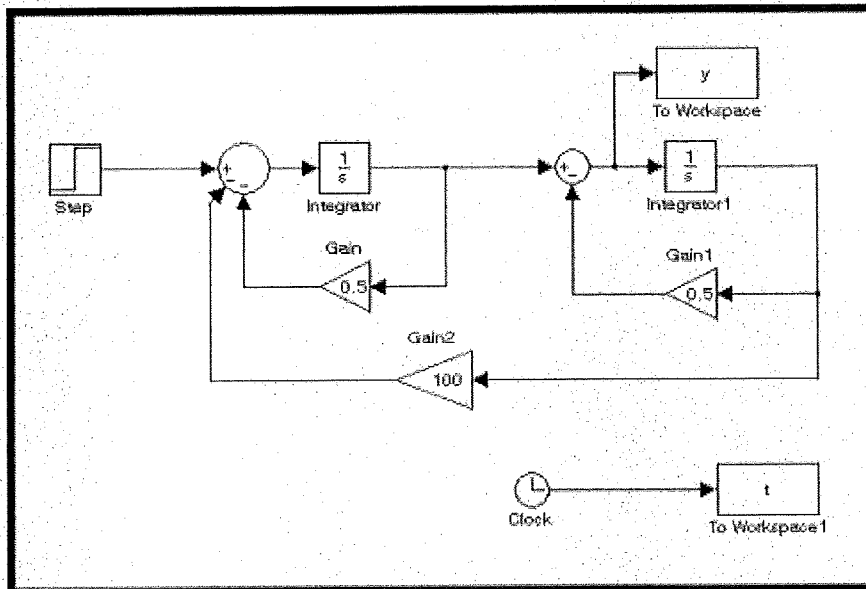
Rys. 1-26

29. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1, a czas skoku na 0.
30. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters. W oknie dialogowym czasu symulacji zmienić czas stopu (*Stop*) na 10.
31. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_1_5.mdl.
32. Uruchomić symulację i uzyskać wynik jak na rysunku 1-27.



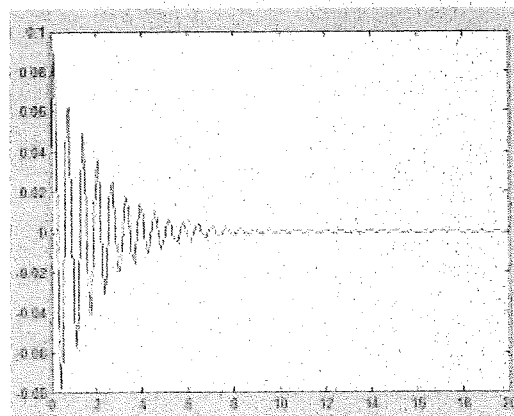
Rys. 1-27

33. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters. W oknie dialogowym czasu symulacji zmienić czas stopu na 20.
34. Na rysunku 1-26 zmodyfikować blok Gain na 0.5 i blok Gain1 na 0.5, jak na rysunku 1-28. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_1_5a.mdl.



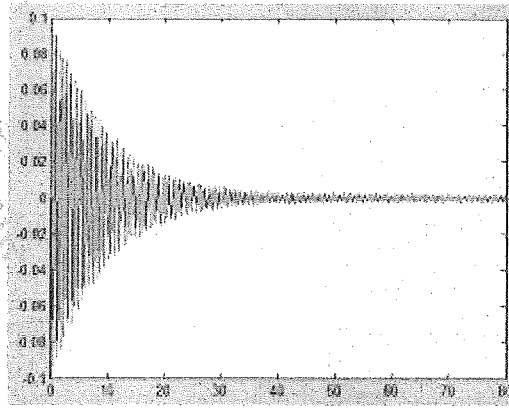
Rys. 1-28

35. Uruchomić symulację i uzyskać wynik, jak na rysunku 1-29.



Rys. 1-29

36. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters. W oknie dialogowym czasu symulacji zmienić czas stopu na 80.
37. Na rysunku 1-28 zmodyfikować blok Gain na 0.1 i blok Gain1 na 0.1 oraz zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_1_5b.mdl.
38. Uruchomić symulację i uzyskać wynik, jak na rysunku 1-30.



Rys. 1-30

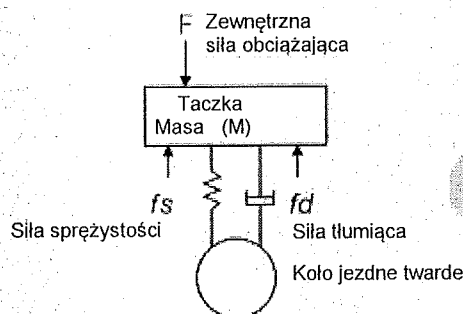
Ćwiczenie 2 Symulacja systemu

CEL ĆWICZEŃ

1. Poznanie sposobu opisu rzeczywistych systemów za pomocą równań różniczkowych.
2. Znajdowanie rozwiązań równań różniczkowych w celu zrozumienia charakterystyki rzeczywistych systemów.
3. Obserwacja odpowiedzi wyjściowej systemu sterowania z wykorzystaniem analogowego systemu sterowania ACS-1000 i symulacji komputerowej.

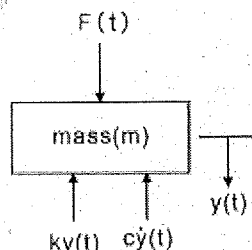
PODSTAWY TEORETYCZNE

Rysunek 2-1 przedstawia typowy system tłumika sprężynowo-masowego.



Rys. 2-1 Typowy system tłumika sprężynowo-masowego

Oznaczając siłę sprężystości sprężyny jako $-ky(t)$ i siłę tłumiącą jako $-c\dot{y}$, to pod kątem działających sił system z rysunku 2-1 może być opisany schematem równoważnym, jak na rysunku 2-2.



Rys. 2-2 Typowy system tłumika sprężynowo-masowego pod kątem działających sił

Z drugiego prawa Newtona otrzymujemy

$$\sum_i F_i(t) = m\ddot{y}(t)$$

Na siłę $F_i(t)$ składają się: siła sprężystości sprężyny $ky(t)$, siła tłumiąca $c\dot{y}$ i siła zewnętrzna $F(t)$, stąd możemy zapisać

$$F(t) - ky(t) - c\dot{y}(t) = m\ddot{y}(t) \quad (1)$$

Równanie (1) może zostać przekształcone do postaci

$$m\ddot{y}(t) + ky(t) + c\dot{y}(t) = F(t) \quad (2)$$

gdy $F(t) \neq 0$, równanie (2) nazywane jest niehomogenicznym (niejednorodnym) równaniem różniczkowym. Aby znaleźć rozwiązanie tego równania, należy wykonać poniższe kroki:

1. Znajdowanie rozwiązania jednorodnego

Równanie różniczkowe (2) jest nazywane równaniem homogenicznym, gdy $F(t) = 0$, zatem

$$m\ddot{y}(t) + ky(t) + c\dot{y}(t) = 0$$

Równanie charakterystyczne będzie miało postać

$$m\lambda^2 + c\lambda + k = 0$$

Pierwiastkami równania charakterystycznego są wartości:

$$\lambda_{1,2} = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m}$$

Zatem rozwiązaniem jednorodnym może być jeden z trzech przypadków:

(1) $c^2 - 4mk > 0$ lub $c^2 > 4mk$

Pierwiastki $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$ i $\lambda_1 \neq \lambda_2$, to rozwiązanie jednorodne ma postać

$$y_h(t) = a_1 e^{\lambda_1 t} + a_2 e^{\lambda_2 t}$$

(2) $c^2 - 4mk = 0$ lub $c^2 = 4mk$

Pierwiastki $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$ i $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, to rozwiązanie jednorodne ma postać

$$y_h(t) = (a_1 + a_2 t)e^{\lambda t}$$

(3) $c^2 - 4mk < 0$ lub $c^2 < 4mk$

Pierwiastki $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{C}$ i $\lambda_1 \neq \lambda_2$. Jeżeli $\lambda_{1,2} = p \pm iq$, to rozwiązanie jednorodne ma postać

$$y_h(t) = e^{pt} (a_1 \cos qt + a_2 \sin qt)$$

Wartości a_1 i a_2 w powyższych rozwiązaniach jednorodnych są współczynnikami stałymi zależnymi od wartości początkowych $y(0)$ i $\dot{y}(0)$.

2. Znajdowanie rozwiązania szczególnego $y_p(t)$

Zależności między rozwiązaniem szczególnym $y_p(t)$ i funkcją $F(t)$ pokazano w poniższej tabeli.

$F(t)$	$y_p(t)$
at^n	$a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_1 t + a_0$
ae^{pt}	$a_1 e^{pt}$
$a \cos qt$	$a_1 \cos qt + a_2 \sin qt$
$a \sin qt$	$a_1 \cos qt + a_2 \sin qt$

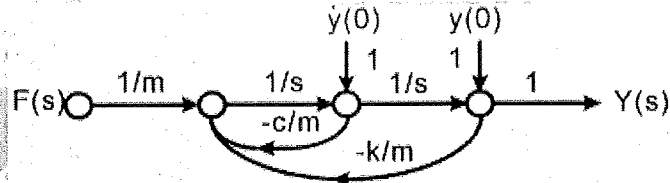
Z tabeli widzimy, że rozwiązanie szczególne $y_p(t)$ zawiera funkcję $F(t)$ i część różniczkową funkcji $F(t)$.

3. Rozwiązanie całkowite

Dodając rozwiązanie jednorodne $y_h(t)$ do rozwiązania szczególnego $y_p(t)$, otrzymujemy:

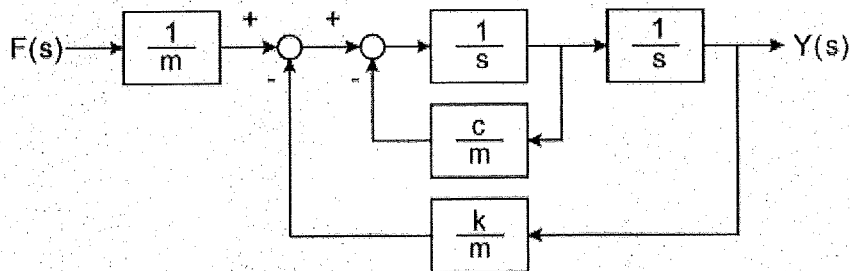
$$y(t) = y_h(t) + y_p(t)$$

Powyższe rozważania opisują matematyczną metodę rozwiązania niejednorodnego równania różniczkowego. W dalszej części rozważań do rozwiązania równania różniczkowego drugiego rzędu wykorzystane zostaną bloki funkcjonalne systemu ACS-1000. W zasadzie analogowy system sterujący jest komputerem analogowym, dlatego równanie różniczkowe przekształcamy w graf stanów. Graf stanów równania (2) pokazano na rysunku 2-3.



Rys. 2-3 Graf stanów typowego systemu tłumienia sprężynowo-masowego

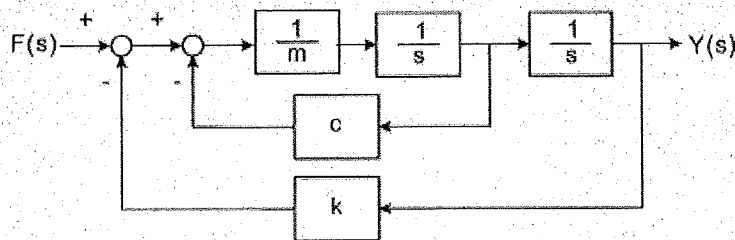
Graf stanów można przedstawić w postaci schematu blokowego pokazanego na rysunku 2-4.



Rys. 2-4. Schemat blokowy stanów typowego systemu tłumienia sprężynowo-masowego

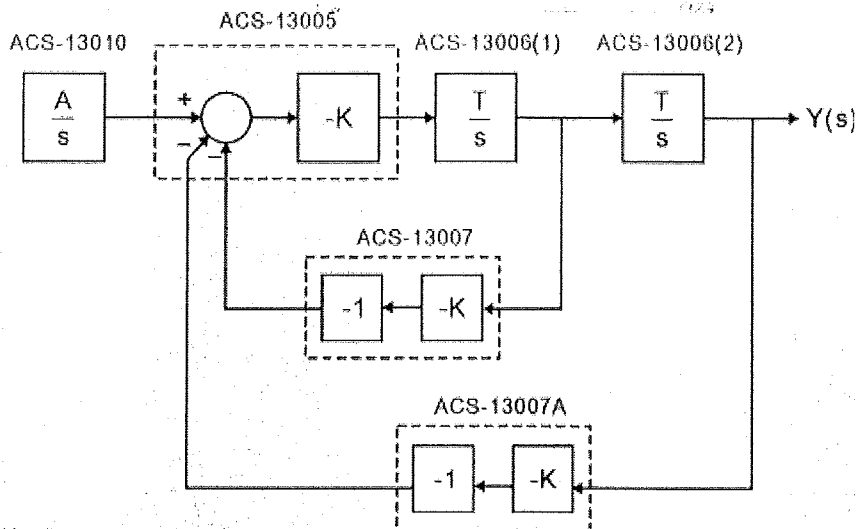
PROCEDURA

W celu wykorzystania modułów systemu ACS-1000 przerysujemy schemat blokowy z rysunku 2-4 do postaci jak na rysunku 2-5.

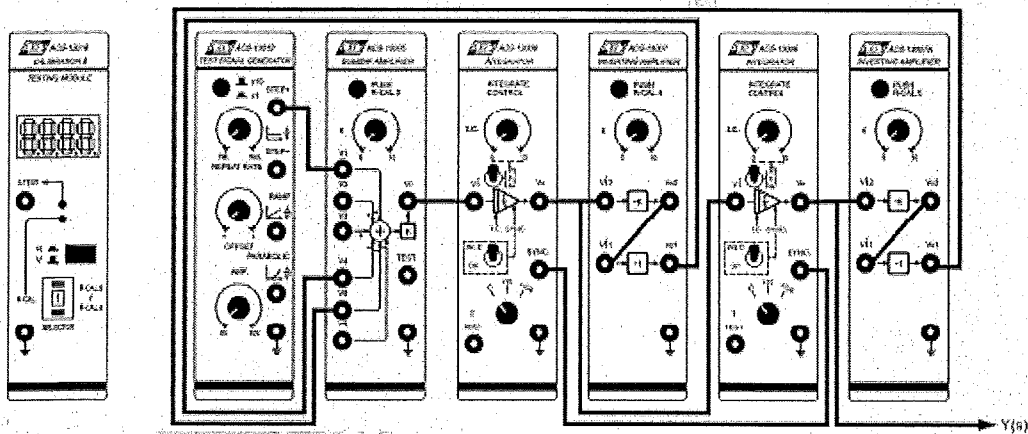


Rys. 2-5 Schemat blokowy

Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń pokazanymi na rysunku 2-6.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń układu pomiarowego

Rys. 2-6

A. Znajdowanie rozwiązania jednorodnego: $F(t) = 0$

1. W module ACS-13010 potencjometrem AMP ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 0V.
2. Ustawić przełączniki modułów ACS13006(1) i ACS-13006(2) zgodnie z poniższą tabelą:

Przełącznik	ACS-13006(1)	ACS-13006(2)
T	x1	x1
I.C.	0	0
SYNC.	OP	OP

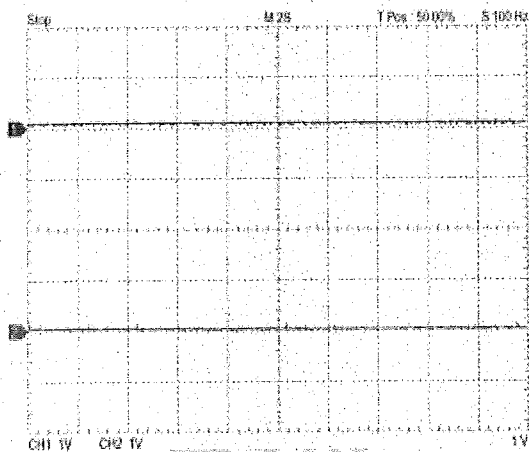
3. W module ACS-13005 ustawić stałą K na 1. ($m=1$) i przejść do przećwiczenia poniższych przypadków:

A-1. $c^2 - 4mk > 0$ lub $c^2 > 4mk$, $F(t) = 0$

- (1) W tym przypadku moduł ACS-13006(1) pracuje jako blok nadrzędny dwóch integratorów. Przelączyć przełącznik SYNC w pozycję INI.C, aby ustawić oba integratory w tryb warunków początkowych i ustawić wartości początkowe obu układów całkujących na 0V ($y(0) = 0$, $\dot{y}(0) = 0$).
- (2) W module ACS-13007 ustawić stałą K na 3 ($c = 3$), a w module ACS-13007A stałą K ustawić na 1 ($k = 1$), co powoduje, że system spełnia warunek $c^2 > 4mk$. Zanotować wartości c i k ($m = 1$).
- (3) Znaleźć wartości a_1 , a_2 , λ_1 , λ_2 przez podstawienie zanotowanych wartości c , m , k , $y(0)$ i $\dot{y}(0)$ do równania charakterystycznego i różniczkowego. Narysować przebieg $y_h(t)$ zgodnie z równaniem:

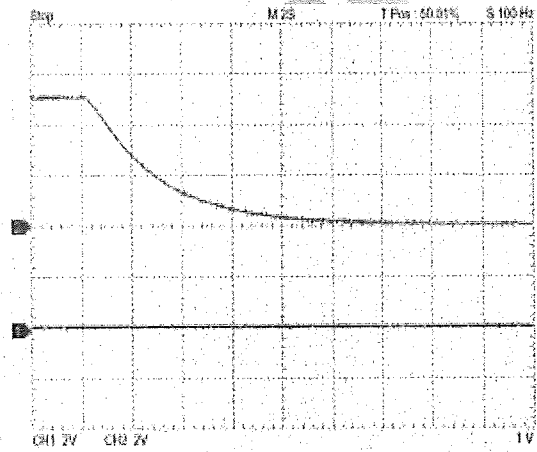
$$y_h(t) = a_1 e^{\lambda_1 t} + a_2 e^{\lambda_2 t}$$

- (4) Ustawić przełącznik SYNC modułu ACS-13006(1) w pozycji OP. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o modułu ACS-13006(2), które pokazano na rysunku 2-7. Porównać wynik ćwiczenia z rysunkiem przebiegu $y(t)$ wykonanym w punkcie (3). Czy są one zgodne?



$F(t) = 0$, $c = 3$, $m = k = 1$, $c^2 - 4mk > 0$
 $y(0) = 0$, $\dot{y}(0) = 0$

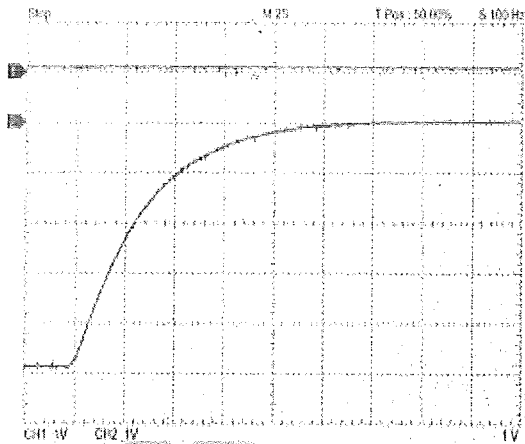
Rys. 2-7



$F(t) = 0$, $c = 3$, $m = k = 1$, $c^2 - 4mk > 0$
 $y(0) = 5$, $\dot{y}(0) = 0$

Rys. 2-8

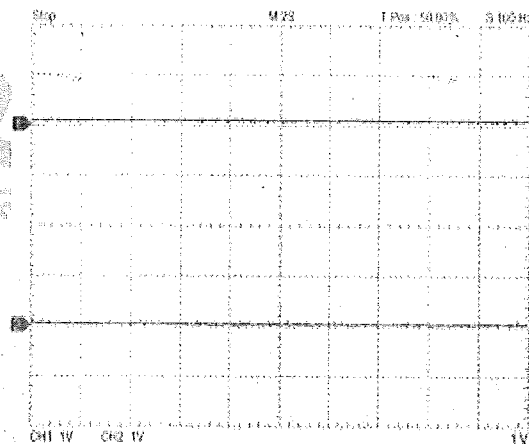
- (5) Zmiana wartości początkowej
 - (a) Ustawić przełącznik SYNC modułu ACS-13006(1) w pozycji INI.C. Ustawić wartość początkową w module ACS-13006(2) na +5V ($y(0) = 5$), a wartość początkową w module ACS-13006(1) na 0V ($\dot{y}(0) = 0$). Powtórzyć punkty (2) do (4) i zarejestrować wyniki pokazane na rysunku 2-8.
 - (b) Ustawić $y(0) = -5$, $\dot{y}(0) = 0$. Powtórzyć punkty (2) do (4) i zarejestrować wyniki pokazane na rysunku 2-9.



$$F(t)=0, c=3, m=k=1, c^2-4mk>0$$

$$y(0) = -5, \dot{y}(0) = 0$$

Rys. 2-9



$$F(t)=0, c=3, m=k=1, c^2-4mk>0$$

$$y(0) = 0, \dot{y}(0) = 0$$

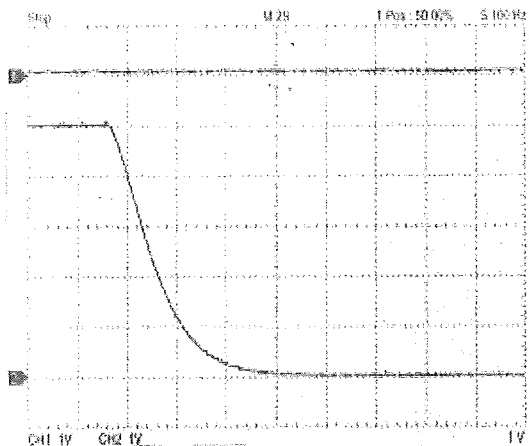
Rys. 2-10

A-2. $c^2-4mk=0$ lub $c^2=4mk$, $F(t)=0$

- (1) W tym przypadku moduł ACS-13006(1) pracuje jako blok nadrzędny dwóch integratorów. Przelączyć przełącznik SYNC w pozycję INI.C, aby ustawić oba integratory w tryb warunków początkowych i ustawić wartości początkowe obu układów całkujących na 0V ($y(0)=0$, $\dot{y}(0)=0$).
- (2) W module ACS-13007 ustawić stałą K na 2 ($c=2$), a w module ACS-13007A stałą K ustawić na 1 ($k=1$), co powoduje, że system spełnia warunek $c^2=4mk$. Zanotować wartości c i k ($m=1$).
- (3) Znaleźć wartości a_1, a_2, λ przez podstawienie zanotowanych wartości c, m, k, $y(0)$ i $\dot{y}(0)$ do równania charakterystycznego i różniczkowego. Narysować przebieg $y_h(t)$ zgodnie z równaniem:

$$y_h(t) = (a_1 + a_2 t) e^{\lambda t}$$

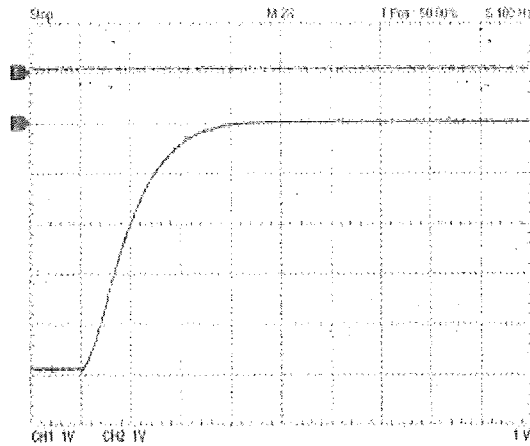
- (4) Ustawić przełącznik SYNC modułu ACS-13006(1) w pozycji OP. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o modułu ACS-13006(2), które pokazano na rysunku 2-10. Porównać wynik ćwiczenia z rysunkiem przebiegu $y(t)$ wykonanym w punkcie (3). Czy są one zgodne?
- (5) Zmiana wartości początkowej
 - (a) Ustawić przełącznik SYNC modułu ACS-13006(1) w pozycji INI.C. Ustawić wartość początkową w module ACS-13006(2) na +5V ($y(0) = 5$), a wartość początkową w module ACS-13006(1) na 0V ($\dot{y}(0) = 0$). Powtórzyć punkty (2) do (4) i zarejestrować wyniki pokazane na rysunku 2-11.
 - (b) Ustawić $y(0) = -5, \dot{y}(0) = 0$. Powtórzyć punkty (2) do (4) i zarejestrować wyniki pokazane na rysunku 2-12.



$$F(t)=0, c=2, m=k=1, c^2-4mk=0$$

$$y(0)=5, \dot{y}(0)=0$$

Rys. 2-11



$$F(t)=0, c=2, m=k=1, c^2-4mk=0$$

$$y(0)=-5, \dot{y}(0)=0$$

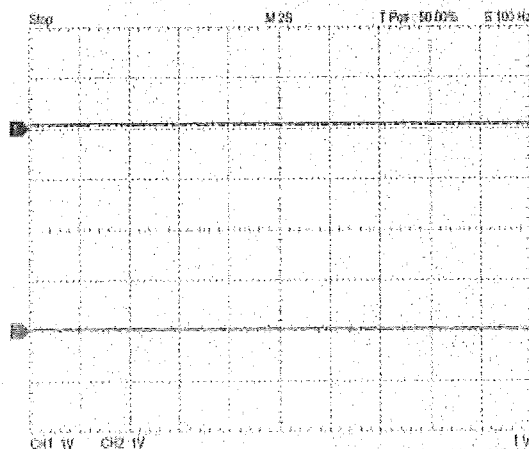
Rys. 2-12

A-3. $c^2-4mk < 0$ lub $c^2 < 4mk$, $F(t)=0$

- (1) W tym przypadku moduł ACS-13006(1) pracuje jako blok nadrzędny dwóch integratorów. Przełączyć przełącznik SYNC w pozycję INI.C, aby ustawić oba integratory w tryb warunków początkowych i ustawić wartości początkowe obu układów całkujących na 0V ($y(0)=0$, $\dot{y}(0)=0$).
- (2) W module ACS-13007 ustawić stałą K na 1 ($c=1$), a w module ACS-13007A stałą K ustawić na 1 ($k=1$), co powoduje, że system spełnia warunek $c^2 < 4mk$. Zanotować wartości c i k ($m=1$).
- (3) Znaleźć wartości $a_1, a_2, \lambda_{1,2} = p \pm iq$ przez podstawienie zanotowanych wartości $c, m, k, y(0)$ i $\dot{y}(0)$ do równania charakterystycznego i różniczkowego. Narysować przebieg $y_h(t)$ zgodnie z równaniem:

$$y_h(t) = e^{pt} (a_1 \cos qt + a_2 \sin qt)$$

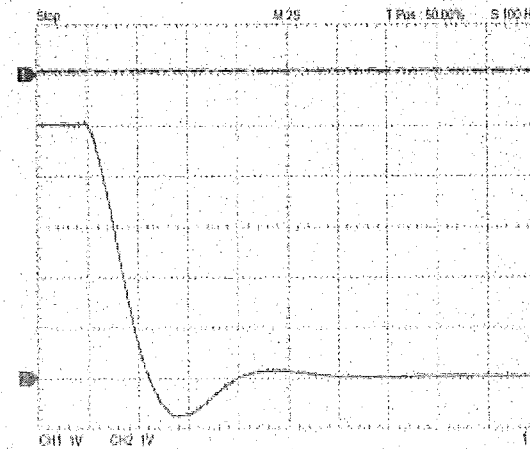
- (4) Ustawić przełącznik SYNC modułu ACS-13006(1) w pozycji OP. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o modułu ACS-13006(2), które pokazano na rysunku 2-13. Porównać wynik ćwiczenia z rysunkiem przebiegu $y(t)$ wykonanym w punkcie (3). Czy są one zgodne?



$$F(t)=0, c=1, m=k=1, c^2-4mk < 0$$

$$y(0)=0, \dot{y}(0)=0$$

Rys. 2-13



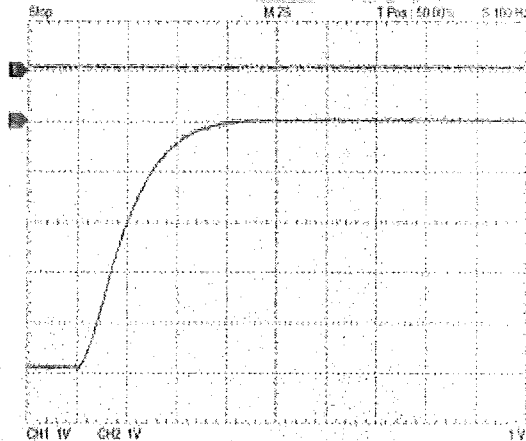
$$F(t)=0, c=1, m=k=1, c^2-4mk < 0$$

$$y(0)=5, \dot{y}(0)=0$$

Rys. 2-14

(5) Zmiana wartości początkowej

- (a) Ustawić przełącznik SYNC modułu ACS-13006(1) w pozycji INI.C. Ustawić wartość początkową w module ACS-13006(2) na +5V ($y(0) = 5$), a wartość początkową w module ACS-13006(1) na 0V ($y(0) = 0$). Powtórzyć punkty (2) do (4) i zarejestrować wyniki pokazane na rysunku 2-14.
- (b) Ustawić $y(0) = -5$, $y'(0) = 0$. Powtórzyć punkty (2) do (4) i zarejestrować wyniki pokazane na rysunku 2-15.



$$F(t)=0, c=1, m=k=1, c^2-4mk<0, y(0) = -5, y'(0) = 0$$

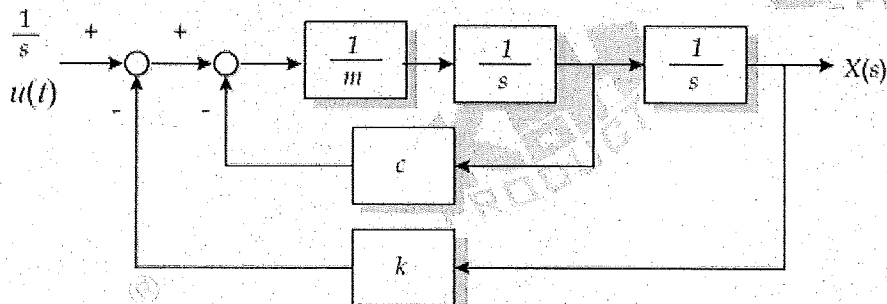
Rys. 2-15

B. Znajdowanie rozwiązania całkowitego: $F(t) \neq 0$ (przyłożona siła zewnętrzna)

1. Moduł ACS-13010 z rysunku 2-6 zamienić modulem ACS-13011 i jego wyjście FG OUTPUT połączyć do wejścia V1 modułu ACS-13005. Nacisnąć i przytrzymać przycisk PULSER, a potencjometrem AMP ustawić na wyjściu FG OUTPUT amplitudę 1V. W takim przypadku $F(t)=1$. W ten sposób na wyjściu generowany jest skok jednostkowy. Podłączyć wejście SYNC modułu ACS-13006 do wejścia SYNC modułu ACS-13011 w celu synchronizacji integratora z wyjściowym sygnałem skoku jednostkowego.
2. Ustawić przełączniki modułów ACS13006(1) i ACS-13006(2) zgodnie z poniższą tabelą:

Przełącznik	ACS-13006(1)	ACS-13006(2)
T	x1	x1
I.C.	0	0
SYNC.	OP	OP

3. W module ACS-13005 ustawić stałą K na 1 ($m=1$). Zgodnie ze schematem blokowym z rysunku 2-16 przećwiczyć poniższe przypadki:



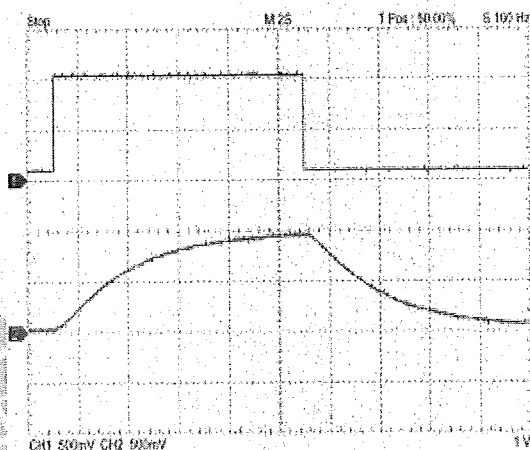
Rys. 2-16

B-1. $c^2 - 4mk > 0$ lub $c^2 > 4mk$, $F(t) = u_s(t)$

- (1) W tym przypadku moduł ACS-13006(1) pracuje jako blok nadrzędny dwóch integratorów. Przelączyć przełącznik SYNC w pozycję INI.C, aby ustawić oba integratory w tryb warunków początkowych, a następnie ustawić wartości początkowe obu układów całkujących na 0V ($y(0)=0$, $\dot{y}(0)=0$).
- (2) W module ACS-13007 ustawić stałą K na 3 ($c=3$), a w module ACS-13007A stałą K ustawić na 1 ($k=1$), co powoduje, że system spełnia warunek $c^2 > 4mk$. Zanotować wartości c i k ($m=1$).
- (3) Znaleźć wartości a_1 , a_2 , λ_1 , λ_2 przez podstawienie zanotowanych wartości c, m, k, $y(0)$ i $\dot{y}(0)$ do równania charakterystycznego i różniczkowego. Narysować przebieg $y(t)$ zgodnie z równaniem:

$$y(t) = a_1 e^{\lambda_1 t} + a_2 e^{\lambda_2 t} + k_1$$

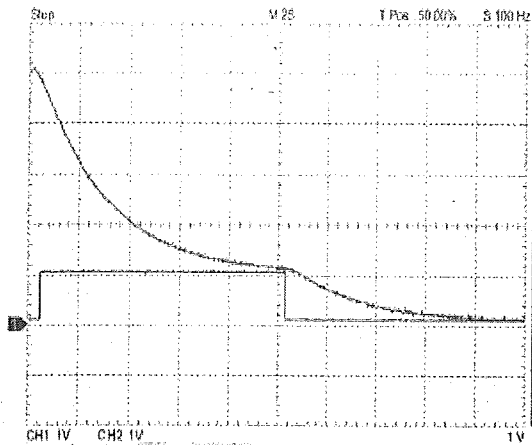
- (4) Ustawić przełącznik SYNC modułu ACS-13006(1) w pozycji OP i nacisnąć przycisk RESET modułu ACS-13011 w celu synchronizacji integratora z generatorem funkcyjnym. Nacisnąć przycisk PULSER. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach FG OUTPUT modułu ACS-13011 i V_o modułu ACS-13006(2), które pokazano na rysunku 2-17. Porównać wynik ćwiczenia z rysunkiem przebiegu $y(t)$ wykonanym w punkcie (3). Czy są one zgodne?



$F(t) = 1V_{pp}$, $c=3$, $m=k=1$, $c^2 - 4mk > 0$, $y(0) = 0$, $\dot{y}(0) = 0$

Rys. 2-17

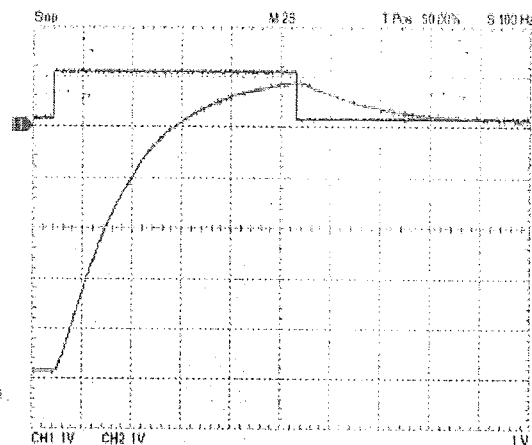
- (5) Zmiana wartości początkowej
 - (a) Ustawić przełącznik SYNC modułu ACS-13006(1) w pozycji INI.C. Ustawić wartość początkową w module ACS-13006(2) na +5V ($y(0) = 5$), a wartość początkową w module ACS-13006(1) na 0V ($\dot{y}(0) = 0$). Powtórzyć punkty (2) do (4) i zarejestrować wyniki pokazane na rysunku 2-18.
 - (b) Ustawić $y(0) = -5$, $\dot{y}(0) = 0$. Powtórzyć punkty (2) do (4) i zarejestrować wyniki pokazane na rysunku 2-19.



$$F(t)=1V_{pp}, c=3, m=k=1, c^2-4mk>0$$

$$y(0)=5, \dot{y}(0)=0$$

Rys. 2-18



$$F(t)=1V_{pp}, c=3, m=k=1, c^2-4mk>0$$

$$y(0)=-5, \dot{y}(0)=0$$

Rys. 2-19

B-2. $c^2-4mk=0$ lub $c^2=4mk$, $F(t)=u_s(t)$

- (1) W tym przypadku moduł ACS-13006(1) pracuje jako blok nadrzędny dwóch integratorów. Przełączyć przełącznik SYNC w pozycję INI.C, aby ustawić oba integratory w tryb warunków początkowych, a następnie ustawić wartości początkowe obu układów całkujących na 0V ($y(0)=0, \dot{y}(0)=0$).

- (2) W module ACS-13007 ustawić stałą K na 2 ($c=2$), a w module ACS-13007A stałą K ustawić na 1 ($k=1$), co powoduje, że system spełnia warunek $c^2=4mk$. Zanotować wartości c i k ($m=1$).

- (3) Znaleźć wartości a_1, a_2, λ przez podstawienie zanotowanych wartości c, m, k, $y(0)$ i $\dot{y}(0)$ do równania charakterystycznego i różniczkowego. Narysować przebieg $y(t)$ zgodnie z równaniem:

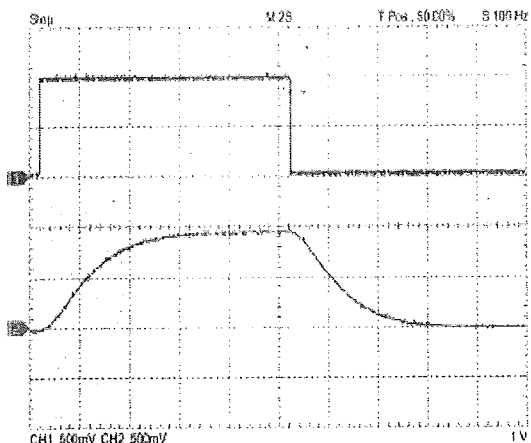
$$y(t) = (a_1 + a_2 t)e^{\lambda t} + k_1$$

- (4) Ustawić przełącznik SYNC modułu ACS-13006(1) w pozycji OP i nacisnąć przycisk RESET modułu ACS-13011 w celu synchronizacji integratora z generatorem funkcyjnym. Nacisnąć przycisk PULSER. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach FG OUTPUT modułu ACS-13011 i V_o modułu ACS-13006(2), które pokazano na rysunku 2-20. Porównać wynik ćwiczenia z rysunkiem przebiegu $y(t)$ wykonanym w punkcie (3). Czy są one zgodne?

- (5) Zmiana wartości początkowej

- (a) Ustawić przełącznik SYNC modułu ACS-13006(1) w pozycji INI.C. Ustawić wartość początkową w module ACS-13006(2) na +5V ($y(0)=5$), a wartość początkową w module ACS-13006(1) na 0V ($\dot{y}(0)=0$). Powtórzyć punkty (2) do (4) i zarejestrować wyniki pokazane na rysunku 2-21.

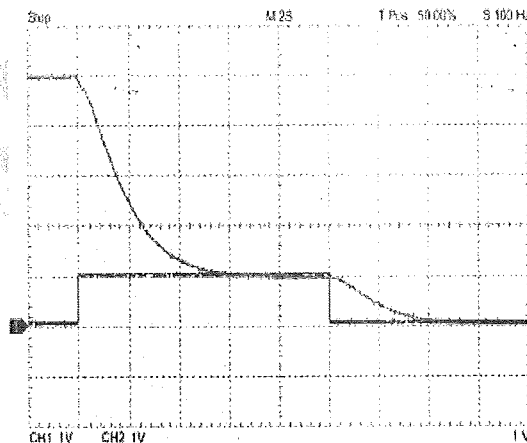
- (b) Ustawić $y(0)=-5, \dot{y}(0)=0$. Powtórzyć punkty (2) do (4) i zarejestrować wyniki pokazane na rysunku 2-22.



$$F(t)=u(t), c=2, m=k=1, c^2-4mk=0$$

$$y(0)=0, y'(0)=0$$

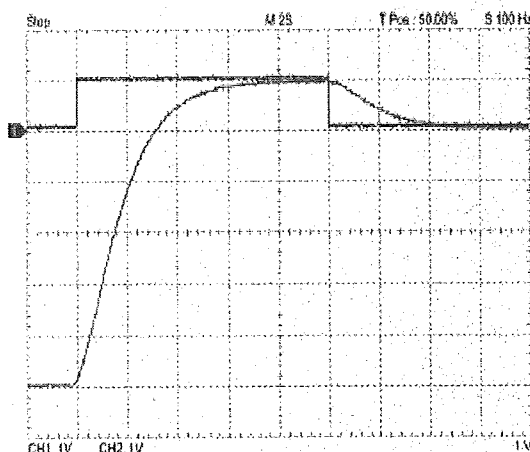
Rys. 2-20



$$F(t)=u(t), c=2, m=k=1, c^2-4mk=0$$

$$y(0)=5, y'(0)=0$$

Rys. 2-21



$$F(t)=u(t), c=2, m=k=1, c^2-4mk=0, y(0)=-5, y'(0)=0$$

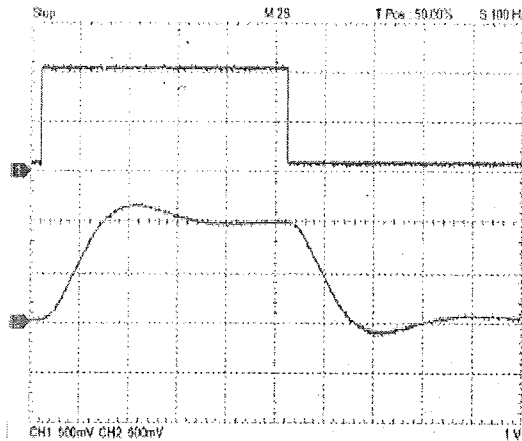
Rys. 2-22

B-3. $c^2-4mk < 0$ lub $c^2 < 4mk$, $F(t)=u_s(t)$

- (1) W tym przypadku moduł ACS-13006(1) pracuje jako blok nadrzędny dwóch integratorów. Przełączyć przełącznik SYNC w pozycję INI.C, aby ustawić oba integratory w tryb warunków początkowych i ustawić wartości początkowe obu układów całkujących na 0V ($y(0)=0$, $\dot{y}(0)=0$).
- (2) W module ACS-13007 ustawić stałą K na 1 ($c=1$), a w module ACS-13007A stałą K ustawić również na 1 ($k=1$), co powoduje, że system spełnia warunek $c^2 < 4mk$. Zanotować wartości c i k ($m=1$).
- (3) Znaleźć wartości a_1 , a_2 , $\lambda_{1,2} = p \pm iq$ przez podstawienie zanotowanych wartości c , m , k , $y(0)$ i $\dot{y}(0)$ do równania charakterystycznego i różniczkowego. Narysować przebieg $y(t)$ zgodnie z równaniem:

$$y(t) = e^{pt} (a_1 \cos qt + a_2 \sin qt) + k_1$$

- (4) Ustawić przełącznik SYNC modułu ACS-13006(1) w pozycji OP, nacisnąć przycisk RESET w module ACS-13011 w celu synchronizacji integratora z generatorem funkcyjnym. Nacisnąć przycisk PULSER. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach FG OUTPUT modułu ACS-13011 i V_o modułu ACS-13006(2), które pokazano na rysunku 2-23. Porównać wynik ćwiczenia z rysunkiem przebiegu $y(t)$ wykonanym w punkcie (3). Czy są one zgodne?

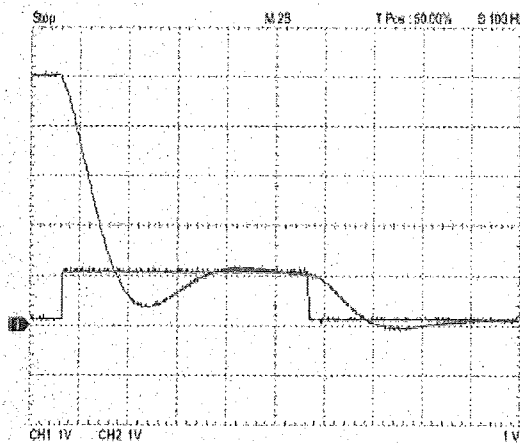


$$F(t)=u(t), c=1, m=k=1, c^2-4mk<0, y(0)=0, \dot{y}(0)=0$$

Rys. 2-23

(5) Zmiana wartości początkowej

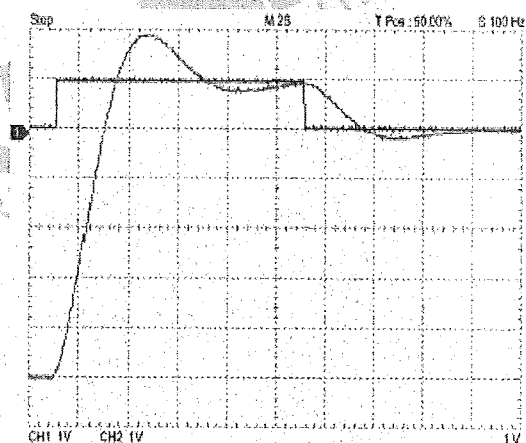
- (a) Ustawić przełącznik SYNC modułu ACS-13006(1) w pozycji INI.C. Ustawić wartość początkową w module ACS-13006(2) na +5V ($y(0) = 5$), a wartość początkową w module ACS-13006(1) na 0V ($\dot{y}(0) = 0$). Powtórzyć punkty (2) do (4) i zarejestrować wyniki pokazane na rysunku 2-24.
- (b) Ustawić $y(0) = -5$, $\dot{y}(0) = 0$. Powtórzyć punkty (2) do (4) i zarejestrować wyniki pokazane na rysunku 2-54.



$$F(t)=u(t), c=1, m=k=1, c^2-4mk<0$$

$$y(0) = 5, \dot{y}(0) = 0$$

Rys. 2-24



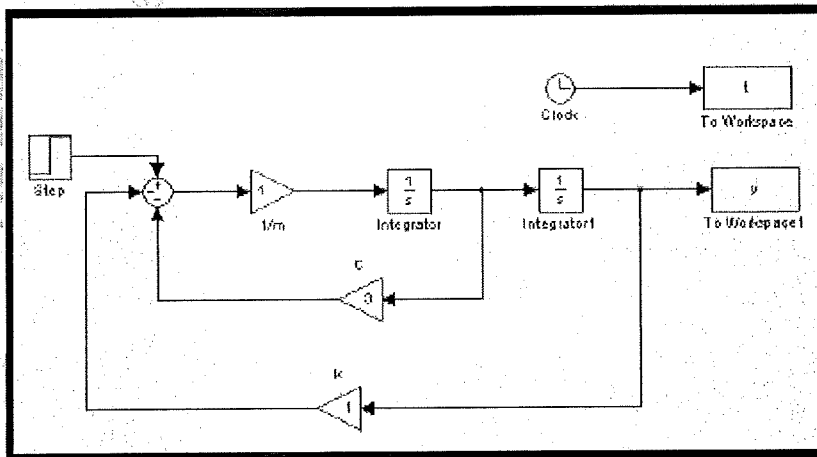
$$F(t)=u(t), c=1, m=k=1, c^2-4mk<0$$

$$y(0) = -5, \dot{y}(0) = 0$$

Rys. 2-25

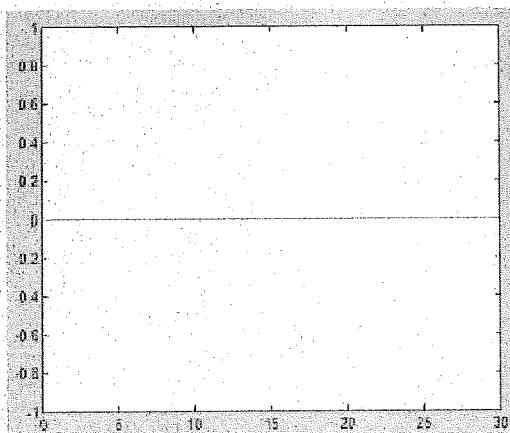
SYMULACJA SIMULINK

1. **Znajdowanie rozwiązania jednorodnego:** W przypadku, gdy $c^2 - 4mk > 0$ i $F(t) = 0$, narysować przebieg $y(t)$ przy następujących wartościach początkowych: (a) $y(0) = 0, \dot{y}(0) = 0$, (b) $y(0) = 5, \dot{y}(0) = 0$, (c) $y(0) = -5, \dot{y}(0) = 0$.
2. Uruchomić program MATLAB sekwencją [Start] → [Wszystkie programy] → [MATLAB 7.0] → [MATLAB]. Otwarte zostanie okno poleceń MATLAB.
3. W oknie poleceń MATLAB wpisać simulink < ↵ >.
4. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 2-26.

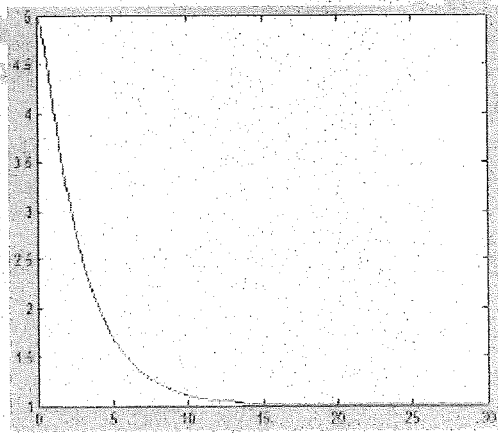


Rys. 2-26

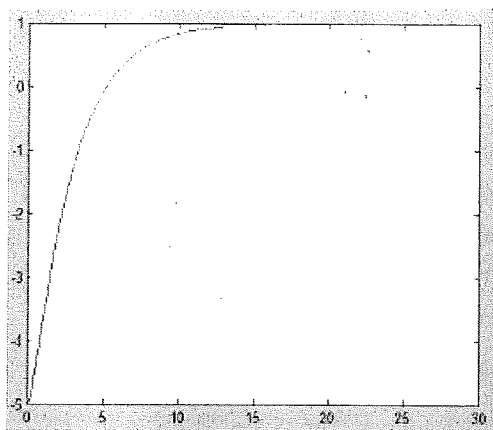
5. Wartość końcową bloku Step ustawić na 0 i czas skoku (*Step time*) na 0.
6. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 30.
7. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_2_1.mdl.
8. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 2-27. Rysunek 2-27(a) prezentuje odpowiedź układu, gdy wartości początkowe obu integratorów są ustawione na 0. Rysunek 2-27(b) pokazuje odpowiedź układu, gdy wartość początkowa bloku integratora 1 wynosi +5, natomiast rysunek 2-27(c) – gdy wartość początkowa bloku integratora 1 wynosi -5.



(a) Wartość początkowa integratora 1 = 0



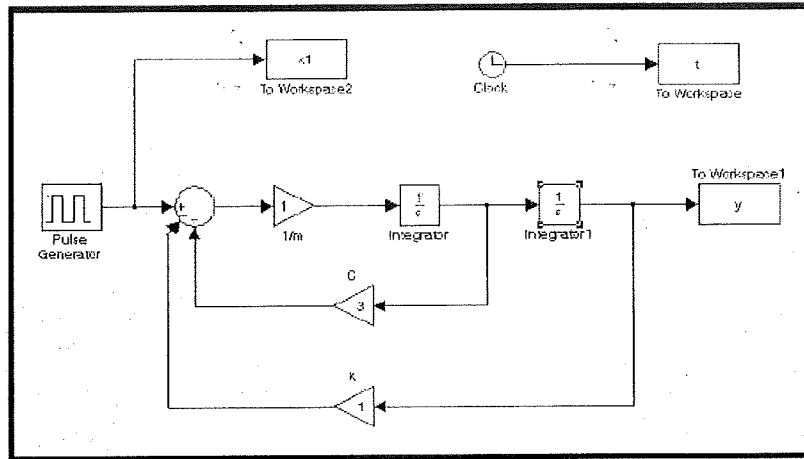
(b) Wartość początkowa integratora 1 = 5



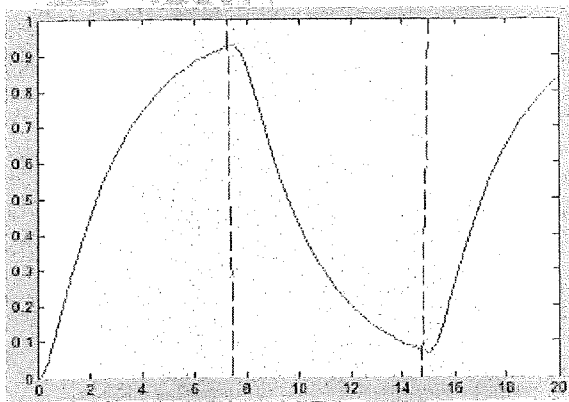
(b) Wartość początkowa integratora 1 = -5

Rys. 2-27

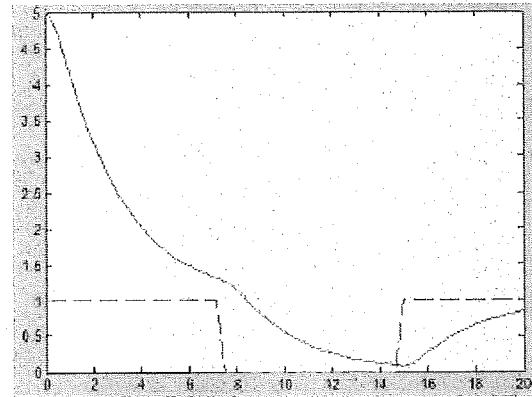
9. Porównaj wyniki symulacji z przebiegami $y(t)$ uzyskanymi w systemie ACS-1000. Czy pokrywają się one w całości?
10. **Znajdowanie rozwiązania jednorodnego:** W przypadku, gdy $c^2-4mk=0$ i $F(t)=0$, narysować przebieg $y(t)$ przy następujących wartościach początkowych: (a) $y(0)=0$, $\dot{y}(0)=0$, (b) $y(0)=5$, $\dot{y}(0)=0$, (c) $y(0)=-5$, $\dot{y}(0)=0$.
11. W schemacie blokowym z rysunku 2-26 zmodyfikować wartości c na 2, k na 1 i m na 1, aby system spełniał warunek $c^2-4mk=0$.
12. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_2_2.mdl.
13. Uruchomić symulację i porównać jej wyniki z przebiegami $y(t)$ uzyskanymi w systemie ACS-1000. Czy pokrywają się one w całości?
14. **Znajdowanie rozwiązania jednorodnego:** W przypadku, gdy $c^2-4mk<0$ i $F(t)=0$, narysować przebieg $y(t)$ przy następujących wartościach początkowych: (a) $y(0)=0$, $\dot{y}(0)=0$, (b) $y(0)=5$, $\dot{y}(0)=0$, (c) $y(0)=-5$, $\dot{y}(0)=0$.
15. W schemacie blokowym z rysunku 2-26 zmodyfikować wartości c na 1, k na 1 i m na 1, aby system spełniał warunek $c^2-4mk<0$.
16. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_2_3.mdl.
17. Uruchomić symulację i porównać jej wyniki z przebiegami $y(t)$ uzyskanymi w systemie ACS-1000. Czy pokrywają się one w całości?
18. **Znajdowanie rozwiązania całkowitego:** W przypadku, gdy $c^2-4mk>0$ i $F(t)=U_s(t)$, narysować przebieg $y(t)$ przy następujących wartościach początkowych: (a) $y(0)=0$, $\dot{y}(0)=0$, (b) $y(0)=5$, $\dot{y}(0)=0$, (c) $y(0)=-5$, $\dot{y}(0)=0$.
19. W oknie roboczym programu MATLAB narysować schemat blokowy pokazany na rysunku 2-28. Ustawić przebieg prostokątny $F(t) = 1V_{pp}$ o okresie 15s. Zmodyfikować wartości c na 3, k na 1 i m na 1, aby system spełniał warunek $c^2-4mk>0$.
20. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_2_4.mdl.
21. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki pokazane na rysunku 2-29. Rysunek 2-29(a) prezentuje odpowiedź układu, gdy wartości początkowe obu integratorów są ustawione na 0. Rysunek 2-29(b) pokazuje odpowiedź układu, gdy wartość początkowa bloku integratora 1 wynosi +5, natomiast rysunek 2-29(c) – gdy wartość początkowa bloku integratora 1 wynosi -5.



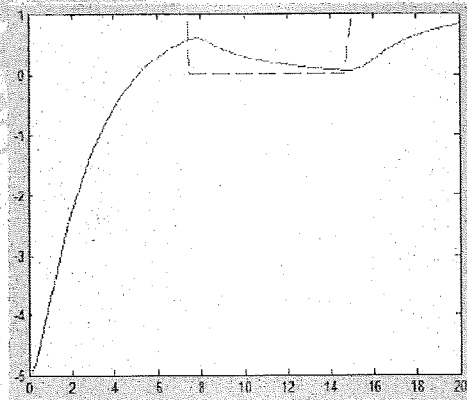
Rys. 2-28



(a) $F(t)=15s, 1V_{pp}, c=3, m=k=1, c^2-4mk>0$
 $y(0) = 5, \dot{y}(0) = 0$



(b) $F(t)=15s, 1V_{pp}, c=3, m=k=1, c^2-4mk>0$
 $y(0) = +5, \dot{y}(0) = 0$



(c) $F(t)=15s, 1V_{pp}, c=3, m=k=1, c^2-4mk>0$
 $y(0) = 5, \dot{y}(0) = 0$

Rys. 2-29

22. **Znajdowanie rozwiązania całkowitego:** W przypadku, gdy $c^2-4mk=0$ i $F(t)=U_s(t)$, narysować przebieg $y(t)$ przy następujących wartościach początkowych: (a) $y(0)=0, \dot{y}(0)=0$, (b) $y(0)=5, \dot{y}(0)=0$, (c) $y(0)=-5, \dot{y}(0)=0$.
23. W schemacie blokowym z rysunku 2-28 zmodyfikować wartości c na 2, k na 1 i m na 1, aby system spełniał warunek $c^2-4mk=0$.
24. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_2_5.mdl.

25. Uruchomić symulację i porównać jej wyniki z przebiegami $y(t)$ uzyskanymi w systemie ACS-1000. Czy pokrywają się one w całości?
26. **Znajdowanie rozwiązania całkowitego:** W przypadku, gdy $c^2 - 4mk < 0$ i $F(t) = U_s(t)$, narysować przebieg $y(t)$ przy następujących wartościach początkowych: (a) $y(0)=0, \dot{y}(0)=0$, (b) $y(0)=5, \dot{y}(0)=0$, (c) $y(0)=-5, \dot{y}(0)=0$.
27. W schemacie blokowym z rysunku 2-28 zmodyfikować wartości c na 1, k na 1 i m na 1, aby system spełniał warunek $c^2 - 4mk < 0$.
28. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_2_6.mdl.
29. Uruchomić symulację i porównać jej wyniki z przebiegami $y(t)$ uzyskanymi w systemie ACS-1000. Czy pokrywają się one w całości?

Ćwiczenie 3 Uchyb ustalony

CEL ĆWICZEŃ

1. Poznanie błędu ustalonego charakterystyki wyjściowej systemu.
2. Pomiar błędu ustalonego odpowiedzi systemu sterowania przy różnych sygnałach wejściowych i dla różnych typów systemów.

PODSTAWY TEORETYCZNE

W systemach sterowania różnica między sygnałem wyjściowym w stanie ustalonym a wartością zadaną komendą sterującą jest nazywana uchybem ustalonym, który jest jednym z warunków przy ewaluacji działania systemu sterowania. W większości podręczników do analizy i omawiania uchybu ustalonego w różnych systemach używa się metod matematycznych.

1. Z podręczników teorii sterowania dowiadujemy się, że odpowiedź czasowa systemu może być podzielona na dwie części:

- (1) Charakterystyka czasowa w stanie nieustalonym
- (2) Charakterystyka w stanie ustalonym

Jeżeli $c(t)$ oznacza odpowiedź czasową systemu, to odpowiedź systemu może być wyrażona zależnością matematyczną:

$$c(t) = c_i(t) + c_{ss}(t)$$

gdzie $c_i(t)$ jest odpowiedzią systemu w stanie nieustalonym (charakterystyka przejściowa), a $c_{ss}(t)$ reprezentuje odpowiedź systemu w stanie ustalonym.

2. Definicje charakterystyki czasowej w stanie nieustalonym i odpowiedzi w stanie ustalonym:

- (1) Charakterystyka czasowa w stanie nieustalonym

Odpowiedź systemu w stanie nieustalonym jest częścią charakterystyki wyjściowej systemu. Po określonym czasie odpowiedź w stanie nieustalonym znika lub maleje do 0, zatem $c_i(t)$ można zapisać wyrażeniem:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} c_i(t) = 0$$

- (2) Charakterystyka czasowa w stanie ustalonym

Po zaniku odpowiedzi w stanie nieustalonym, pozostała część charakterystyki jest odpowiedzią systemu w stanie ustalonym $c_{ss}(t)$.

3. Uchyb ustalony

W systemach rzeczywistych nie jest możliwe, aby odpowiedź na wyjściu systemu była identyczna jak zadany sygnał wyjściowy, gdyż w systemach takich istnieje część nieustalona odpowiedzi $c_i(t)$. Odpowiedź w stanie nieustalonym stanowi część dynamiczną zachowania systemów i gra bardzo ważną rolę w badaniu charakterystyki systemów sterowania. W poniższym ćwiczeniu skupimy się na studiowaniu uchybu w stanie ustalonym, natomiast charakterystyka przejściowa systemu będzie rozważana w dalszej części podręcznika.

Po zaniku odpowiedzi w stanie nieustalonym system wchodzi w tzw. stan ustalony. Porównanie odpowiedzi w stanie ustalonym z sygnałem wejściowym określa dokładność systemu. Jeżeli odpowiedź systemu w stanie ustalonym różni się od sygnału wejściowego, to różnica między tymi sygnałami nazywana jest uchybem ustalonym.

4. Sygnały najczęściej używane do analizy charakterystyki czasowej systemów.

(1) Skok jednostkowy

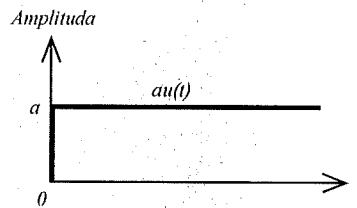
Sygnał skoku jednostkowego opisują poniższe wyrażenia matematyczne:

$$r(t) = \begin{cases} a & \text{jeżeli } t \geq 0 \\ 0 & \text{jeżeli } t < 0 \end{cases} \quad \text{lub} \quad r(t) = au(t)$$

Przekształcenie w dziedzinę Laplace'a

$$R(s) = \frac{a}{s}$$

Przebieg skoku jednostkowego w dziedzinie czasu pokazano na rysunku 3-1.



Rys. 3-1 Sygnał skoku jednostkowego

(2) Sygnał narastający liniowo (Ramp):

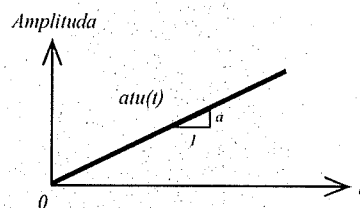
Sygnał narastający liniowo opisują poniższe wyrażenia matematyczne:

$$r(t) = \begin{cases} at & \text{jeżeli } t \geq 0 \\ 0 & \text{jeżeli } t < 0 \end{cases} \quad \text{lub} \quad r(t) = atu(t)$$

Przekształcenie w dziedzinę Laplace'a

$$R(s) = \frac{a}{s^2}$$

Przebieg sygnału narastającego liniowo w dziedzinie czasu pokazano na rysunku 3-2.



Rys. 3-2 Sygnał narastający liniowo (Ramp)

(3) Sygnał narastający wykładniczo (Parabolic):

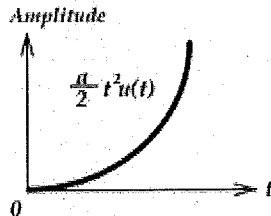
Sygnał narastający wykładniczo liniowo opisują poniższe wyrażenia matematyczne:

$$r(t) = \begin{cases} \frac{a}{2}t^2 & \text{jeżeli } t \geq 0 \\ 0 & \text{jeżeli } t < 0 \end{cases} \quad \text{lub} \quad r(t) = \frac{a}{2}t^2 u(t)$$

Przekształcenie w dziedzinie Laplace'a

$$R(s) = \frac{a}{s^3}$$

Przebieg sygnału narastającego wykładniczo w dziedzinie czasu pokazano na rysunku 3-3.



Rys. 3-3 Sygnał narastający wykładniczo (Parabolic)

Te trzy wspomniane wyżej sygnały mają proste charakterystyki, które można łatwo analizować z wykorzystaniem transformaty Laplace'a, co jest bardzo pomocne przy ocenie działania i jakości systemów sterowania.

5. W większości rzeczywistych systemów sterowania istnieje uchyb ustalony ze względu na tarcie lub inne czynniki nieodłącznie występujące w takich systemach. Przy projektowaniu systemów sterowania błędy muszą być minimalizowane lub zmniejszane do dopuszczalnego zakresu.
6. Przyczyny powstawania uchybu ustalonego:

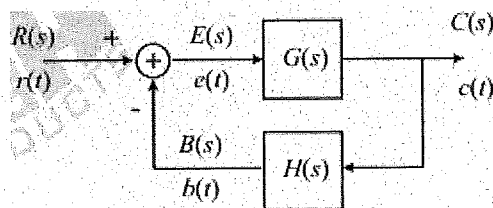
- (1) Uchyb ustalony powodowany elementami nieliniowymi

Uchyb ustalony w wielu systemach rzeczywistych jest powodowany nieliniową charakterystyką tego systemu, jak nieliniowe części ułamkowe, zjawisko nasycenia, obszary martwe, luzy itd. Szczegółowa analiza błędów systemów nieliniowych jest raczej skomplikowana i nie wchodzi w zakres niniejszego ćwiczenia.

- (2) Uchyb ustalony w systemach liniowych

W systemach liniowych istnieje bliska zależność między uchybem ustalonym, rodzajem systemu i sygnałem wejściowym. Różne rodzaje systemów i różne sygnały wejściowe generują różne błędy ustalone. W pierwszej kolejności zajmiemy się definicją typu systemu.

Rozważmy schemat blokowy systemu sterowania pokazany na rysunku 3-4,



Rys. 3-4 Schemat blokowy systemu sterowania

Funkcja $G(s)H(s)$ może zostać zapisana w postaci

$$G(s)H(s) = \frac{K(1 + a_1s)(1 + a_2s)\dots(1 + a_ns)}{s^j(1 + b_1s)(1 + b_2s)\dots(1 + b_ms)}$$

Typ systemu jest określany przez zmienną j niezależnie od zmiennych m , n i K . Związek między typem systemu a wartością zmiennej j zestawiono w tabeli poniżej.

j	Typ systemu
0	system typu 0
1	system typu 1
⋮	⋮
n	system typu n

Przykładowo, system o charakterystyce $G(s)H(s) = \frac{K(5+s)}{s(1+s)(2+s)}$ jest systemem typu 1, ponieważ $j=1$.

Po przyswojeniu sobie definicji typu systemu, omówimy błąd $E(s)$ lub $e(t)$, jak niżej.

Na podstawie schematu blokowego z rysunku 3-4 otrzymujemy zależność

$$e(t) = r(t) - b(t)$$

Po przekształceniu do dziedzin zespolonej Laplace'a

$$\begin{aligned} E(s) &= R(s) - B(s) \\ &= R(s) - C(s)H(s) \\ &= R(s) - E(s)G(s)H(s) \end{aligned}$$

$$\therefore E(s) = \frac{R(s)}{1 + G(s)H(s)}$$

Uchyb ustalony e_{ss} jest definiowany jako

$$\begin{aligned} e_{ss} &= \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)H(s)} \end{aligned}$$

W konsekwencji wpływ sygnału wejściowego i typu systemu na uchyb ustalony będzie omówiony poniżej

(i) Uchyb ustalony przy skoku jednostkowym na wejściu

Skokowy sygnał wejściowy opisywany jest zależnościami

$$R(s) = \frac{a}{s} \quad \text{lub} \quad r(t) = au(t)$$

Stała K_p błędu przy sygnale skokowym jest definiowana zależnością

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)H(s)$$

Wtedy

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)H(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{a}{1 + G(s)H(s)} = \frac{a}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} G(s)H(s)} = \frac{a}{1 + K_p}$$

(a) W systemie typu 0

$$G(s)H(s) = \frac{K(1 + a_1s)(1 + a_2s)\dots(1 + a_ns)}{(1 + b_1s)(1 + b_2s)\dots(1 + b_ms)}$$

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)H(s) = K$$

$$e_{ss} = \frac{a}{1 + K_p} = \frac{a}{1 + K}$$

Co wskazuje, że w odpowiedzi systemu typu 0 na skok jednostkowy na wejściu zawarty jest nieodłączny uchyb ustalony.

(b) W systemie typu 1

$$G(s)H(s) = \frac{K(1 + a_1s)(1 + a_2s)\dots(1 + a_ns)}{s(1 + b_1s)(1 + b_2s)\dots(1 + b_ms)}$$

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)H(s) = \infty$$

$$e_{ss} = \frac{a}{1 + K_p} = \frac{a}{1 + \infty} = 0$$

Co wskazuje, że odpowiedź systemu typu 1 na skok jednostkowy na wejściu nie zawiera uchybu ustalonego.

(c) W systemie typu 2

$$G(s)H(s) = \frac{K(1 + a_1s)(1 + a_2s)\dots(1 + a_ns)}{s^2(1 + b_1s)(1 + b_2s)\dots(1 + b_ms)}$$

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G(s)H(s) = \infty$$

$$e_{ss} = \frac{a}{1 + K_p} = \frac{a}{1 + \infty} = 0$$

Co wskazuje, że odpowiedź systemu typu 2 na skok jednostkowy na wejściu nie zawiera uchybu ustalonego.

(ii) Uchyb ustalony przy sygnale liniowo narastającym na wejściu

Narastający liniowo sygnał wejściowy opisywany jest zależnościami

$$R(s) = \frac{a}{s^2} \quad \text{lub} \quad r(t) = atu(t)$$

Stała K_v błędu przy sygnale narastającym liniowo jest definiowana zależnością

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)H(s)$$

Wtedy

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)H(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{a}{s + sG(s)H(s)} = \frac{a}{K_v}$$

(a) W systemie typu 0

$$G(s)H(s) = \frac{K(1 + a_1s)(1 + a_2s)\dots(1 + a_ns)}{(1 + b_1s)(1 + b_2s)\dots(1 + b_ms)}$$

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)H(s) = 0$$

$$e_{ss} = \frac{a}{K_v} = \infty$$

Co wskazuje, że wyjście systemu typu 0 nie może nadążać za sygnałem narastającym liniowo na wejściu i uchyb ustalony ulega stałemu wzrostowi w miarę wydłużania się czasu.

(b) W systemie typu 1

$$G(s)H(s) = \frac{K(1 + a_1s)(1 + a_2s)\dots(1 + a_ns)}{s(1 + b_1s)(1 + b_2s)\dots(1 + b_ms)}$$

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)H(s) = K$$

$$e_{ss} = \frac{a}{K_v} = \frac{a}{K}$$

Co wskazuje, że w odpowiedzi systemu typu 1 na wejściowy sygnał narastający liniowo zawarty jest nieodłączny uchyb ustalony.

(c) W systemie typu 2

$$G(s)H(s) = \frac{K(1 + a_1s)(1 + a_2s)\dots(1 + a_ns)}{s^2(1 + b_1s)(1 + b_2s)\dots(1 + b_ms)}$$

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s)H(s) = \infty$$

$$e_{ss} = \frac{a}{K_p} = \frac{a}{\infty} = 0$$

Co wskazuje, że odpowiedź systemu typu 2 na wejściowy sygnał narastający liniowo nie zawiera uchybu ustalonego.

- (iii) Uchyb ustalony przy sygnale narastającym wykładniczo na wejściu
 Narastający wykładniczo sygnał wejściowy opisywany jest zależnościami

$$R(s) = \frac{a}{s^3} \quad \text{lub} \quad r(t) = \frac{a}{2} t^2 u(t)$$

Stała K_a błędu przy sygnale narastającym wykładniczo jest definiowana zależnością

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)H(s)$$

Wtedy

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{sR(s)}{1 + G(s)H(s)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{a}{s^2 + s^2 G(s)H(s)} = \frac{a}{K_a}$$

- (a) W systemie typu 0

$$G(s)H(s) = \frac{K(1 + a_1 s)(1 + a_2 s) \dots (1 + a_n s)}{(1 + b_1 s)(1 + b_2 s) \dots (1 + b_m s)}$$

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)H(s) = 0$$

$$e_{ss} = \frac{a}{K_a} = \infty$$

Co wskazuje, że wyjście systemu typu 0 nie może nadążać za sygnałem narastającym wykładniczo na wejściu i uchyb ustalony ulega stałemu wzrostowi w miarę wydłużania się czasu.

- (b) W systemie typu 1

$$G(s)H(s) = \frac{K(1 + a_1 s)(1 + a_2 s) \dots (1 + a_n s)}{s(1 + b_1 s)(1 + b_2 s) \dots (1 + b_m s)}$$

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)H(s) = 0$$

$$e_{ss} = \frac{a}{K_a} = \infty$$

Co wskazuje, że wyjście systemu typu 1 nie może nadążać za sygnałem narastającym wykładniczo na wejściu i uchyb ustalony ulega stałemu wzrostowi w miarę wydłużania się czasu.

- (c) W systemie typu 2

$$G(s)H(s) = \frac{K(1 + a_1 s)(1 + a_2 s) \dots (1 + a_n s)}{s^2(1 + b_1 s)(1 + b_2 s) \dots (1 + b_m s)}$$

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)H(s) = K$$

$$e_{ss} = \frac{a}{K_a} = \frac{a}{K}$$

Co wskazuje, że w odpowiedzi systemu typu 2 na wejściowy sygnał narastający wykładniczo zawarty jest nieodłączny uchyb ustalony.

(d) W systemie typu 3

$$G(s)H(s) = \frac{K(1 + a_1s)(1 + a_2s)\dots(1 + a_ns)}{s^3(1 + b_1s)(1 + b_2s)\dots(1 + b_ms)}$$

$$K_a = \lim_{s \rightarrow 0} s^2 G(s)H(s) = \infty$$

$$e_{ss} = \frac{a}{K_a} = \frac{a}{\infty} = 0$$

Co wskazuje, że odpowiedź systemu typu 3 na wejściowy sygnał narastający wykładniczo nie zawiera żadnego uchybu ustalonego.

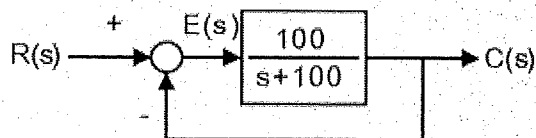
W poniższej tabeli zawarto podsumowanie powyższych rozwiązań:

Typ systemu	K_p	K_v	K_a	Skok jednostkowy e_{ss}	Ramp e_{ss}	Parabolic e_{ss}
0	K	0	0	$a/(1+K)$	∞	∞
1	∞	K	0	0	a/K	∞
2	∞	∞	K	0	0	a/K
3	∞	∞	∞	0	0	0

PROCEDURA

A. System typu 0

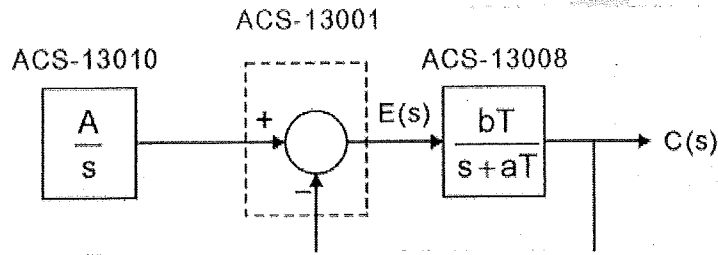
Schemat blokowy systemu typu 0 pokazano na rysunku 3-5.



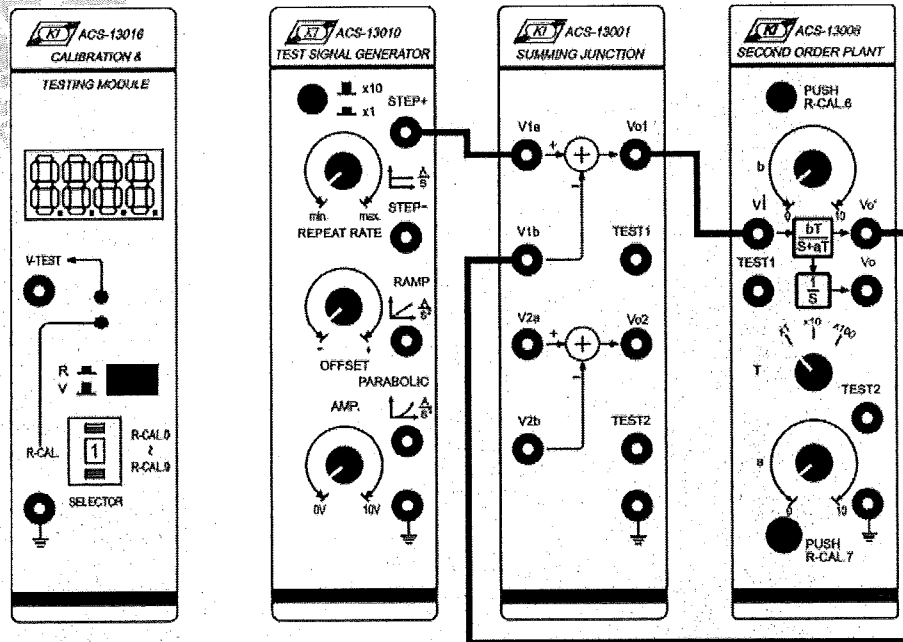
Rys. 3-5 Schemat blokowy systemu typu 0

A-1. Skok jednostkowy na wejściu

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń, jak na rysunku 3-6.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 3-6

2. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,1Hz.
3. W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, a stałe a i b ustawić na 10. W takiej sytuacji funkcja przejściowa modułu ACS-13008 wyrażana jest zależnością:

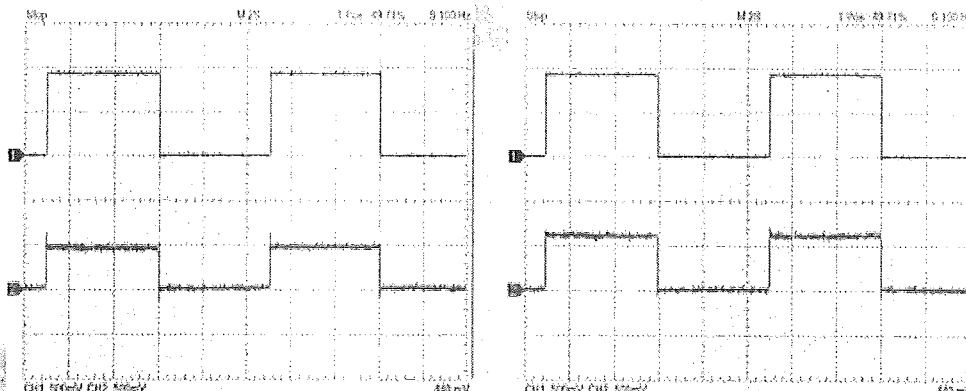
$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{bT}{s + aT} = \frac{100}{s + 100}$$

Taki układ jest systemem typu 0 ze skokiem jednostkowym na wejściu, a jego uchyb ustalony wynosi:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + G(s)} R(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + \frac{100}{s + 100}} \frac{1}{s} = 0,5$$

4. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_{o1} modułu ACS-13001, które pokazano na rysunku 3-7(a). Obserwować uchyb ustalony e_{ss} , aby stwierdzić, czy przyjmuje on wartość stałą.

5. W module ACS-13008 ustawić $a=20$ i $b=10$. Powtórzyć punkt 4, aby uzyskać wyniki, jak na rysunku 3-7(b). Obserwować uchyb ustalony e_{ss} , aby stwierdzić, czy jego wartość zgadza się z wartością teoretyczną.



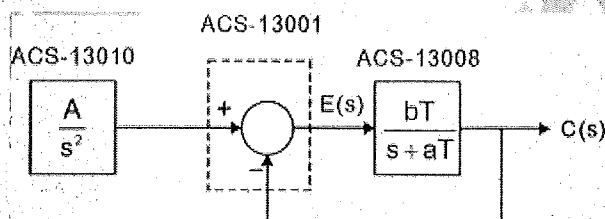
(a) $a=10, b=10$

(b) $a=20, b=10$

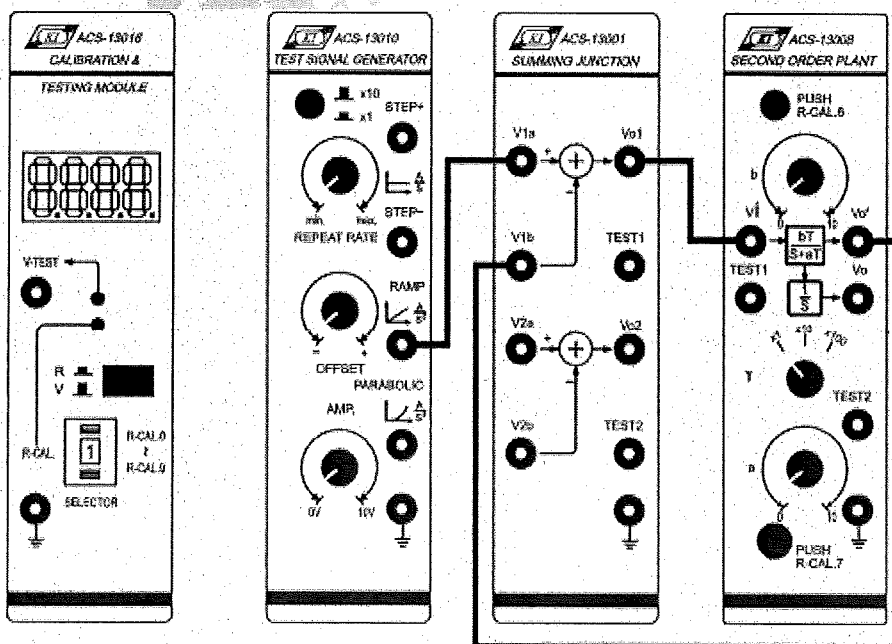
Rys. 3-7

A-2. Sygnał narastający liniowo (Ramp) na wejściu

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń, jak na rysunku 3-8.

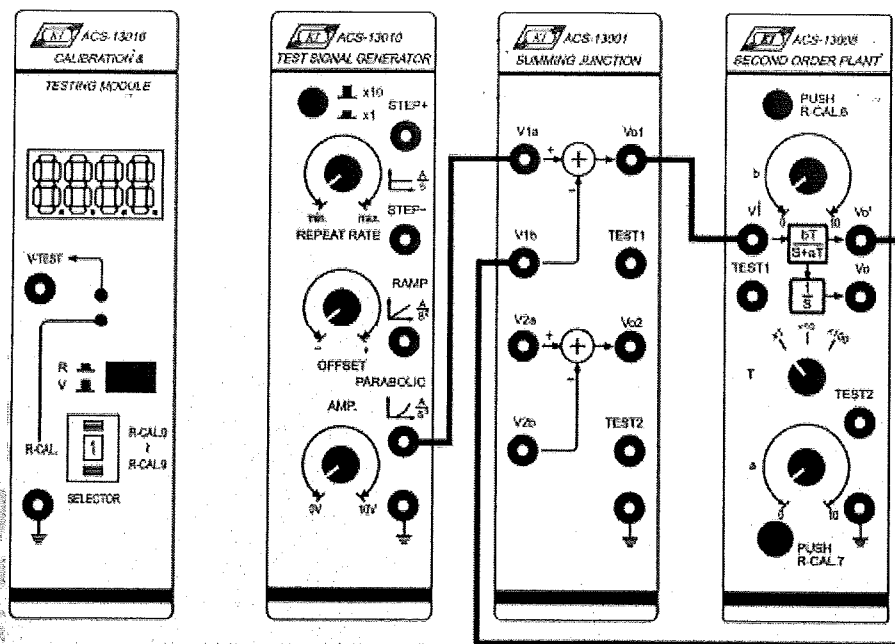


(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 3-8



(b) Schemat połączeń

Rys. 3-10

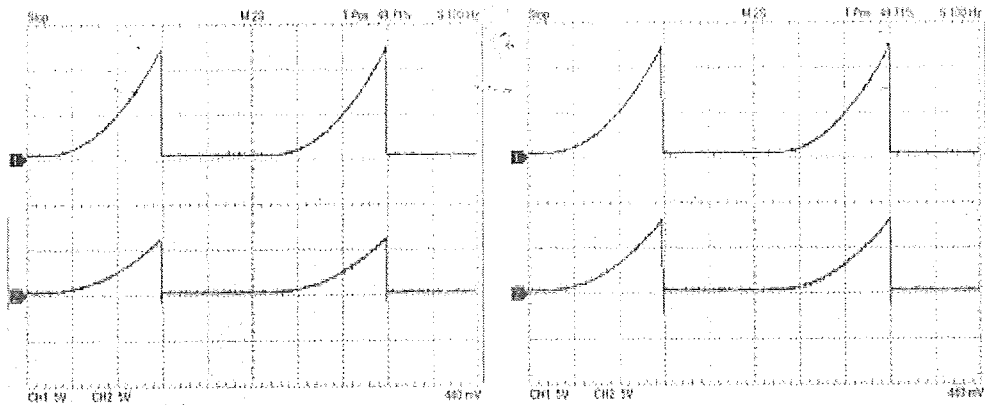
2. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,1Hz.
3. W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, a stałe a i b ustawić na 10. W takiej sytuacji funkcja przejściowa modułu ACS-13008 wyrażana jest zależnością:

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{bT}{s + aT} = \frac{100}{s + 100}$$

Taki układ jest systemem typu 0 z sygnałem narastającym wykładniczo na wejściu, a jego uchyb ustalony wynosi:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + G(s)} R(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + \frac{100}{s + 100}} \frac{1}{s^3} = \infty$$

4. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach PARABOLIC modułu ACS-13010 i V_{o1} modułu ACS-13001, które pokazano na rysunku 3-11(a). Obserwować uchyb ustalony e_{ss}, aby stwierdzić, czy wzrasta on wraz z upływem czasu.
5. W module ACS-13008 ustawić a=20 i b=10. Powtórzyć punkt 4, aby uzyskać wyniki, jak na rysunku 3-11(b). Obserwować uchyb ustalony e_{ss}, aby stwierdzić, czy jego wartość zgadza się z wartością teoretyczną.



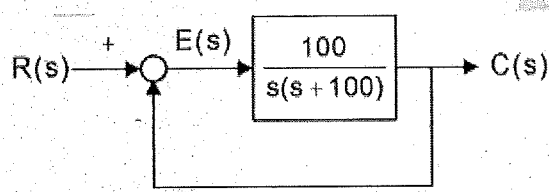
(a) $a=10, b=10$

(b) $a=20, b=10$

Rys. 3-11

B. System typu 1

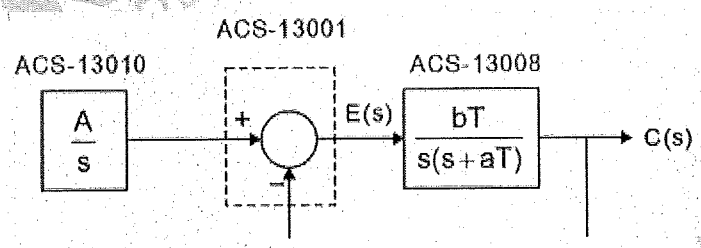
Schemat blokowy systemu typu 1 pokazano na rysunku 3-12.



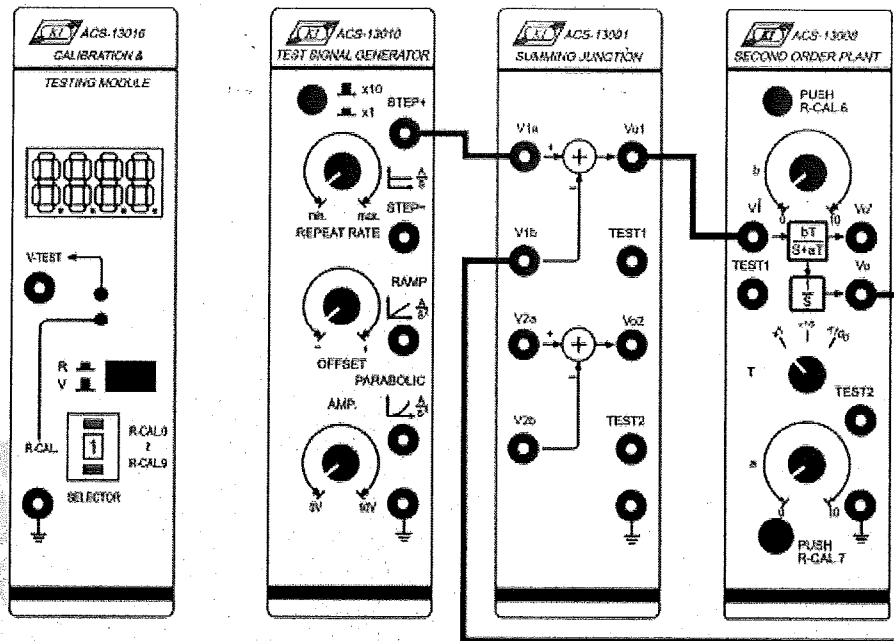
Rys. 3-12 Schemat blokowy systemu typu 1

B-1. Skok jednostkowy na wejściu

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń, jak na rysunku 3-13.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 3-13

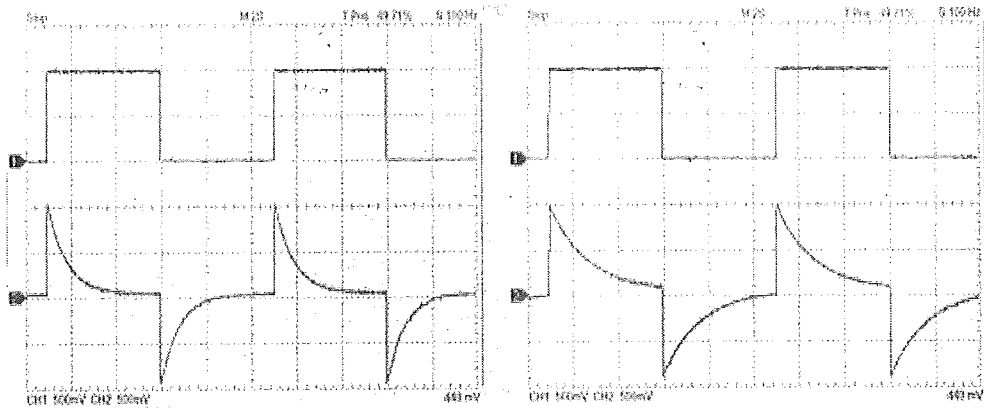
2. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,1Hz.
3. W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, a stałe a i b ustawić na 10. W takiej sytuacji funkcja przejściowa modułu ACS-13008 wyrażana jest zależnością:

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{bT}{s + aT} \frac{1}{s} = \frac{100}{s^2 + 100s}$$

Taki układ jest systemem typu 1 ze skokiem jednostkowym na wejściu, a jego uchyb ustalony wynosi:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + G(s)} R(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + \frac{100}{s}} \frac{1}{s} = 0$$

4. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_{o1} modułu ACS-13001, które pokazano na rysunku 3-14(a). Obserwować uchyb ustalony e_{ss} , aby stwierdzić, czy przyjmuje on wartość równą 0.
5. W module ACS-13008 ustawić a=20 i b=10. Powtórzyć punkt 4, aby uzyskać wyniki, jak na rysunku 3-14(b). Obserwować uchyb ustalony e_{ss} , aby stwierdzić, czy jego wartość zgadza się z wartością teoretyczną.



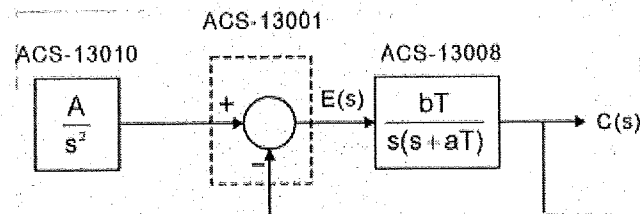
(a) $a=10, b=10$

(b) $a=20, b=10$

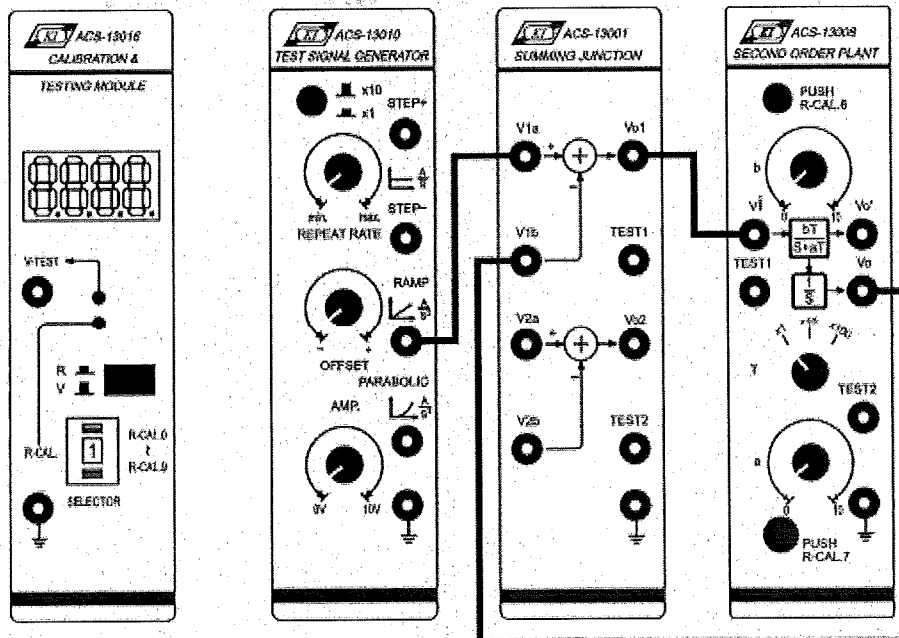
Rys. 3-14

B-2. Sygnał narastający liniowo (Ramp) na wejściu

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń, jak na rysunku 3-15.

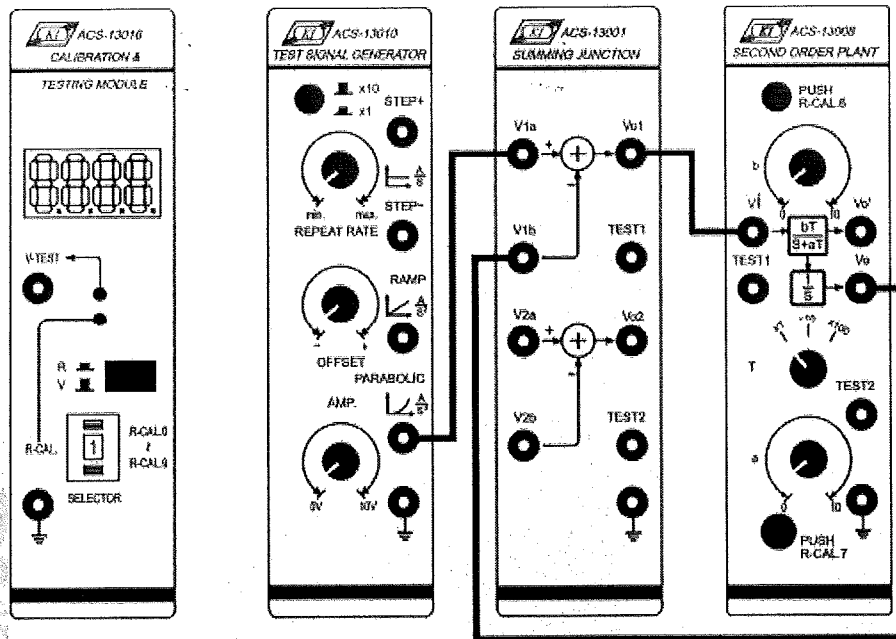


(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 3-15



(b) Schemat połączeń

Rys. 3-17

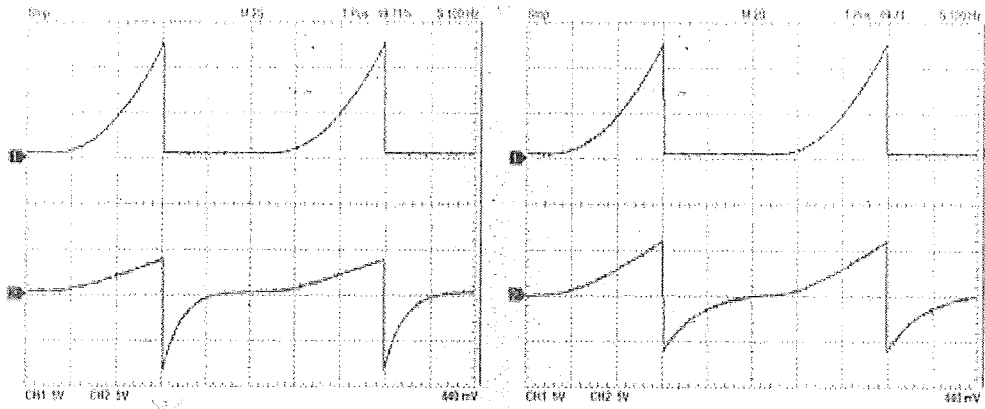
2. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,1Hz.
3. W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, a stałe a i b ustawić na 10. W takiej sytuacji funkcja przejściowa modułu ACS-13008 wyrażana jest zależnością:

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{bT}{s+aT} \cdot \frac{1}{s} = \frac{100}{s^2 + 100s}$$

Taki układ jest systemem typu 1 z sygnałem narastającym wykładniczo na wejściu, a jego uchyb ustalony wynosi:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1+G(s)} R(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + \frac{100}{s^2 + 100s}} \frac{1}{s^3} = \infty$$

4. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach PARABOLIC modułu ACS-13010 i V_{01} modułu ACS-13001, które pokazano na rysunku 3-18(a). Obserwować uchyb ustalony e_{ss} , aby stwierdzić, czy wzrasta on wraz z upływem czasu.
5. W module ACS-13008 ustawić $a=20$ i $b=10$. Powtórzyć punkt 4, aby uzyskać wyniki, jak na rysunku 3-18(b). Obserwować uchyb ustalony e_{ss} , aby stwierdzić, czy jego wartość zgadza się z wartością teoretyczną.



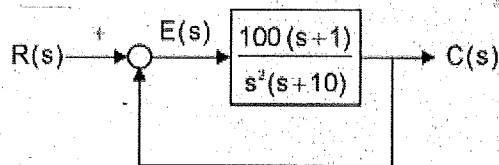
(a) a=10, b=10

(b) a=20, b=10

Rys. 3-18

C. System typu 2

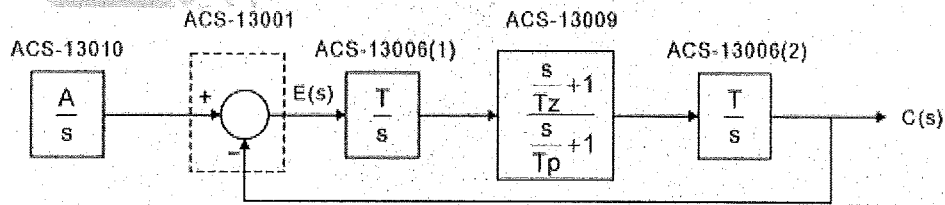
Schemat blokowy systemu typu 2 pokazano na rysunku 3-19.



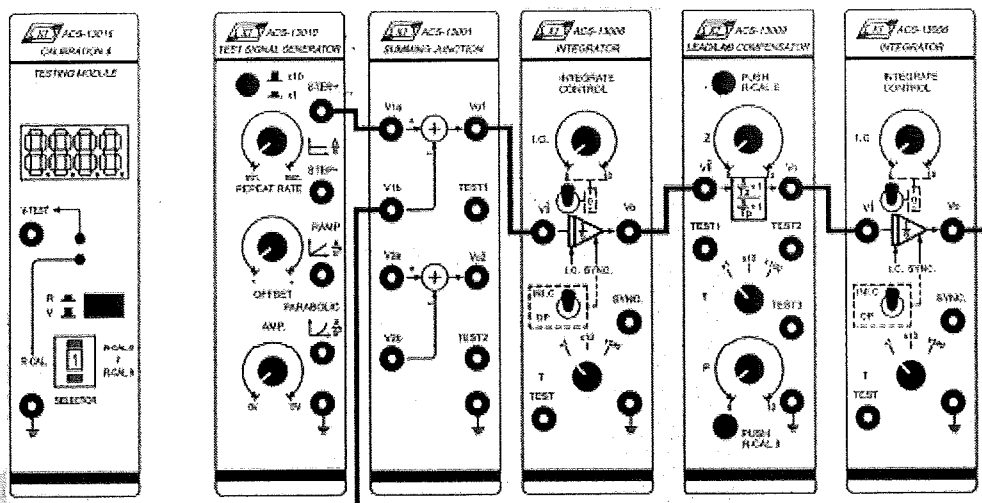
Rys. 3-19 Schemat blokowy systemu typu 2

C-1. Skok jednostkowy na wejściu

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń, jak na rysunku 3-20.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 3-20

2. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,1Hz.
3. W module ACS-13009 ustawić przełącznik T na pozycji x10, stałą z na 0,1 i stałą p na 1.
4. W modułach ACS-13006(1) i ACS13006(2) ustawić przełączniki jak w tabeli poniżej:

Przełącznik	ACS-13006(1)	ACS-13006(2)
T	x1	x1
I.C.	0	0
SYNC.	OP	OP

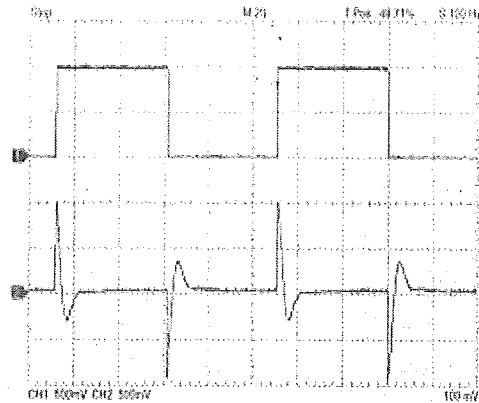
Funkcja przejściowa takiego systemu wyrażana jest zależnością:

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s} \cdot \frac{s+1}{10} \cdot \frac{10}{s^3 + 10s^2} = \frac{100s + 100}{s^3 + 10s^2}$$

Taki układ jest systemem typu 2 ze skokiem jednostkowym na wejściu, a jego uchyb ustalony wynosi:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + G(s)} R(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + \frac{100s + 100}{s^3 + 10s^2}} \frac{1}{s} = 0$$

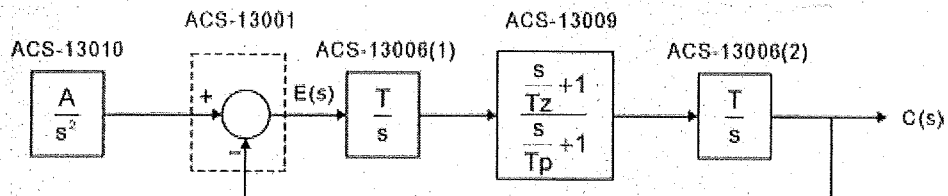
5. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_{o1} modułu ACS-13001, które pokazano na rysunku 3-21. Obserwować uchyb ustalony e_{ss} , aby stwierdzić, czy przyjmuje on wartość równą 0.



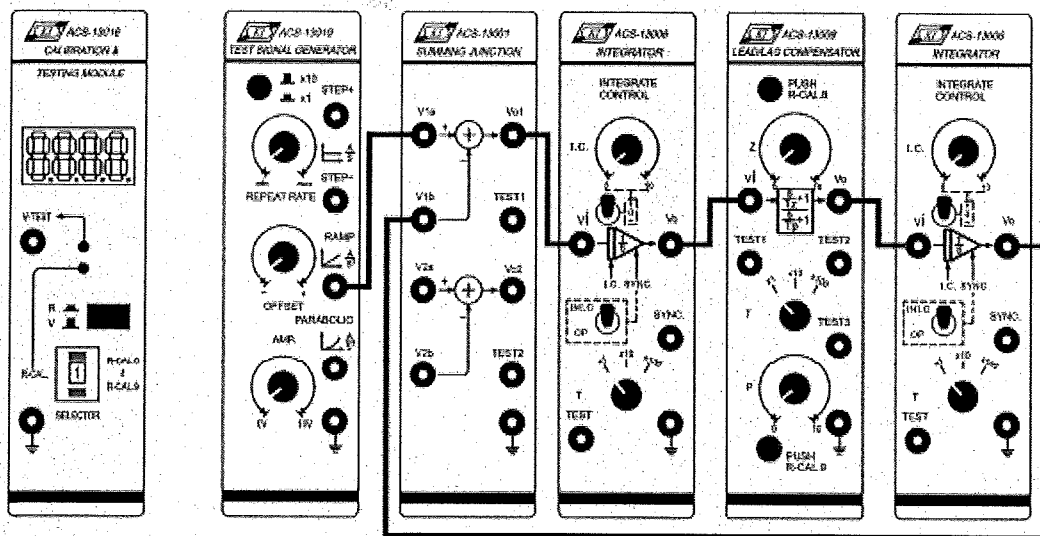
Rys. 3-21

C-2. Sygnał narastający liniowo (Ramp) na wejściu

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń, jak na rysunku 3-22.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 3-22

2. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,1Hz.
3. W module ACS-13009 ustawić przełącznik T na pozycji x10, stałą z na 0,1 i stałą p na 1.

4. W modułach ACS-13006(1) i ACS13006(2) ustawić przełączniki jak w tabeli poniżej:

Przełącznik	ACS-13006(1)	ACS-13006(2)
T	x1	x10
I.C.	0	0
SYNC.	OP	OP

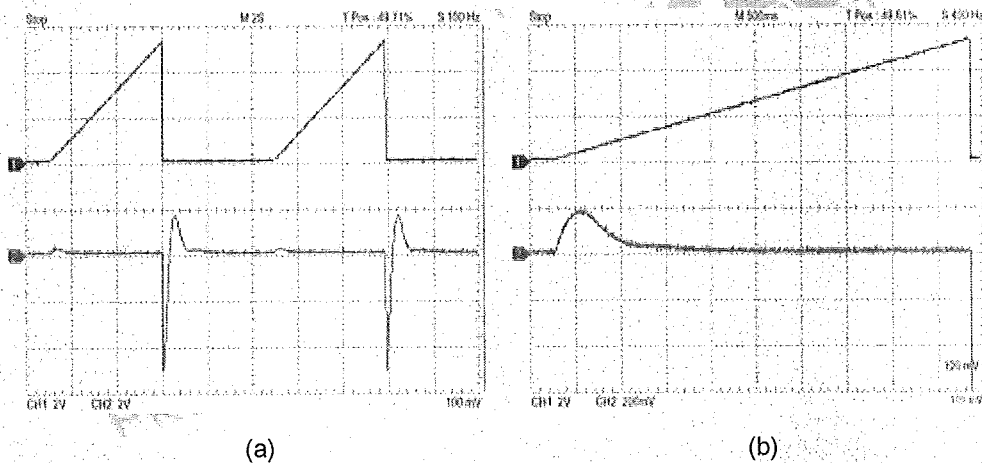
Funkcja przejściowa takiego systemu wyrażana jest zależnością:

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{10} \frac{s+1}{s} \frac{10}{s+1} = \frac{100s+100}{s^3+10s^2}$$

Taki układ jest systemem typu 2 z sygnałem narastającym liniowo na wejściu, a jego uchyb ustalony wynosi:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1+G(s)} R(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + \frac{100s+100}{s^2}} \frac{1}{s^2} = 0$$

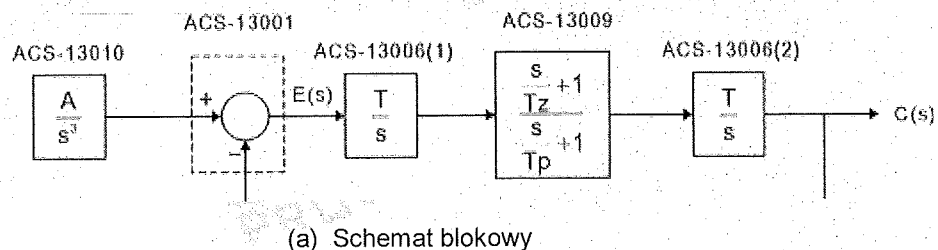
5. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach RAMP modułu ACS-13010 i V_{o1} modułu ACS-13001, które pokazano na rysunku 3-23. Obserwować uchyb ustalony e_{ss} , aby stwierdzić, czy przyjmuje on wartość równą 0.

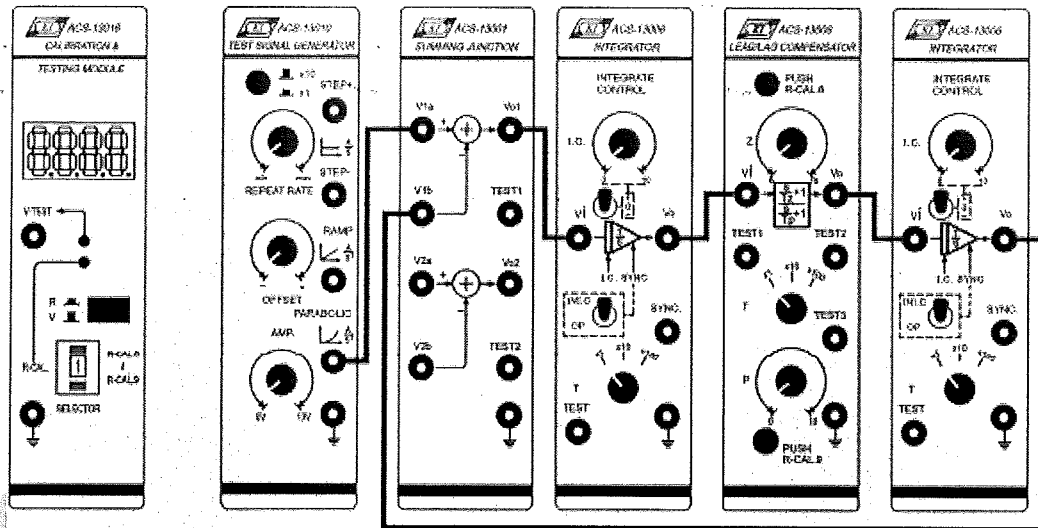


Rys. 3-23

C-3. Sygnał narastający wykładniczo (Parabolic) na wejściu

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń, jak na rysunku 3-24.





(b) Schemat połączeń

Rys. 3-24

2. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,1Hz.
3. W module ACS-13009 ustawić przełącznik T na pozycji x10, stałą z na 0,1 i stałą p na 1.
4. W modułach ACS-13006(1) i ACS13006(2) ustawić przełączniki jak w tabeli poniżej:

Przełącznik	ACS-13006(1)	ACS-13006(2)
T	x1	x10
I.C.	0	0
SYNC.	OP	OP

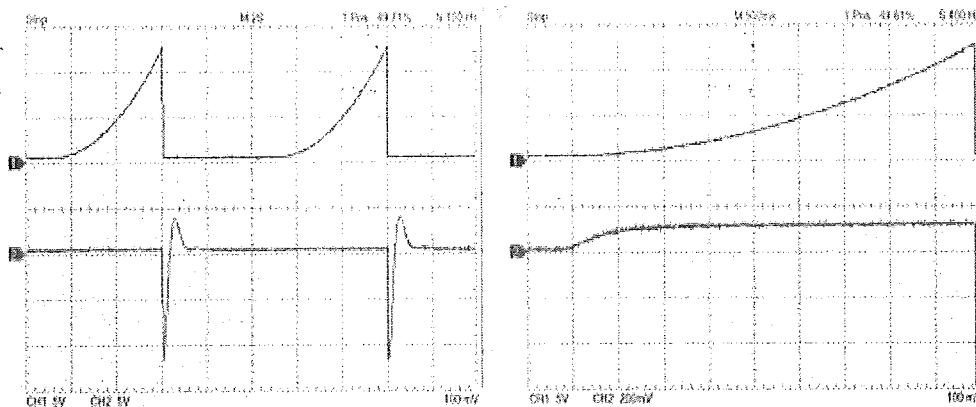
Funkcja przejściowa takiego systemu wyrażana jest zależnością:

$$G(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s} \frac{s+1}{s+10} \frac{10}{s} = \frac{100s+100}{s^3+10s^2}$$

Taki układ jest systemem typu 2 z sygnałem narastającym wykładniczo na wejściu, a jego uchyb ustalony wynosi:

$$e_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1+G(s)} R(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{1 + \frac{100s+100}{s^3+10s^2}} \frac{1}{s^3} = 0,09$$

5. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach PARABOLIC modułu ACS-13010 i V_{o1} modułu ACS-13001, które pokazano na rysunku 3-25. Obserwować uchyb ustalony e_{ss} , aby stwierdzić, czy przyjmuje on wartość stałą.



(a)

(b) przebieg rozciągnięty

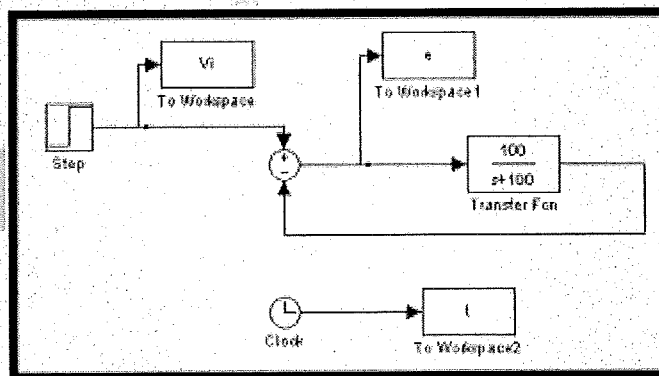
Rys. 3-25

SYMULACJA SIMULINK

A. System typu 0

A-1. Skok jednostkowy na wejściu

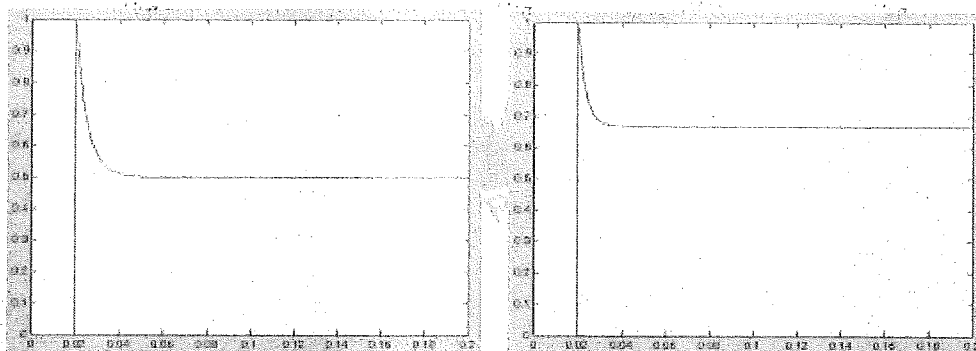
1. Otworzyć okno poleceń programu MATLAB.
2. W oknie poleceń MATLAB wpisać simulink < ↵ >.
3. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 3-26.



Rys. 3-26

4. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku (*Step time*) na 0.02.
5. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czas symulacji zmieniając czas Stop na 0.2.
6. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_3_1.mdl.
7. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-27(a).
8. Zmodyfikować parametry przejściowe Fcn aT na 200 i bT na 100. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-27(b)

9. Analizując wyniki z rysunku 3-27, możemy zauważyć, że uchyb ustalony e_{ss} zbliża się do wartości stałej. Wartość ta zmienia się przy zmianach parametrów aT i bT .



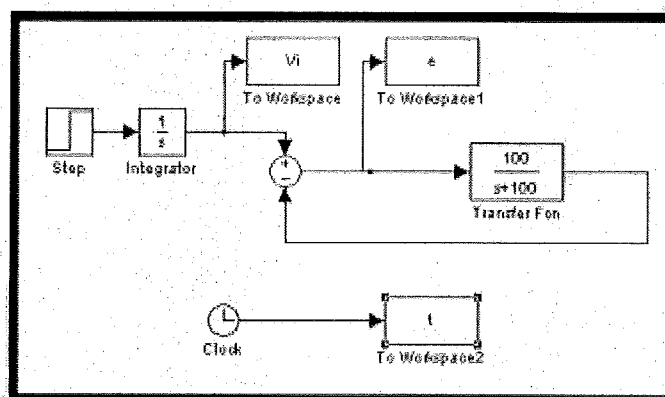
(a) $aT=100$, $bT=100$

(b) $aT=200$, $bT=100$

Rys. 3-27

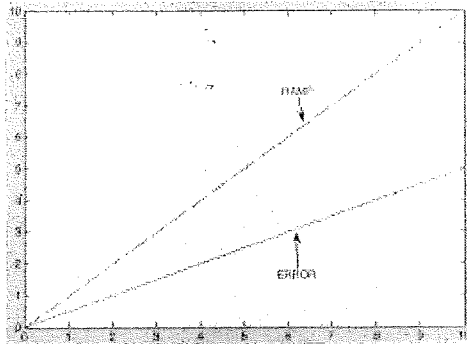
A-2. Sygnał narastający liniowo na wejściu (Ramp): Do wytworzenia sygnału narastającego liniowo wykorzystać sygnał skoku jednostkowego podany na układ integratora (a/s).

1. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 3-28.

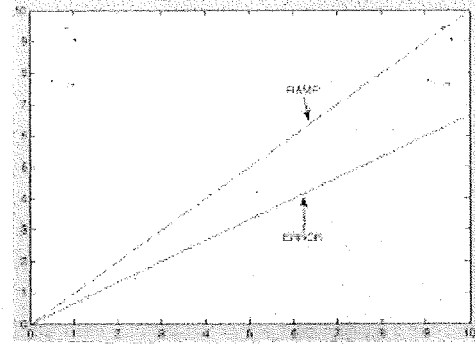


Rys. 3-28

2. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku (*Step time*) na 0.02.
3. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawień czasu symulacji zmienić czas Stop na 10.
4. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_3_2.mdl.
5. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-29(a).
6. Zmodyfikować parametry przejściowe Fcn aT na 200 i bT na 100. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-29(b)
7. Analizując wyniki z rysunku 3-29, możemy zauważyć, że uchyb ustalony e_{ss} dąży do nieskończoności w miarę upływu czasu. Zmiany parametrów aT i bT powodują jedynie zmianę nachylenia prostej e_{ss} .



(a) $aT=100, bT=100$

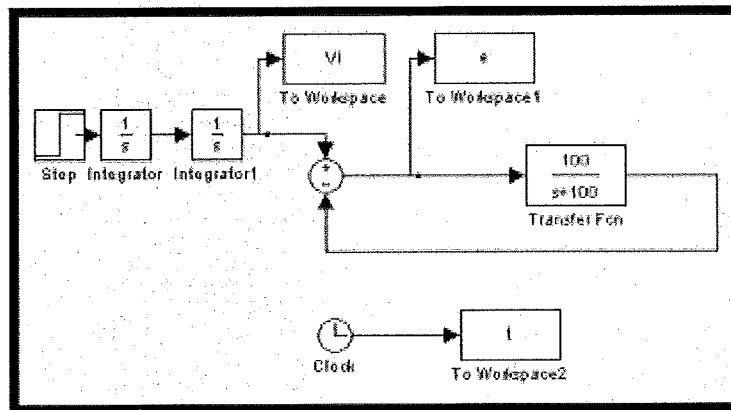


(b) $aT=200, bT=100$

Rys. 3-29

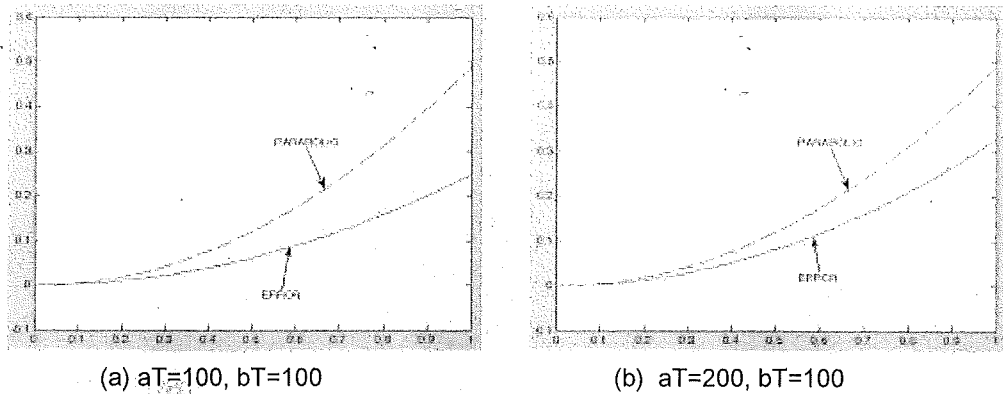
A-3. Sygnał narastający wykładniczo na wejściu (Parabolic): Do wytworzenia sygnału narastającego wykładniczo wykorzystać sygnał skoku jednostkowego podany na wejście połączonych szeregowo dwóch integratorów.

1. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 3-30.



Rys. 3-30

2. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku (*Step time*) na 0.01.
3. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawień czasu symulacji zmienić czas Stop na 1.
4. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_3_3.mdl.
5. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-31(a).
6. Zmodyfikować parametry przejściowe Fcn aT na 200 i bT na 100. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-31(b)
7. Analizując wyniki z rysunku 3-31, możemy zauważyć, że uchyb ustalony e_{ss} dąży do nieskończoności w miarę upływu czasu. Zmiany parametrów aT i bT powodują jedynie zmianę nachylenia krzywej e_{ss} .

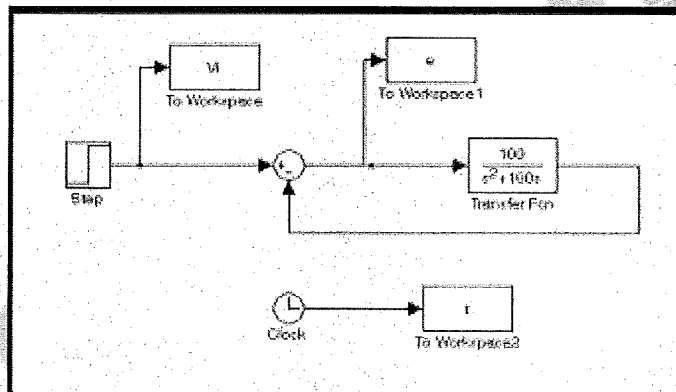


Rys. 3-31

B. System typu 1

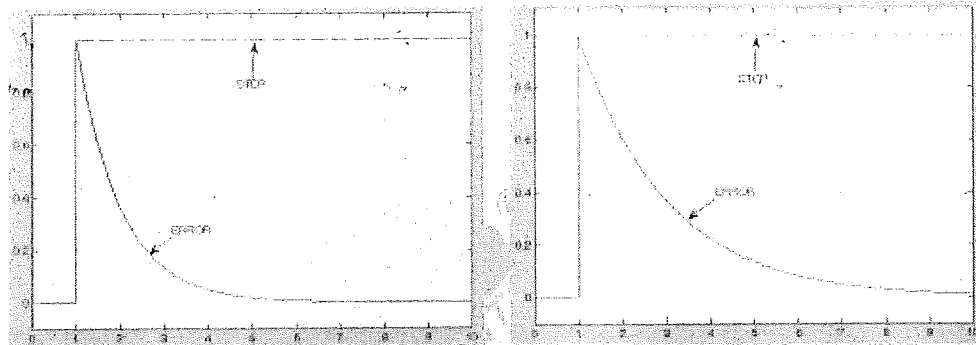
B-1. Skok jednostkowy na wejściu

1. Otworzyć okno poleceń programu MATLAB.
2. W oknie poleceń MATLAB wpisać simulink < ↵ >.
3. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 3-32.



Rys. 3-26

4. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku (*Step time*) na 1.
5. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawień czasu symulacji zmienić czas Stop na 10.
6. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_3_4.mdl.
7. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-33(a).
8. Zmodyfikować parametry przejściowe Fcn aT na 200 i bT na 100. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-33(b).
9. Analizując wyniki z rysunku 3-33, możemy zauważyć, że uchyb ustalony e_{ss} maleje w miarę wzrostu czasu, a wartość końcowa uchybu zbliża się prawie do 0. Zmiany parametrów aT i bT powodują jedynie zmianę nachylenia krzywej uchybu.



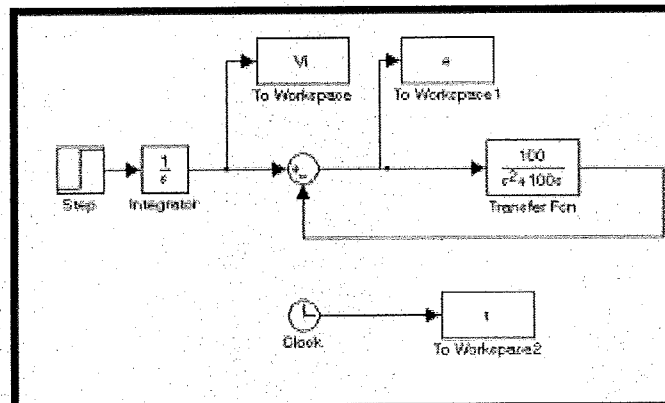
(a) $aT=100, bT=100$

(b) $aT=200, bT=100$

Rys. 3-33

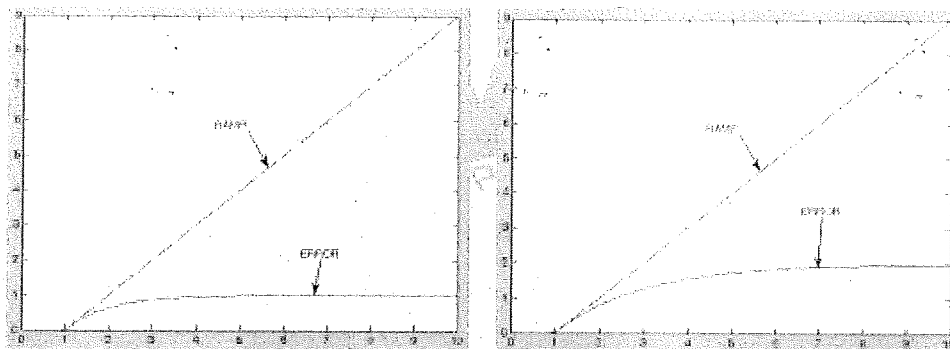
B-2. Sygnał narastający liniowo na wejściu (Ramp): Do wytworzenia sygnału narastającego liniowo wykorzystać sygnał skoku jednostkowego podany na układ integratora (a/s).

1. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 3-34.



Rys. 3-34

2. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 1.
3. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 10.
4. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_3_5.mdl.
5. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-35(a).
6. Zmodyfikować parametry przejściowe Fcn aT na 200 i bT na 100. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-35(b)
7. Analizując wyniki z rysunku 3-35, możemy zauważyć, że uchyb ustalony e_{ss} dąży do wartości stałej. Zmiany parametrów aT i bT powodują zmianę wartości tej stałej.



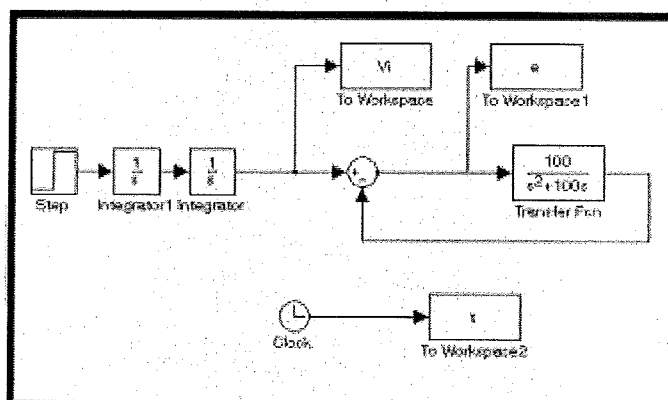
(a) $aT=100$, $bT=100$

(b) $aT=200$, $bT=100$

Rys. 3-35

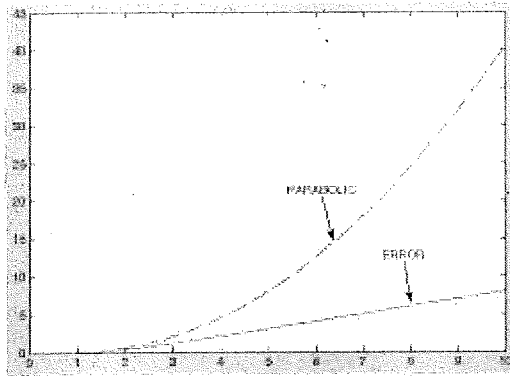
B-3. Sygnał narastający wykładniczo na wejściu (Parabolic): Do wytworzenia sygnału narastającego wykładniczo wykorzystać sygnał skoku jednostkowego podany na wejście połączonych szeregowo dwóch integratorów.

1. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 3-36.

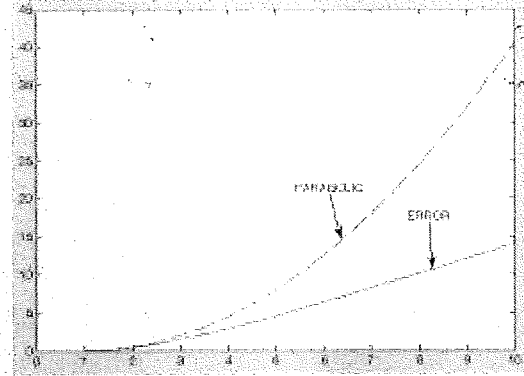


Rys. 3-36

2. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 1.
3. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 10.
4. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_3_6.mdl.
5. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-37(a).
6. Zmodyfikować parametry przejściowe Fcn aT na 200 i bT na 100. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-37(b)
7. Analizując wyniki z rysunku 3-37, możemy zauważyć, że uchyb ustalony e_{ss} dąży do nieskończoności w miarę upływu czasu. Zmiany parametrów aT i bT powodują jedynie zmianę nachylenia krzywej e_{ss} .



(a) $aT=100, bT=100$



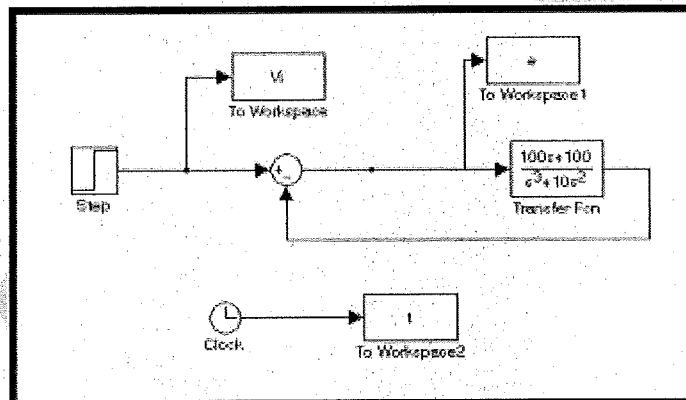
(b) $aT=200, bT=100$

Rys. 3-37

C. System typu 2

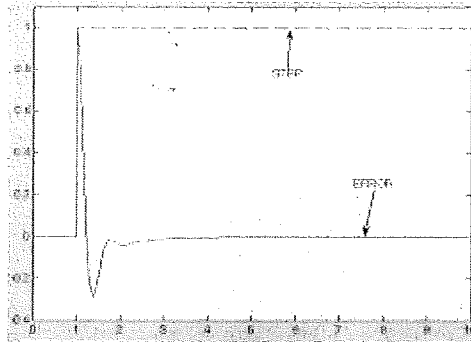
C-1. Skok jednostkowy na wejściu

1. Otworzyć okno poleceń programu MATLAB.
2. W oknie poleceń MATLAB wpisać simulink < ↵ >.
3. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 3-38.



Rys. 3-38

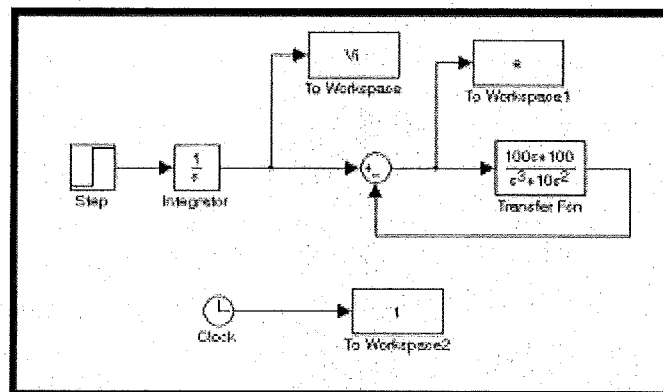
4. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 1.
5. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawień czasu symulacji zmienić czas Stop na 10.
6. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_3_7.mdl.
7. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-39.
8. Analizując wyniki z rysunku 3-39, możemy zauważyć, że uchyb ustalony e_{ss} maleje w miarę wzrostu czasu, a wartość końcowa uchybu zbliża się prawie do 0.



Rys. 3-39

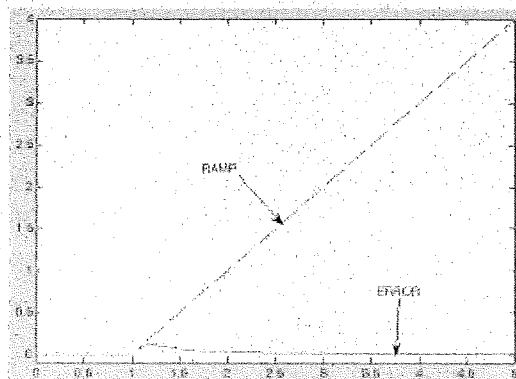
C-2. Sygnał narastający liniowo na wejściu (Ramp): Do wytworzenia sygnału narastającego liniowo wykorzystać sygnał skoku jednostkowego podany na układ integratora (a/s).

1. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 3-40.



Rys. 3-40

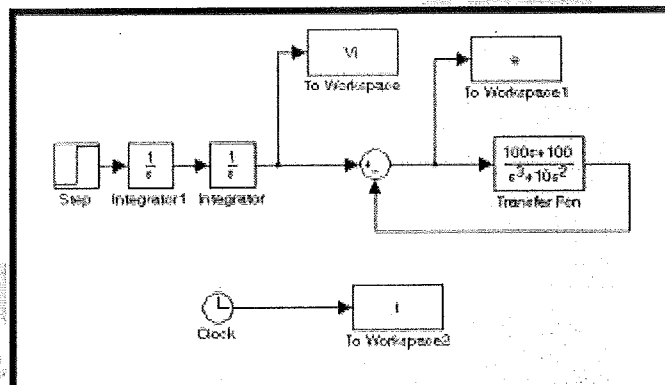
2. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 1.
3. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 5.
4. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_3_8.mdl.
5. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-41.
6. Analizując wyniki z rysunku 3-41, możemy zauważyć, że uchyb ustalony e_{ss} maleje w miarę wzrostu czasu, a wartość końcowa uchybu zbliża się prawie do 0.



Rys. 3-41

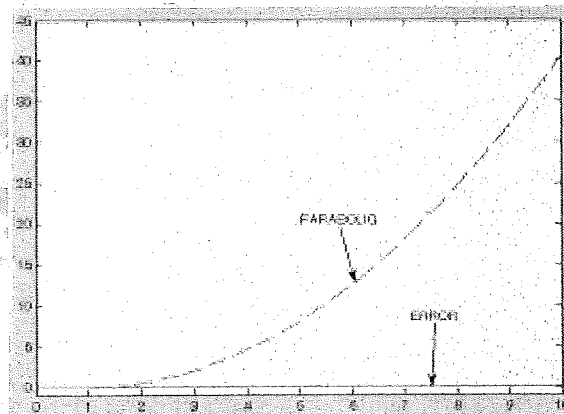
C-3. Sygnał narastający wykładniczo na wejściu (Parabolic): Do wytworzenia sygnału narastającego wykładniczo wykorzystać sygnał skoku jednostkowego podany na wejście połączonych szeregowo dwóch integratorów (a/s^2).

1. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 3-42.



Rys. 3-42

2. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 1.
3. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 10.
4. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_3_9.mdl.
5. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 3-43.
6. Analizując wyniki z rysunku 3-43, możemy zauważyć, że uchyb ustalony e_{ss} maleje w miarę wzrostu czasu, a wartość końcowa uchybu zbliża się prawie do 0.



Rys. 3-43

Ćwiczenie 4 Systemy pierwszego rzędu

CEL ĆWICZEŃ

1. Poznanie i omówienie odpowiedzi impulsowej systemów pierwszego rzędu.
2. Omówienie charakterystyk systemów pierwszego rzędu.
3. Pomiarzy wzmocnienia i stałej czasowej systemów pierwszego rzędu w stanie ustalonym.

PODSTAWY TEORETYCZNE

Charakterystyki czasowe systemów sterowania dzielimy na:

1. Odpowiedź impulsową.
2. Charakterystykę w stanie ustalonym.

System pierwszego rzędu może być opisany równaniem różniczkowym pierwszego rzędu. Najprostszy system pierwszego rzędu opisuje poniższe równanie:

$$\frac{dc(t)}{dt} + ac(t) = br(t) \quad (1)$$

gdzie a i b są stałymi równania. Równanie różniczkowe pierwszego rzędu jest podobne do obwodu elektrycznego RL. Przekształcając równanie do dziedziny Laplace'a, otrzymujemy

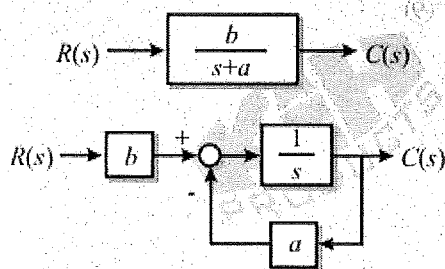
$$sC(s) - c(0) + aC(s) = bR(s)$$

$$C(s) = \frac{b}{s+a} R(s) + \frac{c(0)}{s+a}$$

gdzie wyrażenie $[b/(s+a)]R(s)$ jest nazywane składową stanu zerowego, która jest odpowiedzią systemu dla wartości początkowej 0 ($c(0)=0$), natomiast wyrażenie $c(0)/(s+a)$ jest składową odpowiedzi systemu na wartość początkową $c(0)$ przy braku sygnału wejściowego. W tej sytuacji funkcja przejściowa dla równania (1) ma postać:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b}{s+a}$$

Schemat blokowy układu realizującego tę funkcję pokazano na rysunku 4-1.



Rys. 4-1 Schemat blokowy systemu pierwszego rzędu

Typowym systemem pierwszego rzędu jest serwośilnik dc z magnesami stałymi (PM). Jeżeli napięcie na uzwojeniu stojana serwośilnika dc PM wynosi V_a , to zależność między prędkością obrotową silnika ω , a tym napięciem można zapisać w postaci:

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{b}{s+a}$$

Gdy sygnał wejściowy systemu pierwszego rzędu jest skokiem jednostkowym $r(t)=Au_s(t)$, to

$$R(s) = \frac{A}{s}$$

Jeżeli wartość początkowa sygnału wynosi 0, to sygnał wyjściowy będzie wynosił:

$$C(s) = G(s)R(s) = \frac{bA}{s(s+a)} = \frac{bA/a}{s} - \frac{bA/a}{s+a}$$

$$c(t) = \left(\frac{bA}{a} - \frac{bA}{a} e^{-at} \right) u(t) = \frac{bA}{a} \left(1 - e^{-at} \right) u(t)$$

Jeżeli pierwiastek charakterystyki systemu pierwszego rzędu $s=a<0$, to taki system jest systemem stabilnym. Gdy czas t dąży do nieskończoności, to część wykładnicza charakterystyki $c(t)$ będzie równa zero.

Jeżeli pierwiastek charakterystyki $s=a>0$, to taki system jest systemem niestabilnym. Gdy czas t dąży do zera, to część wykładnicza charakterystyki $c(t)$ będzie równa nieskończoności.

W sytuacji, gdy wartość początkowa nie jest równa 0, to sygnał na wyjściu systemu będzie równy:

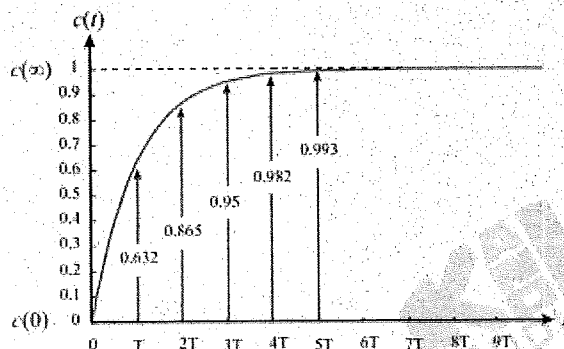
$$C(s) = G(s)R(s) + \frac{c(0)}{s+a} = \frac{bA}{s(s+a)} + \frac{c(0)}{s+a} = \frac{bA/a}{s} + \frac{c(0) - bA/a}{s+a}$$

$$\therefore c(t) = \left(\frac{bA}{a} + \left(c(0) - \frac{bA}{a} \right) e^{-at} \right) u(t)$$

Poniżej omówimy bardzo ważne pojęcie – stała czasowa T_C .

$$T_C = \frac{1}{a}$$

Staća czasowa T_C jest czasem niezbędnym, w którym część wykładnicza sygnału wyjściowego $c(t)$ systemu maleje od ke^{-at} do ke^{-t} . Jeżeli $c(\infty)-c(0)=1$ lub $c(t)-c(0)=1$ i jednocześnie $c(0)=0$, to stała czasowa T_C jest definiowana jako czas, w którym odpowiedź $c(t)$ systemu narasta od 0 do $1-1/e=0,632$, jak pokazano na rysunku 4-2.



Rys. 4-2 Definicja składowej stałej systemu pierwszego rzędu

System omówiony powyżej jest najprostszym systemem pierwszego rzędu. Rozważmy teraz skomplikowany system pierwszego rzędu:

$$\frac{dc(t)}{dt} + ac(t) = b_m \frac{d^m r(t)}{dt^m} + \dots + b_1 \frac{dr(t)}{dt} + b_0 r(t) \quad (2)$$

Funkcja przejściowa dla równania (2) może być zapisana w postaci wyrażenia:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{s + a}$$

W systemach rzeczywistych rząd licznika funkcji przejściowej rzadko jest wyższy niż mianownika, ponieważ wzmocnienie wzrasta w miarę wzrostu częstotliwości. Rząd systemu jest determinowany rzędem mianownika. Poniżej przedyskutujemy wzmocnienie w stanie ustalonym i stałą czasową systemu, w którym rząd mianownika jest równy rzędowi licznika.

Rozważmy system:

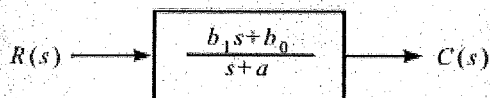
$$\frac{dc(t)}{dt} + ac(t) = b_1 \frac{dr(t)}{dt} + b_0 r(t)$$

$$C(s) = \frac{b_1 s + b_0}{s + a} R(s) + \frac{c(0) - b_1 r(0)}{s + a}$$

Funkcja przejściowa będzie miała postać:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_1 s + b_0}{s + a} = b_1 + \frac{b_0 - ab_1}{s + a}$$

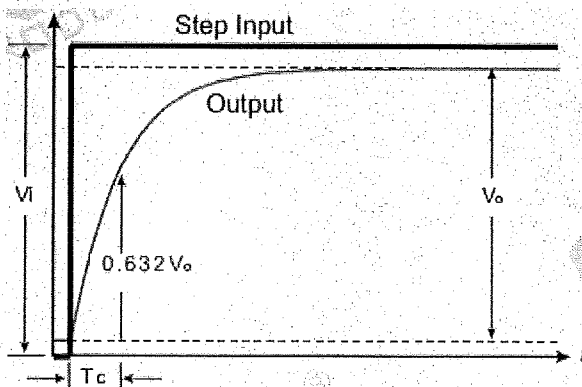
Schemat blokowy tego systemu pokazano na rysunku 4-3.



Rys. 4-3 Schemat blokowy systemu pierwszego rzędu

Dla znanego systemu z nieokreślonymi współczynnikami stała czasowa i wzmocnienie w stanie ustalonym mogą być wyznaczone z przebiegów wejściowego i wyjściowego. Przez podanie na wejście systemu pierwszego rzędu sygnału skoku jednostkowego można otrzymać współczynniki systemu.

Załóżmy, że przebieg wejściowy (*Step Input*) i wyjściowy (*Output*) systemu są takie, jak na rys. 4-4.



Rys. 4-4 Odpowiedź systemu pierwszego rzędu na pobudzenie skokiem jednostkowym

Niech $V_o/V_i=K$, to wzmocnienie K w stanie ustalonym będzie wynosiło:

$$K = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{b}{s+a} = \frac{b}{a}$$

Stałą czasową T_C można zmierzyć na rysunku 4-4, ponieważ

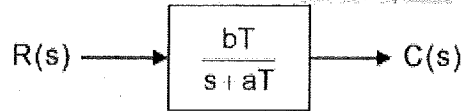
$$G(s) = \frac{K}{T_C s + 1} = \frac{b}{s+a}$$

$$\therefore T_C = \frac{1}{a}, \quad a = \frac{1}{T_C}, \quad b = \frac{K}{T_C}$$

gdzie wartości K i T_C mogą być odczytane z przebiegów – wejściowego i wyjściowego – pokazanych na rysunku 4-4, co umożliwi wyliczenie wartości współczynników a i b . Innymi słowy, parametry systemu mogą być uzyskane z pomiarów przebiegu wejściowego i wyjściowego.

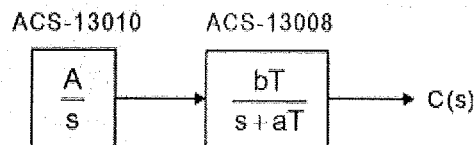
PROCEDURA

W dalszej części ćwiczenia moduł obiektu drugiego rzędu ACS-13008 będzie używany do realizacji systemu pierwszego rzędu. Schemat blokowy modułu ACS-13008 pokazano na rysunku 4-5.

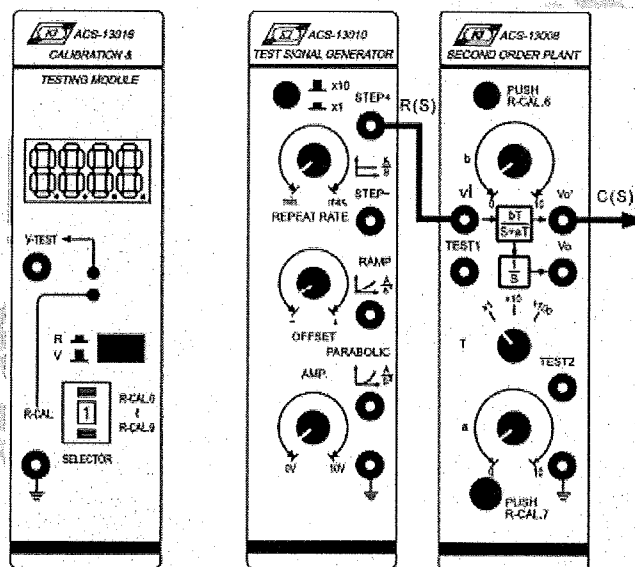


Rys. 4-5 Schemat blokowy modułu ACS-13008

Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 4-6.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 4-6

A. Wpływ współczynnika aT na system pierwszego rzędu

1. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 1Hz.
2. W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, a stałe a i b ustawić na 10. W takiej sytuacji funkcja przejściowa modułu ACS-13008 wyrażana jest zależnością:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{100}{s + 100}$$

Wzmocnienie w stanie ustalonym K i stała czasowa T_C wyrażone są zależnościami:

$$G(s) = \frac{K}{T_C s + 1} = \frac{bT}{s + aT}$$

gdzie $K = \frac{bT}{aT}$ i $T_C = \frac{1}{aT}$

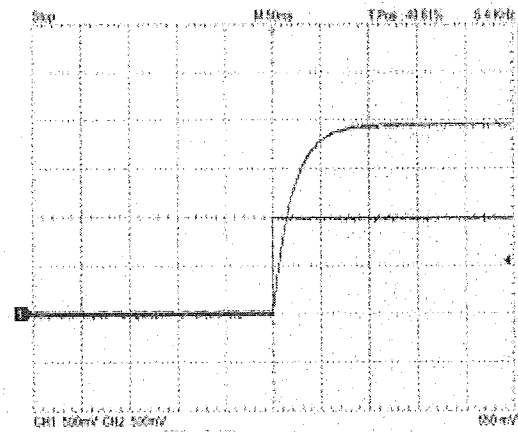
3. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o' modułu ACS-13008, które pokazano na rysunku 4-7. Wzmocnienie w stanie

ustalonym $K = \frac{bT}{aT} = 1$ i stała czasowa $T_C = \frac{1}{aT} = 0,01$.



$aT=100, bT=100, K=1, T_C=0,01$

Rys. 4-7



$aT=50, bT=100, K=2, T_C=0,02$

Rys. 4-8

4. W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, a stałą a ustawić na 5. W takiej sytuacji funkcja przejściowa modułu ACS-13008 wyrażana jest zależnością:

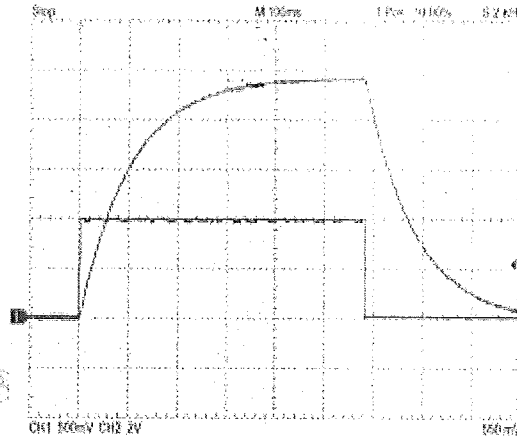
$$\frac{V_o'(s)}{V_i(s)} = \frac{100}{s + 50}$$

5. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o' modułu ACS-13008, które pokazano na rysunku 4-8. Porównać wyniki z rysunków 4-7 i 4-8 pod kątem szybkości narastania odpowiedzi. Charakterystyka odpowiedzi z rysunku 4-7 szybko narasta, natomiast na rysunku 4-8 przekracza wartość wejściową, po-

nieważ maksymalne wzmocnienie w stanie ustalonym $K = \frac{bT}{aT} = 2$.

6. W module ACS-13008 ustawić stałą a na 1 (aby zwiększyć wzmocnienie systemu), nie zmieniając wartości stałej b . Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o' modułu ACS-13008, które pokazano na rysunku 4-9.

Wzmocnienie w stanie ustalonym $K = \frac{bT}{aT} = 10$ i stała czasowa $T_C = \frac{1}{aT} = 0,1$. Porównać uzyskany wynik z rysunkami 4-7 i 4-8 pod kątem szybkości narastania odpowiedzi.



$$aT=10, bT=100, K=10, T_c=0,1$$

Rys. 4-9

B. Wpływ współczynnika bT na system pierwszego rzędu

1. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 1Hz.
2. W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, a stałe a i b ustawić na 10. W takiej sytuacji funkcja przejściowa modułu ACS-13008 wyrażana jest zależnością:

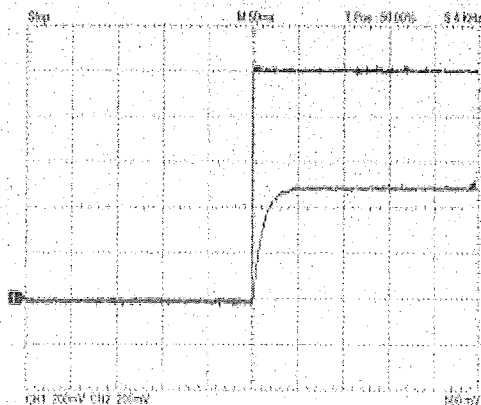
$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{100}{s+100} = \frac{bT}{s+aT}$$

3. W module ACS-13008 zmienić stałą b na 5, nie zmieniając stałej a. Funkcja przejściowa modułu ACS-13008 będzie teraz równa:

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{50}{s+100}$$

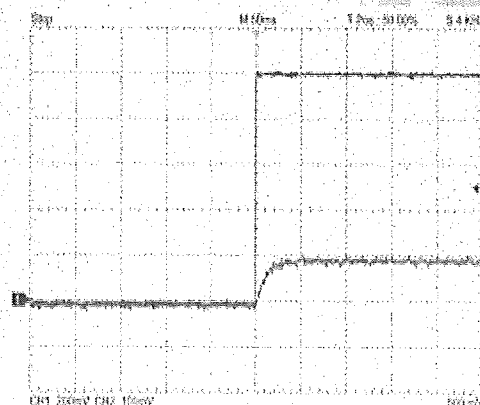
4. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o modułu ACS-13008, które pokazano na rysunku 4-10. Wzmocnienie w stanie

$$\text{ustalonym } K = \frac{bT}{aT} = 0,5 \text{ i stała czasowa } T_c = \frac{1}{aT} = 0,01.$$



$$aT=100, bT=50, K=0,5, T_c=0,01$$

Rys. 4-10



$$aT=100, bT=10, K=0,1, T_c=0,01$$

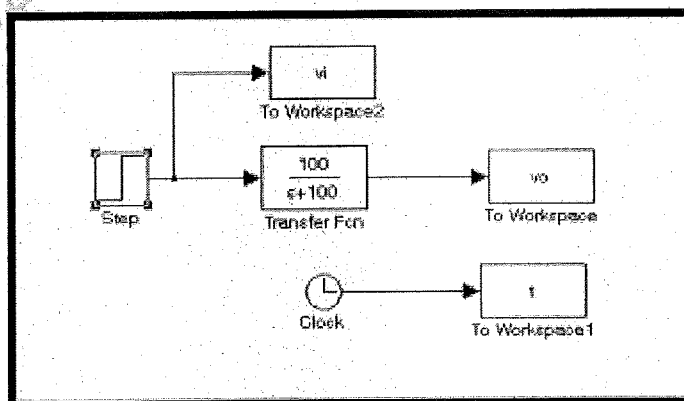
Rys. 4-11

5. W module ACS-13008 zmienić stałą b na 1, nie zmieniając stałej a , wtedy wzmacnienie

$K = \frac{bT}{aT} = 0,1$ i stała czasowa $T_c = \frac{1}{aT} = 0,01$. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o modułu ACS-13008, które pokazano na rysunku 4-11. Porównać uzyskany wynik z wynikami z rysunków 4-7 i 4-10 pod kątem szybkości narastania odpowiedzi.

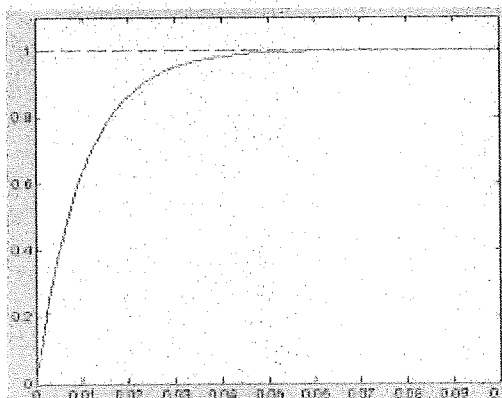
SYMULACJA SIMULINK

1. Otworzyć okno poleceń programu MATLAB.
2. W oknie poleceń MATLAB wpisać simulink < ↵ >.
3. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 4-12.



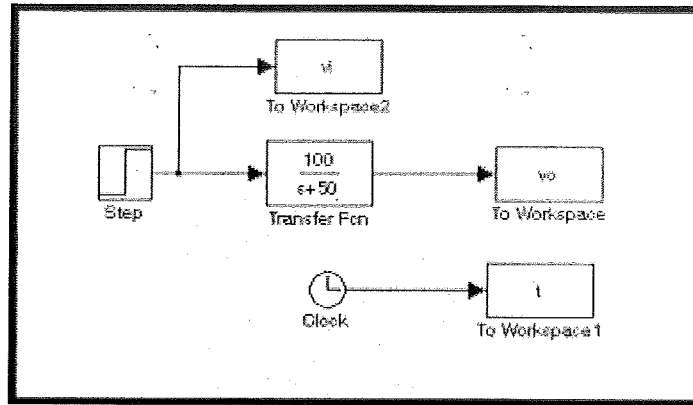
Rys. 4-12

4. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 0.
5. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 0.1.
6. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_4_1.mdl.
7. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 4-13.



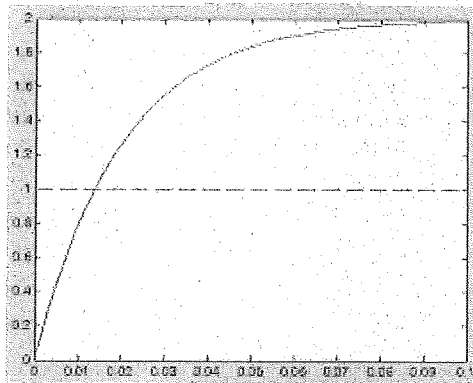
Rys. 4-13

8. Zmodyfikować wartość parametru aT funkcji przejściowej Fcn na 50, jak na rysunku 4-14.

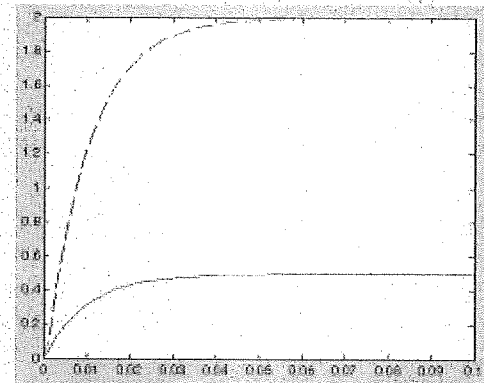


Rys. 4-14

9. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_4_2.mdl.
10. Uruchomić symulację i uzyskać wynik jak na rysunku 4-15(a).
11. Zmodyfikować wartość parametrów bT i aT funkcji przejściowej Fcn odpowiednio na 50 i 100. Uruchomić symulację i uzyskać wynik jak na rysunku 4-15(b).



(a) $aT=50$, $bT=100$



(b) $aT=100$, $bT=50$

Rys. 4-15

Ćwiczenie 5 Systemy drugiego rzędu

CEL ĆWICZEŃ

1. Poznanie i omówienie charakterystyk systemów drugiego rzędu.
2. Obserwacja wpływu współczynnika tłumienia ζ w systemach drugiego rzędu.
3. Obserwacja wpływu częstotliwości drgań własnych ω_n w systemach drugiego rzędu.

PODSTAWY TEORETYCZNE

System drugiego rzędu może być opisany równaniem różniczkowym drugiego rzędu w postaci ogólnej:

$$\frac{d^2 c(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dc(t)}{dt} + a_0 c(t) = b_n \frac{d^n r(t)}{dt^n} + \dots + b_1 \frac{dr(t)}{dt} + b_0 r(t)$$

A po przekształceniu w dziedzinę Laplace'a

$$C(s) = \frac{b_n s^n + \dots + b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} R(s) + \frac{K(s)}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (1)$$

Pierwszym członem funkcji $C(s)$ jest składowa stanu zerowego, która jest odpowiedzią systemu na wartość początkową 0 ($c(0)=0$). Drugim członem równania jest składowa odpowiedzi systemu na wartość początkową $c(0)$ przy braku sygnału wejściowego. $K(s)$ jest wielomianem powiązany z wartością początkową.

W przypadku gdy wartość początkowa jest równa 0, funkcja przejściowa dla równania (1) ma postać:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_n s^n + \dots + b_1 s + b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}$$

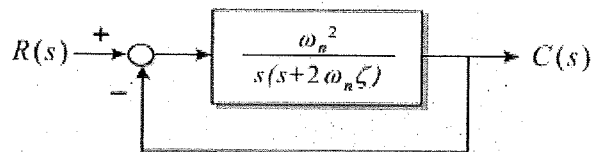
W poniższym ćwiczeniu omówimy prosty system drugiego rzędu. Funkcja przejściowa prostego systemu drugiego rzędu jest opisywana wyrażeniem:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (2)$$

Równanie (2) opisuje najprostszy system drugiego rzędu. Na podstawie tego równania trudno jest zrozumieć wpływ współczynników b_0 , a_0 i a_1 na pracę systemu lub jego charakterystykę czasową. Dla wygody w celach analitycznych równanie systemu drugiego rzędu najczęściej zapisywane jest w postaci:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Jeżeli częstotliwość drgań własnych ω_n i współczynnik tłumienia ζ są znane, zatem charakterystyka systemu drugiego rzędu może być łatwo uzyskana. Schemat blokowy systemu drugiego rzędu pokazano na rysunku 5-1.



Rys. 5-1 Schemat blokowy systemu drugiego rzędu

Funkcja przejściowa takiego systemu może być zapisana w postaci:

$$\frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} = \frac{\frac{\omega_n^2}{s(s + 2\omega_n\zeta)}}{1 + \frac{\omega_n^2}{s(s + 2\omega_n\zeta)}}$$

Dynamiczną pracę systemu drugiego rzędu można opisać, używając zmiennych ζ i ω_n . Poniżej przedyskutujemy odpowiedź systemu drugiego rzędu na pobudzenie skokiem jednostkowym.

1. Przypadek niedotłumienia systemu: $0 < \zeta < 1$

Przekształcając zależność $C(s)/R(s)$, otrzymujemy

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{(s + \zeta\omega_n + j\omega_d)(s + \zeta\omega_n - j\omega_d)}$$

gdzie $\omega_d = \omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}$ jest nazywana tłumioną częstotliwością własną.

Dla skoku jednostkowego $u_s(t)$ na wejściu,

$$C(s) = \frac{1}{s} \frac{\omega_n^2}{(s + \zeta\omega_n + j\omega_d)(s + \zeta\omega_n - j\omega_d)} = \frac{1}{s} - \frac{s + \zeta\omega_n}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} - \frac{\zeta\omega_n}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2}$$

Wykorzystując odwrotną transformatę funkcji $C(s)$, otrzymujemy:

$$c(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left(\cos\omega_d t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin\omega_d t \right)$$

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin\left(\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}\right)$$

Z powyższego równania widzimy, że system drugiego rzędu będzie oscylował z częstotliwością ω_d .

2. Przypadek tłumienia krytycznego systemu: $\zeta = 1$

Przekształcając zależność $C(s)/R(s)$, otrzymujemy

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{(s + \omega_n)^2}$$

Dla skoku jednostkowego $u_s(t)$ na wejściu,

$$C(s) = \frac{1}{s} \frac{\omega_n^2}{(s + \omega_n)^2}$$

$$C(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \omega_n} - \frac{\omega_n}{(s + \omega_n)^2}$$

Wykorzystując odwrotną transformatę funkcji $C(s)$, otrzymujemy:

$$c(t) = 1 - e^{-\zeta\omega_n t} (1 + \omega_n t)$$

3. Przypadek przetłumienia systemu:

(1) $\zeta > 1$

Dla skoku jednostkowego $u_s(t)$ na wejściu,

$$C(s) = \frac{1}{s} \frac{\omega_n^2}{(s + \zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})(s + \zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1})}$$

Wykorzystując odwrotną transformatę funkcji $C(s)$, otrzymujemy:

$$c(t) = 1 + \frac{1}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})} e^{-(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t}$$

$$- \frac{1}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})} e^{-(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n t} = 1 + \frac{\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \left(\frac{e^{-p_1 t}}{p_1} - \frac{e^{-p_2 t}}{p_2} \right)$$

$$p_1 = (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$$

$$p_2 = (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$$

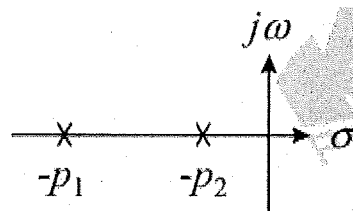
(2) $\zeta \gg 1$

$$p_1 = (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$$

$$\therefore p_2 = (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n$$

$$\therefore |p_1| \gg |p_2|$$

Ponieważ współczynnik zaniku $e^{-p_1 t}$ jest znacznie większy niż współczynnik $e^{-p_2 t}$, to człon $e^{-p_1 t}$ jest nieistotny. Innymi słowy, gdy p_1 i p_2 położone są daleko od siebie i $-p_2$ jest znacznie bliższe osi $j\omega$ (patrz rysunek 5-2), to człon $e^{-p_1 t}$ może być pominięty.



Rys. 5-2 Wykres biegunów

W konsekwencji równanie matematyczne można zapisać w postaci:

$$\frac{C(s)}{R(s)} \approx \frac{\zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}}{s + \zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}} = \frac{p_2}{s + p_2}$$

Z drugiej strony, gdy p_1 i p_2 systemu drugiego rzędu położone są w znacznej odległości od siebie, to system drugiego rzędu może być aproksymowany systemem pierwszego rzędu.

4. Przypadek braku tłumienia: $\zeta = 0$

Przekształcając zależność $C(s)/R(s)$, otrzymujemy

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{(s + j\omega_n)(s - j\omega_n)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + \omega_n^2}$$

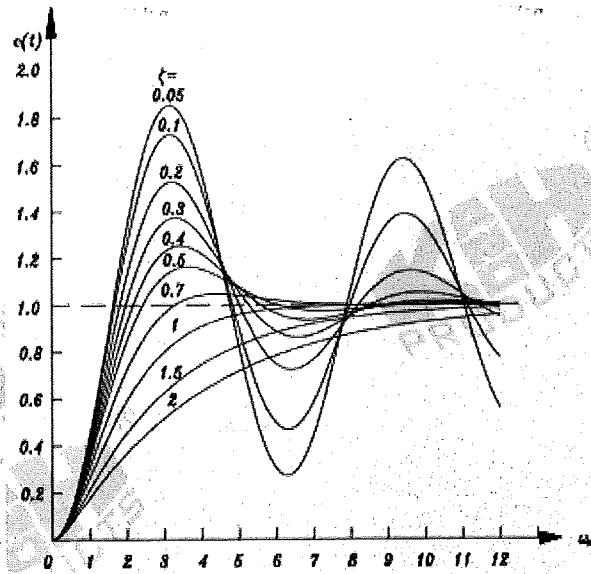
Dla skoku jednostkowego $u_s(t)$ na wejściu,

$$C(s) = \frac{1}{s} \frac{\omega_n^2}{s^2 + \omega_n^2} = \frac{1}{s} - \frac{s}{s^2 + \omega_n^2}$$

Wykorzystując odwrotną transformatę funkcji $C(s)$, otrzymujemy:

$$c(t) = 1 - \cos\omega_n t$$

Rysunek 5-3 przedstawia krzywe odpowiedzi na skok jednostkowy przy różnych wartościach ζ .



Rys. 5-3 Odpowiedź systemu drugiego rzędu na pobudzenie skokiem jednostkowym

Powyżej omówiono podstawowe charakterystyki systemu drugiego rzędu. W dalszej części przedyskutujemy pozostałe charakterystyki takiego systemu.

Dla skoku jednostkowego $u_s(t)$ na wejściu

$$C(s) = \frac{1}{s} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\left(\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right)$$

Różniczkując funkcję $c(t)$, otrzymujemy

$$\begin{aligned} \frac{dc(t)}{dt} &= -\frac{\zeta\omega_n e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\left(\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) \\ &\quad + \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \cos\left(\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) \end{aligned}$$

$$\therefore \frac{dc(t)}{dt} = \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t$$

Niech $dc(t)/dt=0$, wtedy

$$t = \frac{n\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Gdy $t = n\pi / \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$, $C(t)$ osiąga lokalne minimum lub lokalne maksimum,

$$\begin{aligned} c(t) \Big|_{\min \text{ lub maks}} &= 1 + \frac{e^{-n\pi\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin\left(n\pi - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) \\ &= 1 + (-1)^{n-1} e^{-n\pi\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} \quad n = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

Maksymalny przerost sygnału pojawia się w czasie

$$t_{\max} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

Konsekwentnie maksymalny przerost $C_{\max} - 1 = e^{-\pi\zeta / \sqrt{1 - \zeta^2}}$. Wielkość maksymalnego przerostu zależy tylko od wartości ζ i jest niezależna od ω_n . Inaczej mówiąc, maksymalnej wartości przerostu odpowiada konkretna wartość ζ .

$$t \Big|_{\max \text{ lub min}} = \frac{n\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Zwiększanie ω_n przy ustalonej wartości ζ powoduje zwiększenie szybkości odpowiedzi i skraca czas, w którym wyjście osiąga lokalne maksimum lub minimum.

Przedyskutujemy teraz, jak znaleźć parametry systemu na podstawie sygnału wyjściowego. Rozważmy znany system drugiego rzędu o funkcji przejściowej:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{B}{s^2 + As + B}$$

Gdzie A i B są współczynnikami nieokreślonymi.

Przy skoku jednostkowym na wejściu, jeżeli sygnał wyjściowy $c(t)$ osiąga przerost, to współczynniki A i B można znaleźć na podstawie charakterystyki wyjściowej $c(t)$, postępując jak niżej:

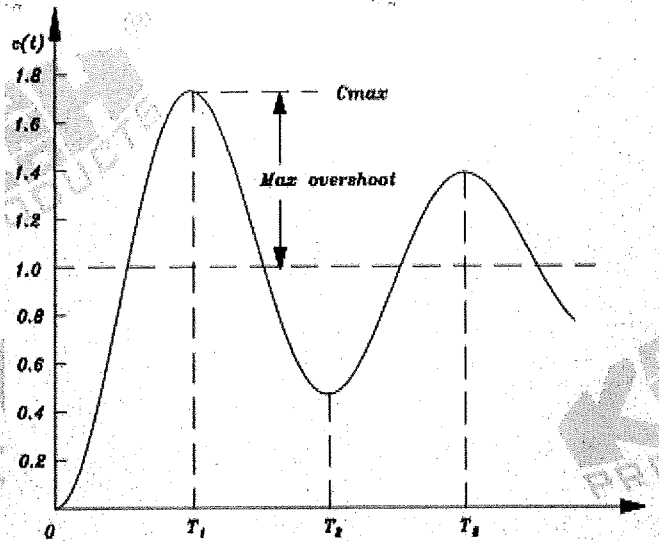
W pierwszej kolejności porównujemy dwa systemy

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{B}{s^2 + As + B} \quad \text{i} \quad \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Stąd możemy wyznaczyć wartości A i B

$$\begin{aligned} A &= 2\zeta\omega_n \\ B &= \omega_n^2 \end{aligned}$$

Rysunek 5-4 przedstawia krzywą odpowiedzi systemu drugiego rzędu.



Rys. 5-4 Odpowiedź systemu drugiego rzędu

Wartości C_{max} , T_1 i T_2 można zmierzyć na krzywej wyjściowej $c(t)$, a współczynnik ζ można wyznaczyć z poniższych równań.

$$C_{max} - 1 = e^{-\pi\zeta / \sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$\frac{-\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} = \ln(C_{max} - 1)$$

$$\pi^2 \zeta^2 = [\ln(C_{max} - 1)]^2 - [\ln(C_{max} - 1)]^2 \zeta^2$$

$$\zeta^2 = \frac{[\ln(C_{max} - 1)]^2}{\pi^2 + [\ln(C_{max} - 1)]^2}$$

$$\because \zeta \geq 0$$

$$\therefore \zeta = \sqrt{\frac{[\ln(C_{max} - 1)]^2}{\pi^2 + [\ln(C_{max} - 1)]^2}}$$

Wartości t_{max} i ω_n można wyznaczyć z poniższych równań:

$$\therefore t_{max} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} = T_1$$

$$\therefore \omega_n = \frac{\pi}{t_{max} \sqrt{1-\zeta^2}}$$

Mając wartości t_{max} i ω_n w ostatnim kroku można wyliczyć współczynniki A i B z zależności:

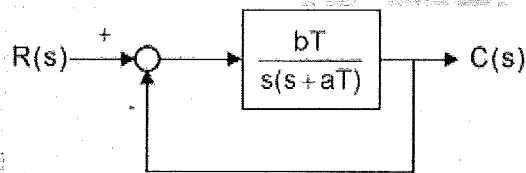
$$A = 2\zeta\omega_n$$

$$B = \omega_n^2$$

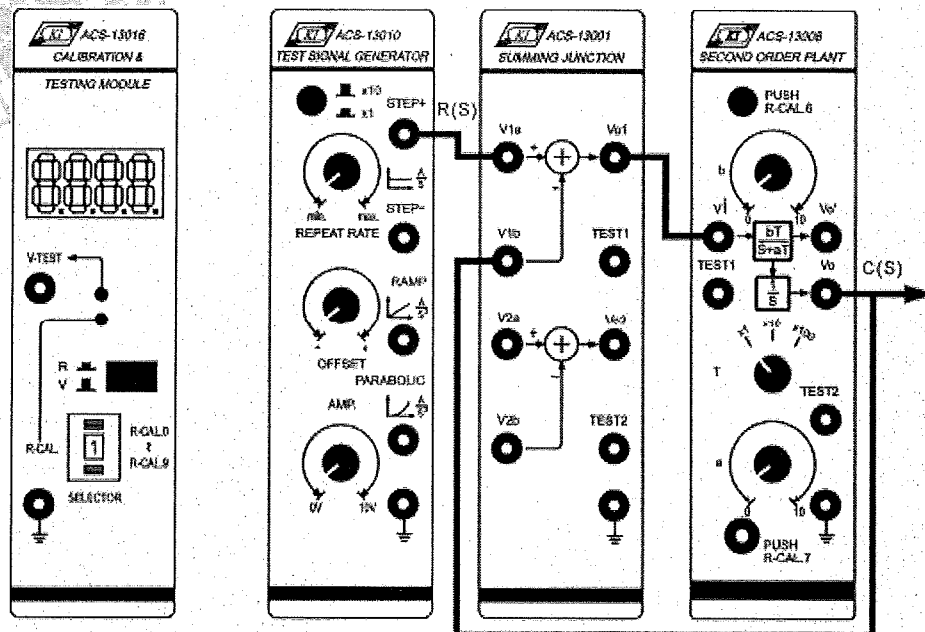
PROCEDURA

A. Wpływ współczynnika tłumienia ζ na system drugiego rzędu

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 5-5.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

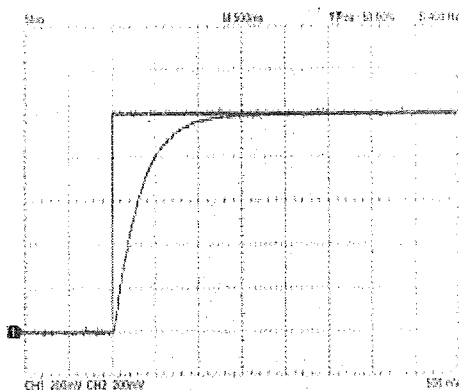
Rys. 5-5

2. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,1Hz.
3. Ponieważ $bT = \omega_n^2$ i $aT = 2\omega_n \zeta$, to ustalona wartość bT jest równoważna ustalonej wartości ω_n . W przypadku stałej wartości bT zmiana wartości AT jest równoważna zmianie wartości ζ . W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, a stałą b ustawić na 10 ($\omega_n=10$), wtedy funkcja przejściowa systemu opisana jest zależnością:

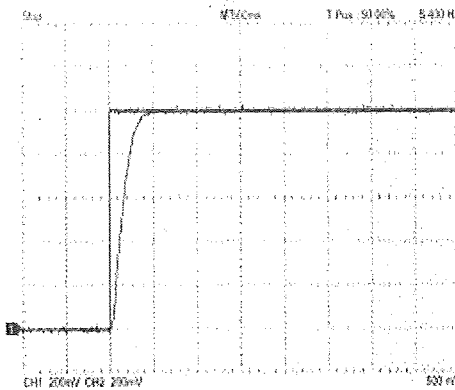
$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{100}{s^2 + aTs + 100}$$

4. Ponieważ $\omega_n = 10$, $T = 10$ i $aT = 2\omega_n \zeta$, to $a = 2\zeta$. Pozostawiając b i T bez zmian, w module ACS-13008 ustawić $a=4$ ($\zeta=2$). Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_0 modułu ACS-13008, które pokazano na rys. 5-6(a).

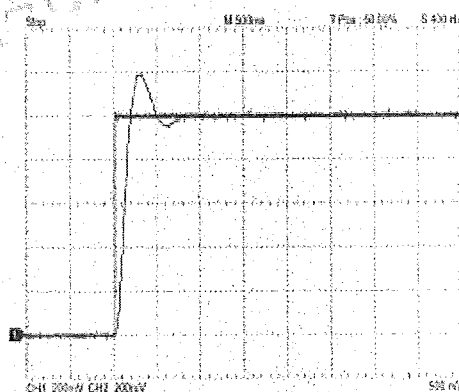
5. Powtórzyć punkt 4 dla $a = 2, 1.0, 0$ (ζ odpowiednio równe 1, 0.5, 0) i zarejestrować wyniki, pokazane na rysunkach 5-6(b) do 5-6(d).



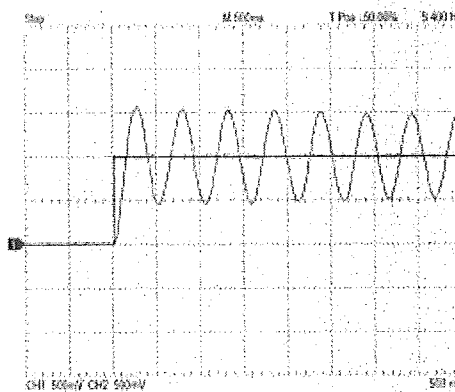
(a) odpowiedź $100/(s^2+40s+100)$, $\zeta=2$
przypadek przetłumienia systemu



(b) odpowiedź $100/(s^2+20s+100)$, $\zeta=1$
przypadek tłumienia krytycznego systemu



(c) odpowiedź $100/(s^2+10s+100)$, $\zeta=0,5$
przypadek niedotłumienia

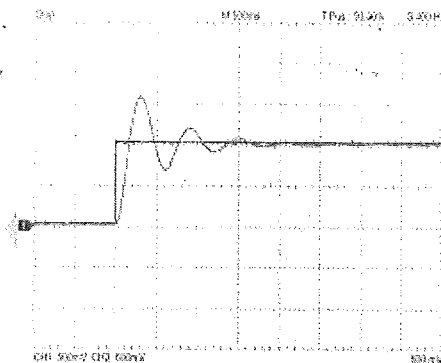
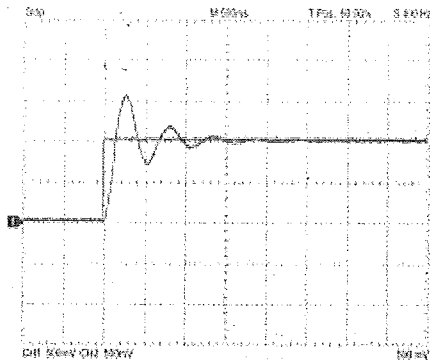


(d) odpowiedź $100/(s^2+100)$, $\zeta=0$
przypadek braku tłumienia

Rys. 5-6

B. Wpływ częstotliwości własnej ω_n na system drugiego rzędu

1. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,1Hz.
2. Ponieważ $bT = \omega_n^2$ i $aT = 2\omega_n \zeta$, to a i b będą się zmieniać przy zmianach częstotliwości własnej ω_n systemu. W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, stałą b ustawić na 10 ($\omega_n=10$), a stałą a – na 0,4 ($\zeta=0,2$). Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o modułu ACS-13008, które pokazano na rys. 5-7(a).

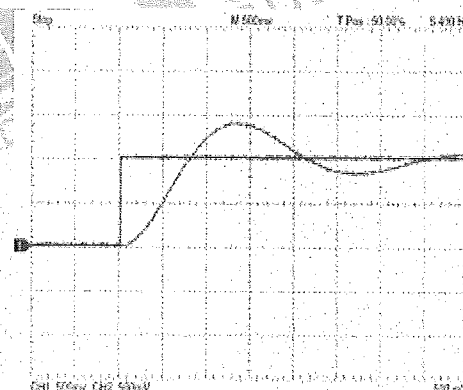
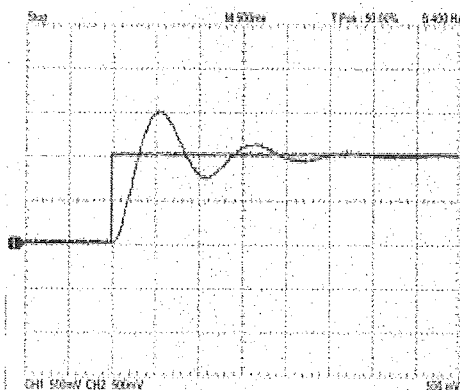


(a) odpowiedź $\frac{100}{s^2 + 4s + 100}$, $\omega_n = 10$
 $\zeta = 0,2$, $aT = 4$, $bT = 100$

(b) odpowiedź $\frac{64}{s^2 + 3,2s + 64}$, $\omega_n = 8$
 $\zeta = 0,2$, $aT = 3,2$, $bT = 64$

Rys. 5-7

3. Powtórzyć punkt 2 dla $a=0,32$ i $b=6,4$ ($\zeta=0,2$, $\omega_n=8$) i zarejestrować wyniki, które pokazano na rysunku 5-7(b).
4. Powtórzyć punkt 2 dla $a=0,2$ i $b=2,5$ ($\zeta=0,2$, $\omega_n=5$) i zarejestrować wyniki, które pokazano na rysunku 5-8(a).
5. Powtórzyć punkt 2 dla $a=0,16$ i $b=1,6$ ($\zeta=0,2$, $\omega_n=4$) i zarejestrować wyniki, które pokazano na rysunku 5-8(b).



(a) odpowiedź $\frac{25}{s^2 + 2s + 25}$, $\omega_n = 5$
 $\zeta = 0,2$, $aT = 2$, $bT = 25$

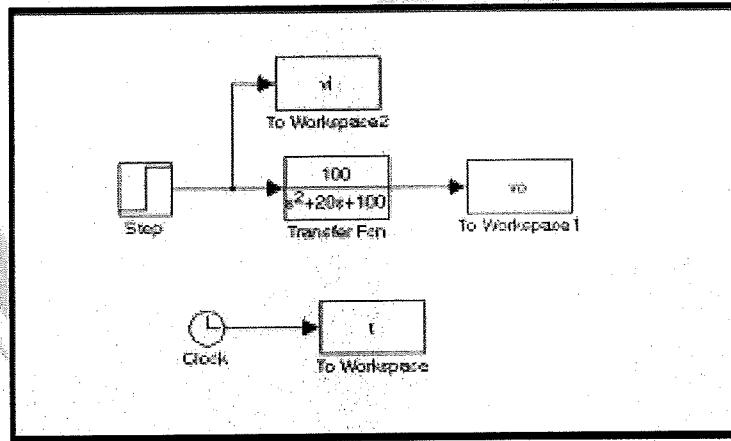
(b) odpowiedź $\frac{4}{s^2 + 0,8s + 4}$, $\omega_n = 2$
 $\zeta = 0,2$, $aT = 0,8$, $bT = 4$

Rys. 5-8

- C. W module ACS-13008 ustawić dowolne wartości a , b i T i znaleźć wartość tłumienia ζ oraz częstotliwość oscylacji własnej ω_n systemu na podstawie pomiarów krzywej wyjściowej.

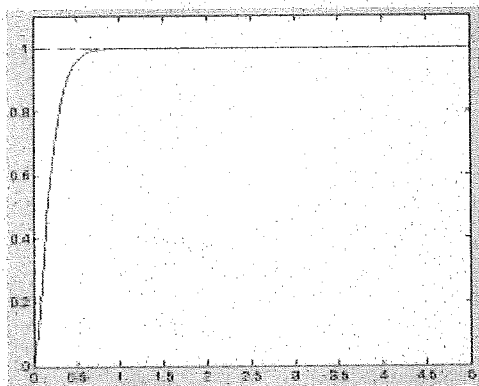
SYMULACJA SIMULINK

1. Otworzyć okno poleceń programu MATLAB.
2. W oknie poleceń MATLAB wpisać simulink < ↵ >.
3. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 5-9.

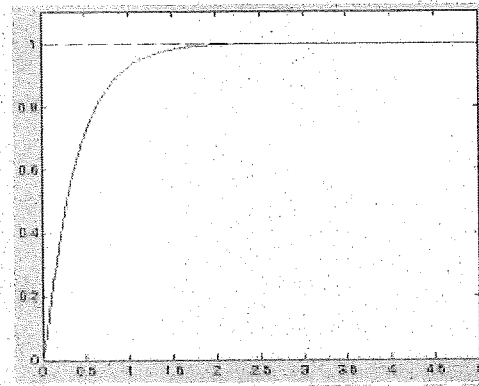


Rys. 5-9

4. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 0.
5. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 0.5.
6. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_5_1.mdl.
7. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 5-10(a).



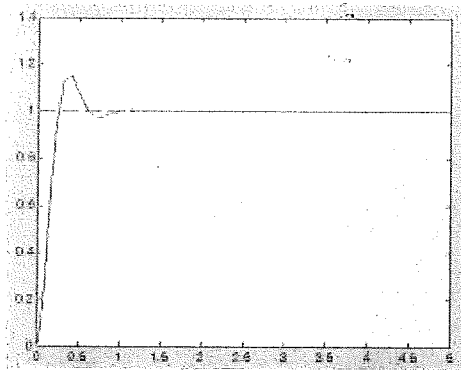
(a) odpowiedź $100/(s^2+20s+100)$, $\zeta=1$



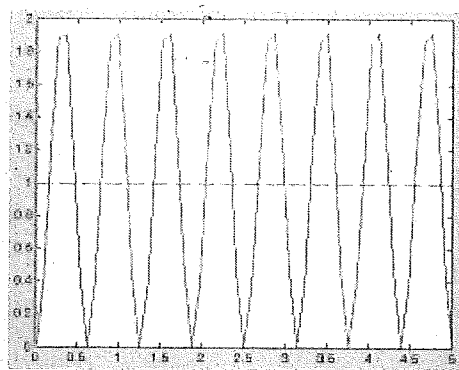
(b) odpowiedź $100/(s^2+40s+100)$, $\zeta=2$

Rys. 5-10

8. Zmodyfikować współczynniki mianownika funkcji przejściowej Fcn na [1 40 100]. W takim przypadku $aT=40$, $bT=100$, $\omega_n=10$ i $\zeta=2$. Wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 5-10(b).
9. Zmodyfikować współczynniki mianownika funkcji przejściowej Fcn na [1 10 100]. W takim przypadku $aT=10$, $bT=100$, $\omega_n=10$ i $\zeta=0,5$. Wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rysunku 5-11(a).



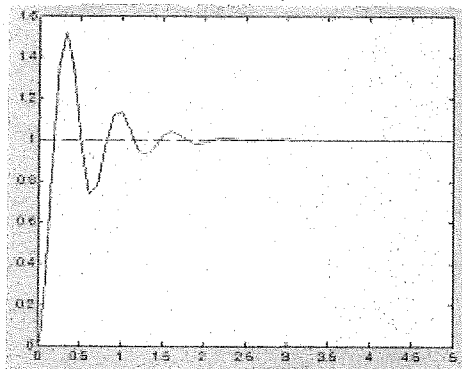
(a) odpowiedź $100/(s^2+10s+100)$, $\zeta=0,5$



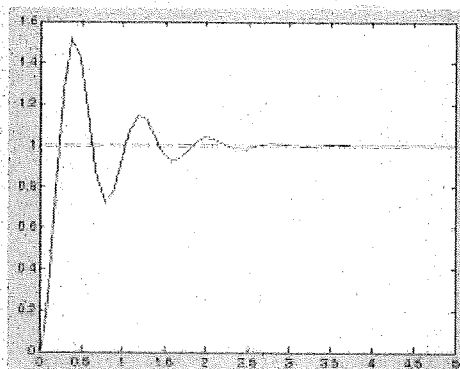
(b) odpowiedź $100/(s^2+100)$, $\zeta=0$

Rys. 5-11

10. Zmodyfikować współczynniki mianownika funkcji przejściowej F_{cn} na [1 0 100]. W takim przypadku $aT=0$, $bT=100$, $\omega_n=10$ i $\zeta=0$. Wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 5-11(b).
11. Zmodyfikować współczynniki mianownika funkcji przejściowej F_{cn} na [1 4 100]. W takim przypadku $aT=4$, $bT=100$, $\omega_n=10$ i $\zeta=0,2$. Wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 5-12(a).



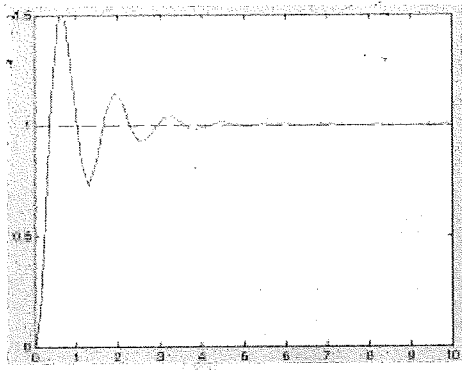
(a) odpowiedź $100/(s^2+4s+100)$, $\omega_n=10$



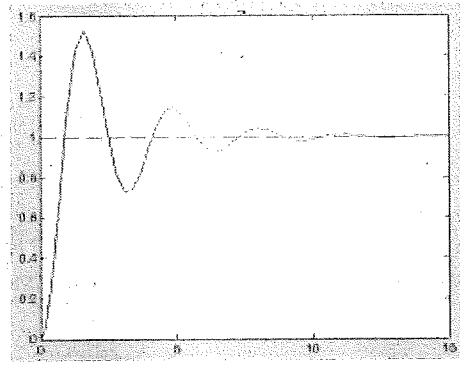
(b) odpowiedź $100/(s^2+3,2s+64)$, $\omega_n=8$

Rys. 5-12

12. Zmodyfikować współczynniki mianownika funkcji przejściowej F_{cn} na [1 3,2 64]. W takim przypadku $aT=3,2$, $bT=64$, $\omega_n=8$ i $\zeta=0,2$. Wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 5-12(b).
13. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawień czasu symulacji zmienić czas Stop na 10.0.
14. Zmodyfikować współczynniki mianownika funkcji przejściowej F_{cn} na [1 2 25]. W takim przypadku $aT=2$, $bT=25$, $\omega_n=5$ i $\zeta=0,2$. Wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 5-13(a).
15. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawień czasu symulacji zmienić czas Stop na 15.0.
16. Zmodyfikować współczynniki mianownika funkcji przejściowej F_{cn} na [1 0,8 4]. W takim przypadku $aT=0,8$, $bT=4$, $\omega_n=2$ i $\zeta=0,2$. Wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 5-13(b).



(a) odpowiedź $25/(s^2+2s+25)$, $\omega_n=5$



(b) odpowiedź $4/(s^2+0,8s+4)$, $\omega_n=2$

Rys. 5-13

Ćwiczenie 6 Charakterystyki systemów w stanie nieustalonym

CEL ĆWICZEŃ

1. Poznanie istotnych parametrów odpowiedzi systemów w stanie nieustalonym.
2. Pomiary istotnych parametrów odpowiedzi systemów w stanie nieustalonym.

PODSTAWY TEORETYCZNE

W poprzednich ćwiczeniach omówiono odpowiedzi w stanach nieustalonych i ustalonych systemów pierwszego i drugiego rzędu. W poniższym ćwiczeniu zostaną omówione najistotniejsze z punktu widzenia ewaluacji jakości działania parametry charakterystyk systemów w stanie nieustalonym.

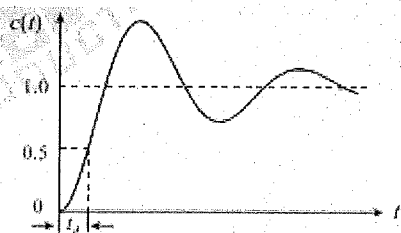
W rzeczywistych systemach elektronicznych istnieją elementy gromadzące energię, dlatego wyjście nie może reagować natychmiast na zmiany sygnału wejściowego lub inaczej powodują stany nieustalone na wyjściu. W czasie projektowania systemów sterowania konstruktorzy starają się, aby odpowiedź systemu była jak najszybsza z bardzo małym błędem lub była w ogóle pozbawiona błędów. Dla potrzeb ewaluacji działania systemów pewne parametry systemu muszą być zdefiniowane i używane jako podstawowe standardy jakości systemu.

Zasadniczo parametry systemu są definiowane za pomocą odpowiedzi systemu na pobudzenie skokiem jednostkowym. Ponieważ odpowiedź układu na skok jednostkowy na wejściu zależy od warunków początkowych, to należy zdefiniować standardową wartość początkową. Standardową wartością początkową jest taka wartość, przy której sygnał wyjściowy i jego część różniczkowa są równe 0. W przypadku standardowych warunków początkowych i obecności skoku jednostkowego na wejściu, to parametry systemu mogą być zdefiniowane na podstawie jego odpowiedzi wyjściowej. Do najczęściej używanych parametrów ewaluacji systemu należą:

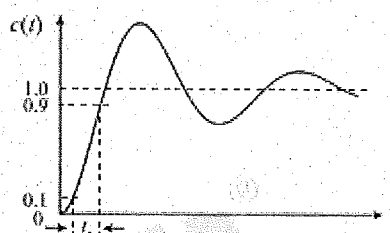
1. Czas opóźnienia t_d
2. Czas narastania t_r
3. Czas szczytu t_p
4. Procentowy przerost maksymalny $M_p\%$
5. Czas ustalania t_s

Jeżeli sygnał wyjściowy systemu oznaczymy jako $c(t)$, to wymienione parametry definiowane są jak niżej:

1. t_d – czas opóźnienia
Czas opóźnienia t_d jest definiowany jako czas, w którym sygnał wyjściowy $c(t)$ narasta od wartości początkowej $c(0)$ do wartości $c(\infty)/2$, jak pokazano na rysunku 6-1.
2. t_r – czas narastania
Czas narastania t_r jest definiowany jako czas, w którym sygnał wyjściowy $c(t)$ narasta od 10% do 90% wartości końcowej $c(\infty)$, jak pokazano na rysunku 6-2.



Rys. 6-1 Czas opóźnienia t_d



Rys. 6-2 Czas narastania t_r

3. t_p – czas szczytu

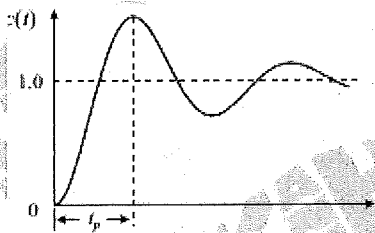
Czas szczytu t_p jest definiowany jako czas, w którym sygnał wyjściowy $c(t)$ narasta od wartości początkowej $c(0)$ do wartości szczytowej C_{\max} , jak pokazano na rysunku 6-3.

4. $M_p\%$ – procentowy przerost maksymalny

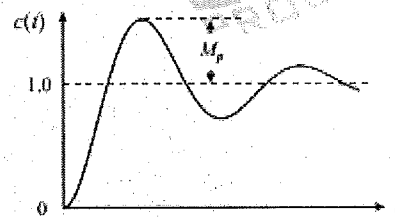
Procentowy przerost maksymalny obliczany jest przez odjęcie wartości końcowej sygnału $c(\infty)$ od jego maksymalnej wartości szczytowej $c(t_p)$, podzielenie tej różnicy przez wartość końcową $c(\infty)$ i pomnożenie uzyskanego wyniku przez 100.

$$M_p \% = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

Przerost maksymalny pokazano na rysunku 6-4.



Rys. 6-3 Czas szczytu t_p



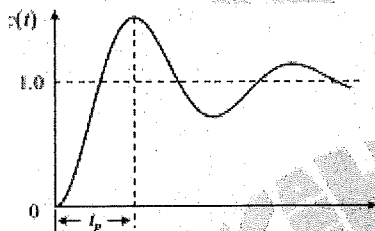
Rys. 6-4 Przerost maksymalny M_p

5. t_s – czas ustalania

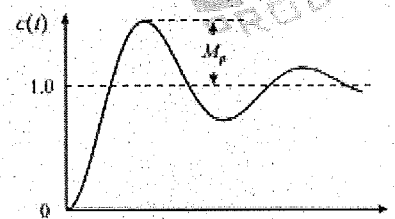
Czas ustalania t_s (lub inaczej czas regulacji) jest definiowany jako czas, w którym sygnał wyjściowy $c(t)$ narasta od wartości początkowej $c(0)$ do spełnienia poniższego warunku:

$$\frac{|c(t_p) - c(\infty)|}{|c(\infty)|} < 2\% \text{ lub } 5\%, \quad t > t_s$$

Definicję czasu ustalania ilustruje rysunek 6-5.



(a) Czas ustalania t_s (2%)



(b) Czas ustalania t_s (5%)

Rys. 6-5 Czas ustalania t_s

Odnosząc się do powyższych definicji, parametry jakościowe charakterystyk systemów pierwszego i drugiego rzędu mogą być opisane jak niżej:

1. System pierwszego rzędu

Rozważając funkcję przejściową systemu pierwszego rzędu

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b}{s + a}$$

odpowieź systemu na pobudzenie skokiem jednostkowym będzie równa

$$c(t) = \frac{b}{a} \left(1 - e^{-at} \right)$$

wtedy

(1) Czas opóźnienia t_d

$$\frac{b}{a} \left(1 - e^{-at_d} \right) = \frac{b}{2a} \left(1 - e^{-\infty} \right)$$

$$1 - e^{-at_d} = 0,5$$

$$t_d = \frac{\ln(0,5)}{-a}$$

(2) Czas narastania t_r

$$\frac{b}{a} \left(1 - e^{-at_1} \right) = 0,1 \frac{b}{2a} \left(1 - e^{-\infty} \right)$$

$$\frac{b}{a} \left(1 - e^{-at_2} \right) = 0,9 \frac{b}{2a} \left(1 - e^{-\infty} \right)$$

$$t_1 = \frac{\ln(0,9)}{-a} \approx \frac{0,1}{a}$$

$$t_2 = \frac{\ln(0,1)}{-a} \approx \frac{2,3}{a}$$

$$t_r = t_2 - t_1 \approx \frac{2,2}{a}$$

(3) Czas ustalania t_s

(a)

$$\frac{|c(t_s) - c(\infty)|}{|c(\infty)|} < 5\%$$

$$\left| e^{-at_s} \right| < 5\%$$

$$t_s > \frac{\ln(0,05)}{-a} \approx \frac{3}{a}$$

(b)

$$\frac{|c(t_s) - c(\infty)|}{|c(\infty)|} < 2\%$$

$$t_s > \frac{\ln(0,02)}{-a} \approx \frac{4}{a}$$

Jak powiedziano wyżej parametry jakościowe systemu pierwszego rzędu t_d , t_r , t_s są powiązane tylko z biegunem $p = -a$ lub stałą czasową $T_C = 1/a$ funkcji. Jeżeli biegun położony jest w lewej połowie płaszczyzny zespolonej (s) i jest zlokalizowany daleko od środka układu współrzędnych (mała stała czasowa T_C), to wartości t_d , t_r , t_s będą małe i szybkość odpowiedzi systemu będzie duża.

2. System drugiego rzędu

Rozważając funkcję przejściową systemu drugiego rzędu

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

odpowieź systemu na pobudzenie skokiem jednostkowym będzie równa

$$c(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left[\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{-\zeta} \right]$$

wtedy

(1) Czas opóźnienia t_d

$$\frac{e^{-\zeta\omega_n t_d}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left[\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t_d - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{-\zeta} \right] = \frac{1}{2}$$

Jeżeli ζ i ω_n są znane, to t_d może być wyliczone z powyższego równania.

(2) Czas narastania t_r

$$\frac{e^{-\zeta\omega_n t_1}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left[\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t_1 - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{-\zeta} \right] = 0,9$$

$$\frac{e^{-\zeta\omega_n t_2}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left[\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t_2 - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{-\zeta} \right] = 0,1$$

Jeżeli ζ i ω_n są znane, to t_1 i t_2 mogą być wyliczone z powyższego równania i wtedy

$$t_r = t_2 - t_1$$

(3) Czas szczytu t_p

Korzystając z informacji z poprzednich ćwiczeń, mamy

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$$

(4) Procentowy przerost maksymalny $M_p\%$

Korzystając z informacji z poprzednich ćwiczeń, mamy

$$M_p = e^{-\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}} \times 100\%$$

(5) Czas ustalania t_s

(a)

$$\frac{|c(t_s) - c(\infty)|}{|c(\infty)|} < 5\%, t_s \approx 3T = \frac{3}{\zeta\omega_n}$$

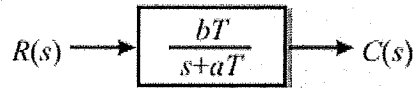
(b)

$$\frac{|c(t_s) - c(\infty)|}{|c(\infty)|} < 2\%, t_s \approx 4T = \frac{4}{\zeta\omega_n}$$

PROCEDURA

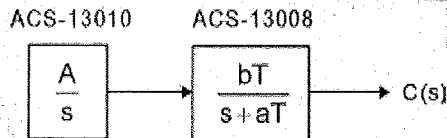
A. System pierwszego rzędu

W dalszej części ćwiczenia moduł obiektu drugiego rzędu ACS-13008 będzie używany do realizacji systemu pierwszego rzędu. Schemat blokowy modułu pokazano na rysunku 6-6.

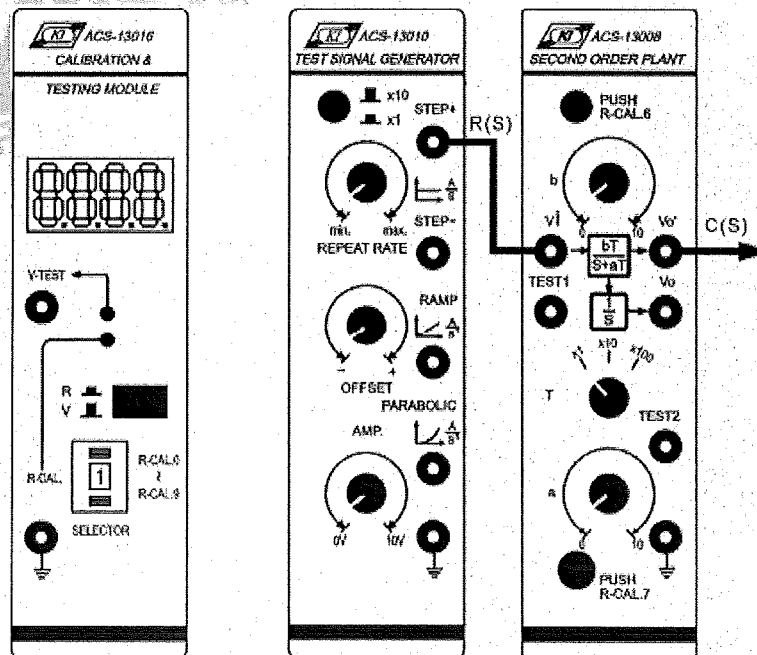


Rys. 6-6 Schemat blokowy systemu pierwszego rzędu

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 6-7.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 6-7

- W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,1Hz.
- W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, a stałą b - na 10. Wtedy funkcja przejściowa modułu ACS-13008 jest równa:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{100}{s + 100} = \frac{bT}{s + aT}$$

- Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o' modułu ACS-13008, które pokazano na rys. 6-8(a). Z uzyskanych krzywych wyznaczyć czasy t_d, t_r, t_s.

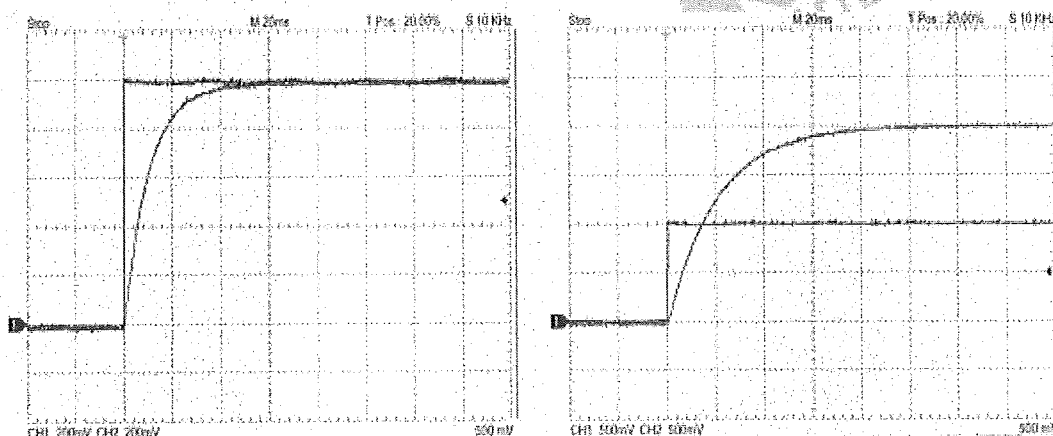
$$t_d = \frac{\ln(0,5)}{-aT} = \frac{-0,693}{-100} = \frac{0,693}{100} = 0,00693$$

$$t_r = \frac{2,2}{aT} = 0,022, \quad t_s \cong \frac{3}{aT} = 0,03$$

- W module ACS-13008 zmienić stałą a na 5. Wtedy funkcja przejściowa modułu ACS-13008 jest równa:

$$G(s) = \frac{100}{s + 50}$$

- Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o' modułu ACS-13008, które pokazano na rys. 6-8(b). Z uzyskanych krzywych wyznaczyć czasy t_d, t_r, t_s.



(a) $\frac{100}{s + 100}$

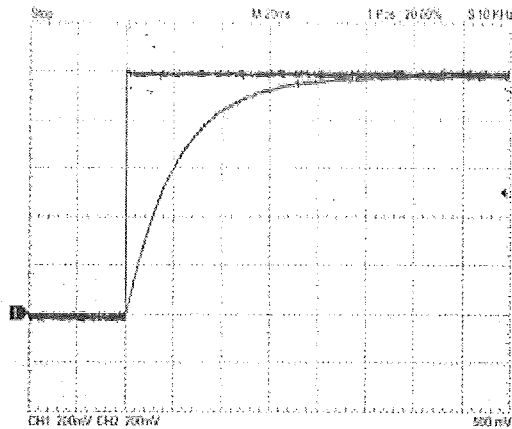
(b) $\frac{100}{s + 50}$

Rys. 6-8

- W module ACS-13008 zmienić stałą b na 5. Wtedy funkcja przejściowa modułu ACS-13008 jest równa:

$$G(s) = \frac{50}{s + 50}$$

- Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o' modułu ACS-13008, które pokazano na rys. 6-9. Z uzyskanych krzywych wyznaczyć czasy t_d, t_r, t_s.

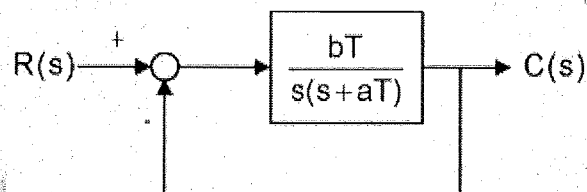


$$\frac{50}{s + 50}$$

Rys. 6-9

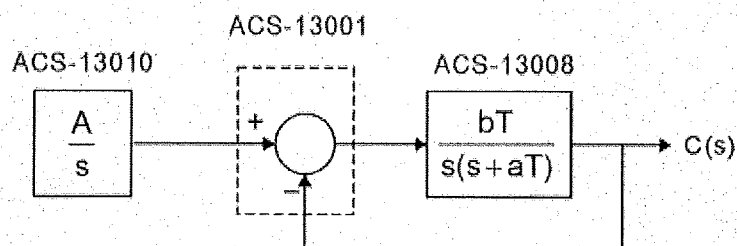
B. System drugiego rzędu

W dalszej części ćwiczenia moduł obiektu drugiego rzędu ACS-13008 będzie używany do realizacji systemu drugiego rzędu. Schemat blokowy modułu pokazano na rysunku 6-10.

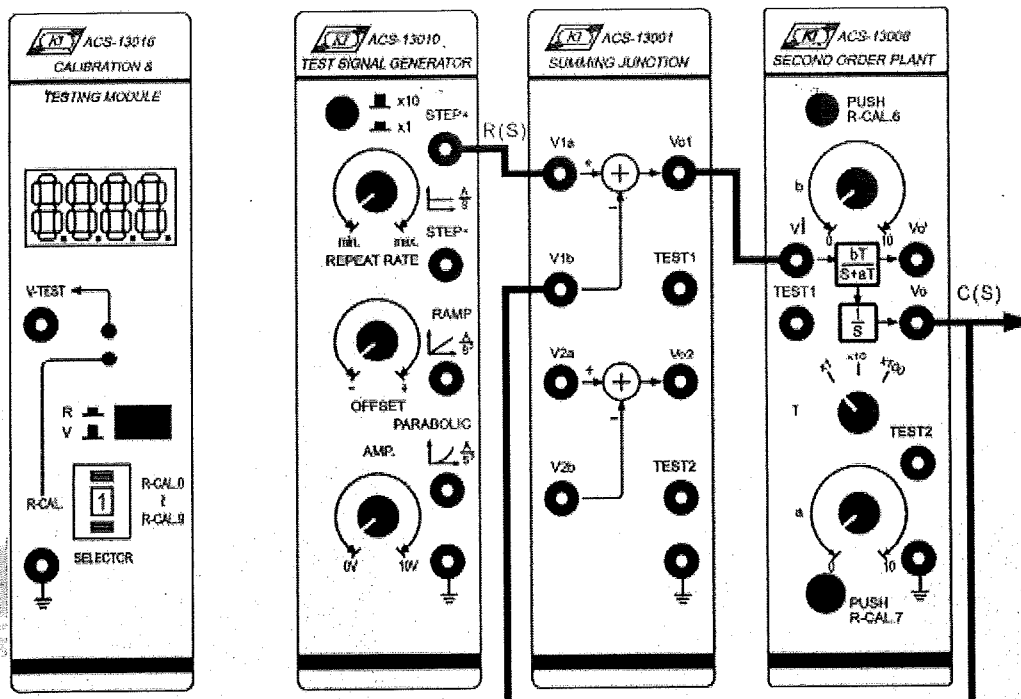


Rys. 6-10 Schemat blokowy systemu drugiego rzędu

Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 6-11.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 6-11

B-1. Wpływ współczynnika tłumienia ζ na odpowiedź w stanie nieustalonym

1. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,1Hz.
2. Ponieważ $bT = \omega_n^2$ i $aT = 2\omega_n \zeta$, to ustalona wartość bT jest równoważna ustalonej wartości ω_n . W przypadku stałej wartości bT zmiana wartości AT jest równoważna zmianie wartości ζ . W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, a stałą b ustawić na 10 ($\omega_n=10$), wtedy funkcja przejściowa systemu opisana jest zależnością:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{100}{s^2 + aTs + 100}$$

3. Ponieważ $\omega_n = 10$, $T = 10$ i $aT = 2\omega_n \zeta$, to $aT = 20\zeta$ (gdy $T=10$, to $a = 2\zeta$). W module ACS-13008 ustawić $a=4$ ($\zeta=2$). Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_0 modułu ACS-13008, które pokazano na rys. 6-12(a). Z uzyskanych krzywych wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s , t_p , M_p .
4. Powtórzyć punkt 3 dla $a = 2, 1, 0$ (ζ odpowiednio równe 1, 0,5, 0) i zarejestrować wyniki, pokazane na rysunkach 6-12(b) do 6-12(d). Z uzyskanych krzywych wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s , t_p , M_p .
5. Przykładowo dla $\omega_n = 10$ i $\zeta=0,5$:

$$\frac{e^{-0,5 \times 10td}}{\sqrt{1 - 0,5^2}} \sin \left[10\sqrt{1 - 0,5^2} / d - \tan^{-1} \frac{\sqrt{1 - 0,5^2}}{-0,5} \right] = \text{stała}$$

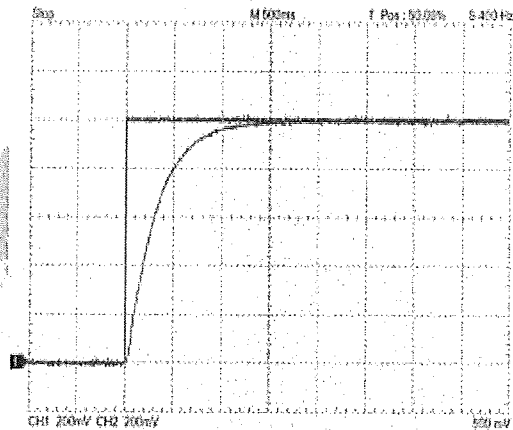
Gdy stała = 0,5, to wyliczona wartość $t_d=0,13$,

Gdy stała = 0,1, to wyliczona wartość $t_r=0,05$,

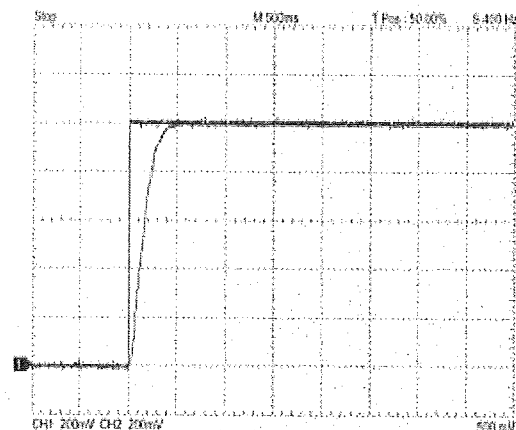
Gdy stała = 0,9, to wyliczona wartość $t_2=0,21$ i $t_r=t_2-t_1=0,16$.

$$t_s \approx \frac{3}{0,5 \times 10} = 0,6, \quad t_p = \frac{\pi}{10\sqrt{1-0,5^2}} = 0,36$$

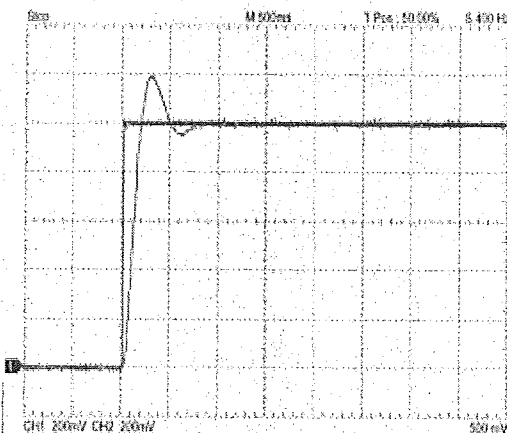
$$M_p = e^{-0,5\pi/\sqrt{1-0,5^2}} \times 100\% = 16\%$$



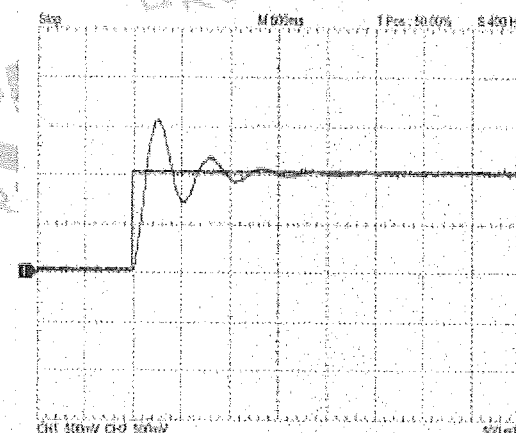
(a) odpowiedź $100/(s^2+40s+100)$, $\zeta=2$
przypadek przetłumienia systemu



(b) odpowiedź $100/(s^2+20s+100)$, $\zeta=1$
przypadek tłumienia krytycznego systemu



(c) odpowiedź $100/(s^2+10s+100)$, $\zeta=0,5$
przypadek niedotłumienia

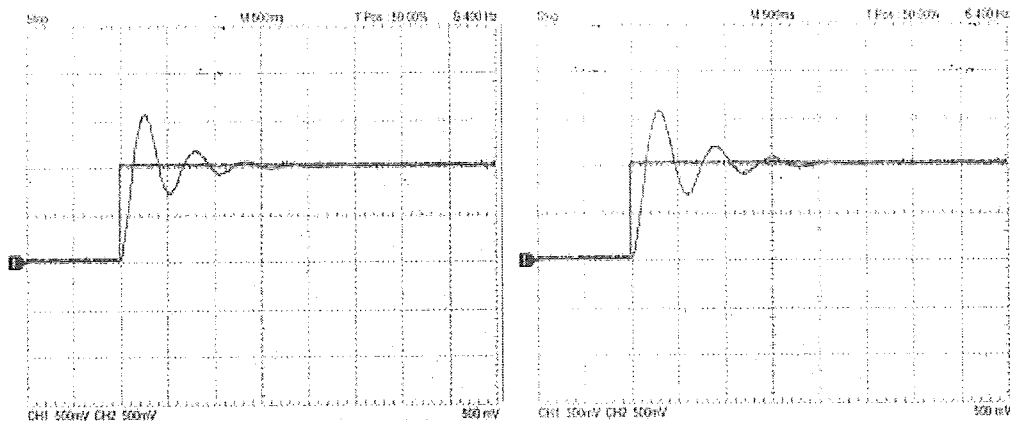


(d) odpowiedź $100/(s^2+4s+100)$, $\zeta=0,2$
przypadek niedotłumienia

Rys. 6-12

B-2. Wpływ częstotliwości własnej ω_n na odpowiedź w stanie nieustalonym

1. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,1Hz.
2. Ponieważ $bT = \omega_n^2$ i $aT = 2\omega_n \zeta$, to a i b będą się zmieniać jednocześnie ze zmianami częstotliwości własnej ω_n systemu. W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, stałą b ustawić na 10 ($\omega_n=10$), a stałą a – na 0,4 ($\zeta=0,2$). Zmierzyć sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o modułu ACS-13008, które pokazano na rys. 6-13(a). Z uzyskanych krzywych wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s , t_p , M_p .

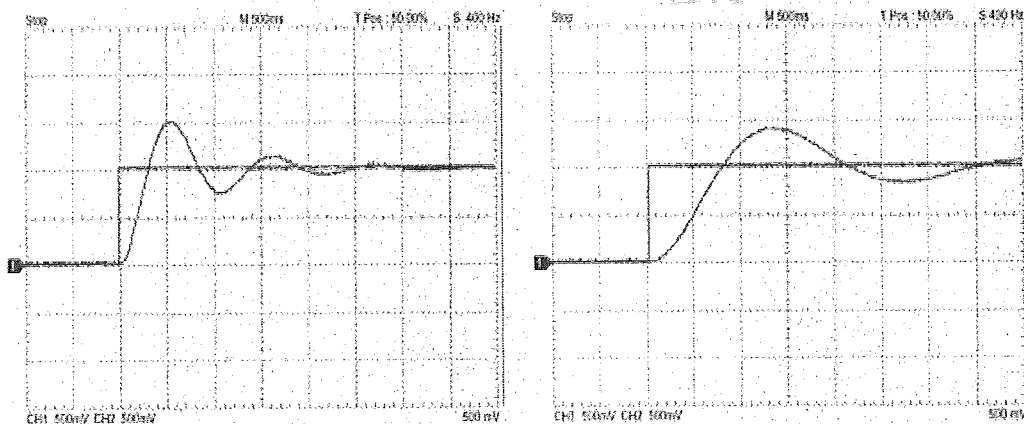


(a) $\frac{100}{s^2 + 4s + 100}$, $\omega_n = 10$, $\zeta = 0,2$

(b) $\frac{64}{s^2 + 3,2s + 64}$, $\omega_n = 8$, $\zeta = 0,2$

Rys. 6-13

3. Powtórzyć punkt 2 dla $a=0,32$ i $b=6,4$ ($\zeta=0,2$, $\omega_n=8$) i zarejestrować wyniki, które pokazano na rysunku 6-13(b). Z uzyskanych krzywych wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s , t_p , M_p .
4. Powtórzyć punkt 2 dla $a=0,2$ i $b=2,5$ ($\zeta=0,2$, $\omega_n=5$) i zarejestrować wyniki, które pokazano na rysunku 6-14(a). Z uzyskanych krzywych wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s , t_p , M_p .
5. Powtórzyć punkt 2 dla $a=0,16$ i $b=1,6$ ($\zeta=0,2$, $\omega_n=4$) i zarejestrować wyniki, które pokazano na rysunku 6-14(b). Z uzyskanych krzywych wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s , t_p , M_p .



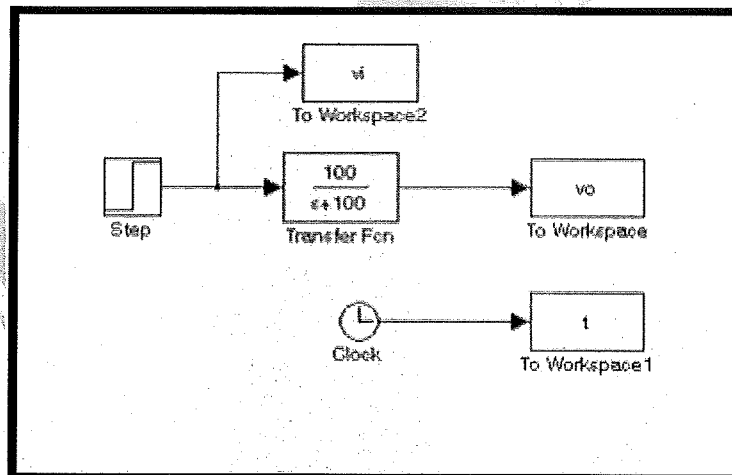
(a) $\omega_n = 5$, $\zeta = 0,2$, $\frac{25}{s^2 + 2s + 25}$

(b) $\omega_n = 2$, $\zeta = 0,2$, $\frac{4}{s^2 + 0,8s + 4}$

Rys. 6-14

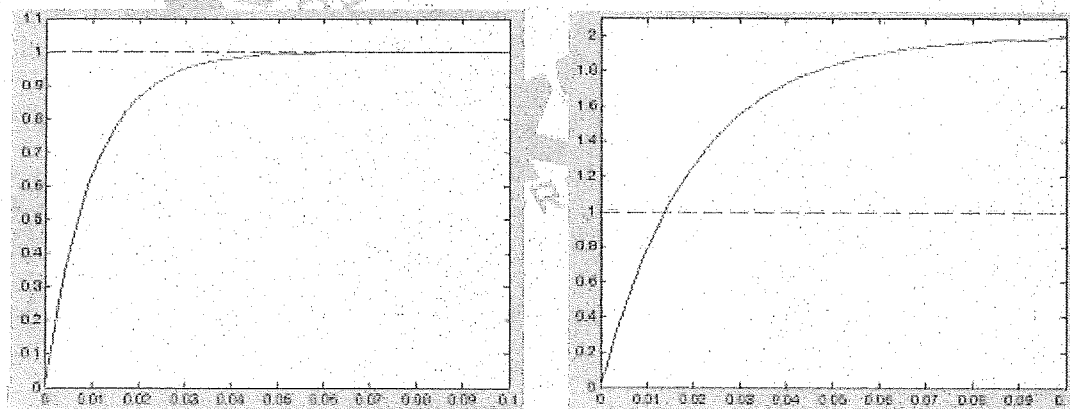
SYMULACJA SIMULINK

1. Otworzyć okno poleceń programu MATLAB.
2. W oknie poleceń MATLAB wpisać simulink < J >.
3. **Symulacja systemu pierwszego rzędu.** W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 6-15.



Rys. 6-15

4. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 0.
5. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 0.1.
6. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_6_1.mdl.
7. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 6-16(a). Z sygnału wyjściowego wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s .
8. Zmodyfikować funkcję przejściową Fcn na $100/(s+50)$, wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 6-16(b). Z sygnału wyjściowego wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s .

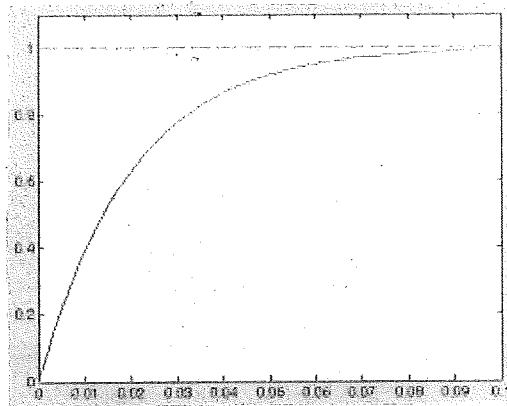


(a) $\frac{100}{s + 100}$

(b) $\frac{100}{s + 50}$

Rys. 6-16

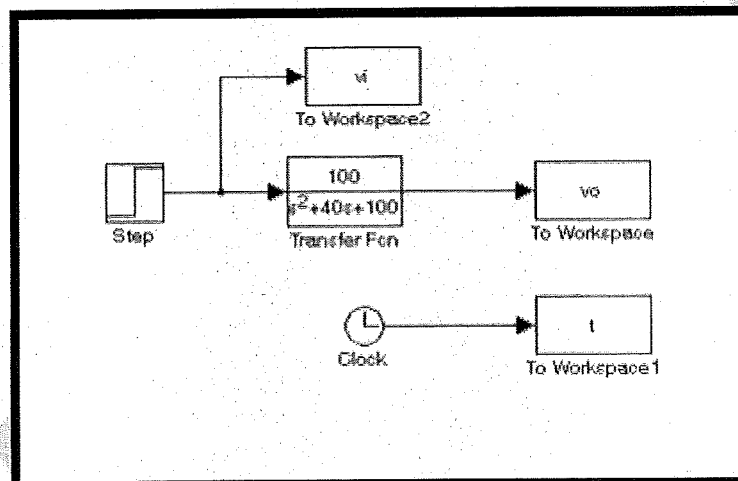
9. Zmodyfikować funkcję przejściową Fcn na $50/(s+50)$, wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 6-17. Z sygnału wyjściowego wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s .



$$\frac{50}{s + 50}$$

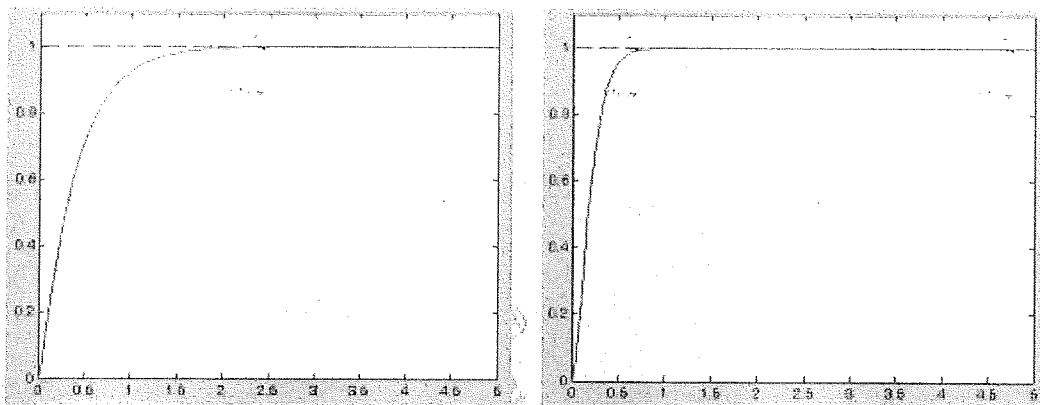
Rys. 6-17

10. Symulacja systemu drugiego rzędu. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 6-18.



Rys. 6-18

11. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 0.
12. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 5.
13. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_6_2.mdl.
14. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 6-19(a). Z sygnału wyjściowego wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s , t_p , M_p .
15. Zmodyfikować funkcję przejściową Fcn na $\frac{100}{s^2 + 20s + 100}$, wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 6-19(b). Z sygnału wyjściowego wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s , t_p , M_p .

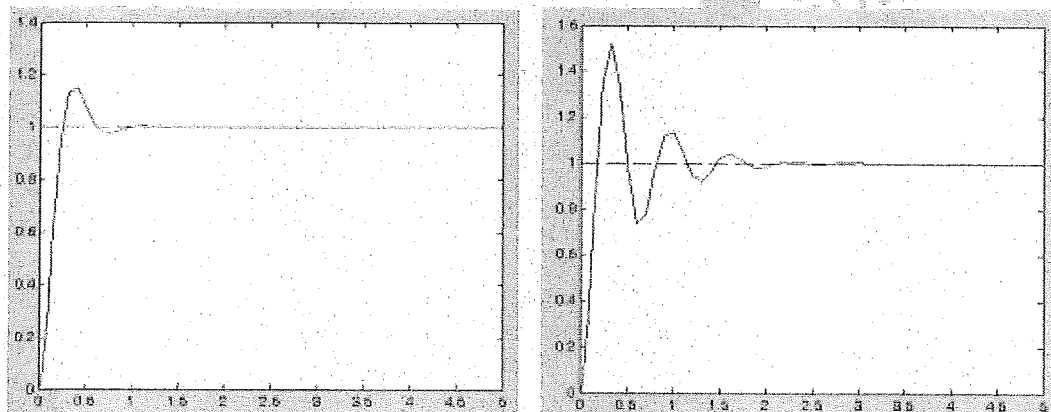


(a) $\frac{100}{s^2 + 40s + 100}$, $\omega_n = 10$, $\zeta = 2$

(b) $\frac{100}{s^2 + 20s + 100}$, $\omega_n = 10$, $\zeta = 1$

Rys. 6-19

16. Zmodyfikować funkcję przejściową Fcn na $\frac{100}{s^2 + 10s + 100}$, wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 6-20(a). Z sygnału wyjściowego wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s , t_p , M_p .
17. Zmodyfikować funkcję przejściową Fcn na $\frac{100}{s^2 + 4s + 100}$, wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 6-20(b). Z sygnału wyjściowego wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s , t_p , M_p .



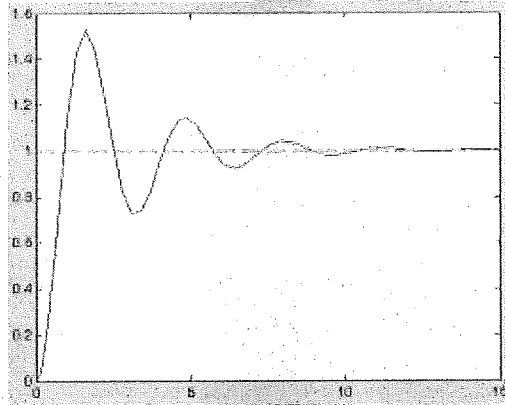
(a) $\frac{100}{s^2 + 10s + 100}$, $\omega_n = 10$, $\zeta = 0,5$

(b) $\frac{100}{s^2 + 4s + 100}$, $\omega_n = 10$, $\zeta = 0,2$

Rys. 6-20

18. Zmodyfikować funkcję przejściową Fcn na $\frac{64}{s^2 + 3,2s + 64}$, wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 6-21(a). Z sygnału wyjściowego wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s , t_p , M_p .
19. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawień czasu symulacji zmienić czas Stop na 10.
20. Zmodyfikować funkcję przejściową Fcn na $\frac{25}{s^2 + 2s + 25}$, wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 6-21(b). Z sygnału wyjściowego wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s , t_p , M_p .

21. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawień czasu symulacji zmienić czas Stop na 15.
22. Zmodyfikować funkcję przejściową Fcn na $\frac{4}{s^2 + 0,8s + 4}$, wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 6-22. Z sygnału wyjściowego wyznaczyć parametry t_d , t_r , t_s , t_p , M_p .



$$\frac{4}{s^2 + 0,8s + 4}, \omega_n = 2, \zeta = 0,2$$

Rys. 6-22

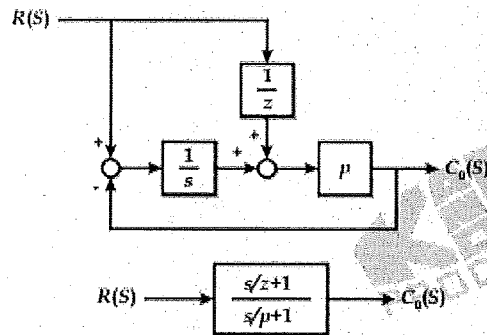
Ćwiczenie 7 Efekt zera w systemie pierwszego rzędu

CEL ĆWICZEŃ

1. Przystudiowanie charakterystyki czasowej systemu pierwszego rzędu z zerem.
2. Przystudiowanie uchybu ustalonego w systemie pierwszego rzędu z zerem.

PODSTAWY TEORETYCZNE

Rysunek 7-1 przedstawia schemat blokowy systemu pierwszego rzędu z zerem



Rys. 7-1 Schemat blokowy systemu pierwszego rzędu z zerem

Funkcja przejściowa takiego systemu jest wyrażana zależnością

$$\frac{C_o(s)}{R(s)} = \frac{s/z + 1}{s/p + 1} = \frac{p}{z} \left(1 + \frac{z - p}{s + p} \right)$$

Jeżeli na wejście systemu podamy sygnał skoku jednostkowego $R(s) = 1/s$, otrzymujemy

$$C_o(s) = \frac{1}{s} \frac{p}{z} \left(1 + \frac{z - p}{s + p} \right) = \frac{1}{s} \frac{p}{z} + \frac{1}{s} \frac{p}{z} \frac{z - p}{s + p}$$

$$c_o(t) = \frac{p}{z} + \frac{z - p}{z} \left(1 - e^{-pt} \right) = 1 - \frac{z - p}{z} e^{-pt}$$

Gdy $z = \infty$ lub $z \gg p$, system jest równoważny systemowi pierwszego rzędu bez zera.

$$\frac{C_o(s)}{R(s)} = \frac{s/z + 1}{s/p + 1} \approx \frac{1}{s/p + 1}$$

Gdy $z = p$, wtedy

$$\frac{C_o(s)}{R(s)} = \frac{s/z + 1}{s/p + 1} = 1$$

Funkcja przejściowa systemu pierwszego rzędu z zerem jest wyrażana zależnością

$$\frac{C_o(s)}{R(s)} = \frac{s/z + 1}{s/p + 1}$$

Funkcja przejściowa systemu pierwszego rzędu bez zera jest wyrażana zależnością

$$\frac{C_o(s)}{R(s)} = \frac{1}{s/p + 1}$$

Gdy czas t dąży do zera, odpowiedź na skok jednostkowy wyrażana jest zależnością

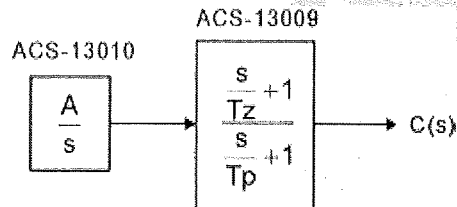
$$\lim_{t \rightarrow 0} c_o(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s C_o(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s/p + 1} = 1 \quad (\text{z zerem})$$

$$\lim_{t \rightarrow 0} c(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s C(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \frac{1}{s/p + 1} = 1 \quad (\text{bez zera})$$

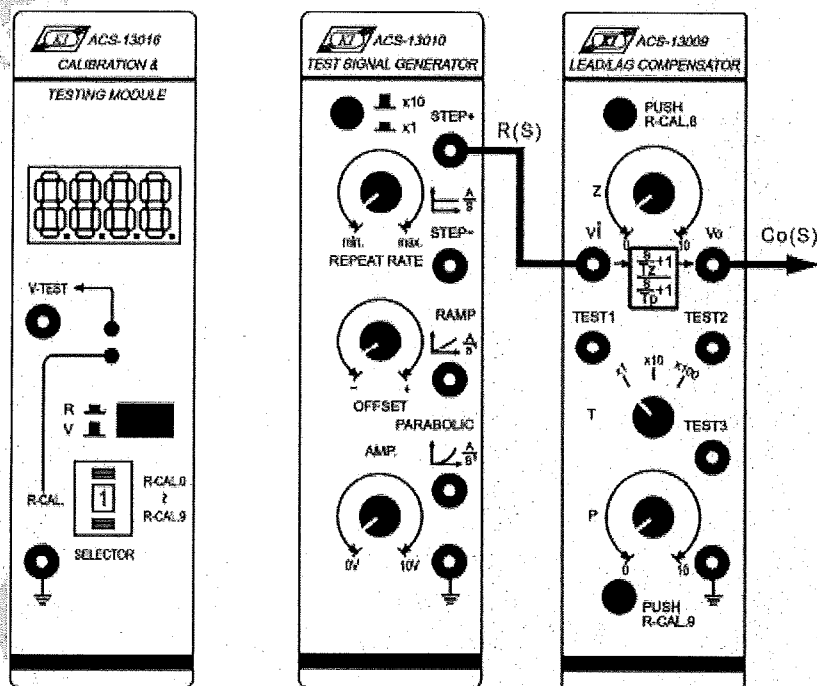
Z powyższych równań widzimy, że charakterystyki czasowe w stanie nieustalonym systemu pierwszego rzędu bez zera i z zerem są całkowicie różne, ale odpowiedzi w stanie ustalonym są identyczne.

PROCEDURA

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 7-2.



(a) Schemat blokowy



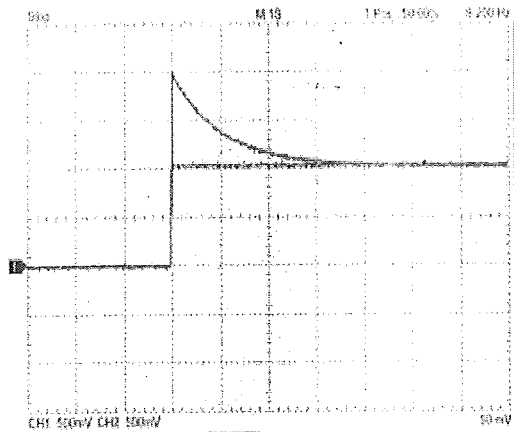
(b) Schemat połączeń

Rys. 7-2

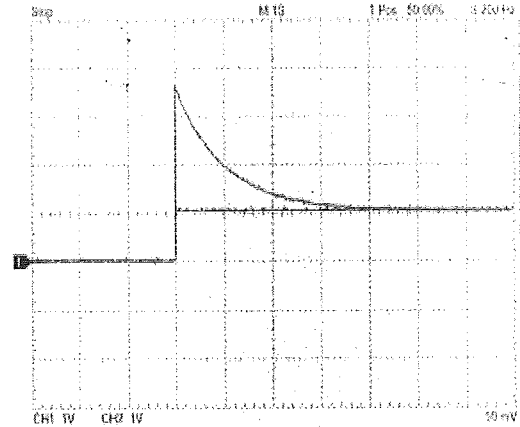
2. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,1Hz.
3. W module ACS-13009 ustawić przełącznik T na pozycji x1, a stałą p ustawić na 1. W takim przypadku funkcja przejściowa modułu ACS-13009 wyrażana jest zależnością:

$$G(s) = \frac{C_o(s)}{R(s)} = \frac{\frac{s}{z} + 1}{s + 1}$$

4. W module ACS-13009 ustawić stałą z na 0,5. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o modułu ACS-13009, które pokazano na rysunku 7-3(a). Gdy $z=0,5$, odpowiedź w stanie nieustalonym ma wartość początkową 2, a uchyb ustalony wynosi 0.
5. Powtórzyć punkt 4 dla $z=0,25$ i zanotować wyniki, jak na rysunku 7-3(b). Gdy $z=0,25$, odpowiedź w stanie nieustalonym ma wartość początkową 4, a uchyb ustalony wynosi 0.



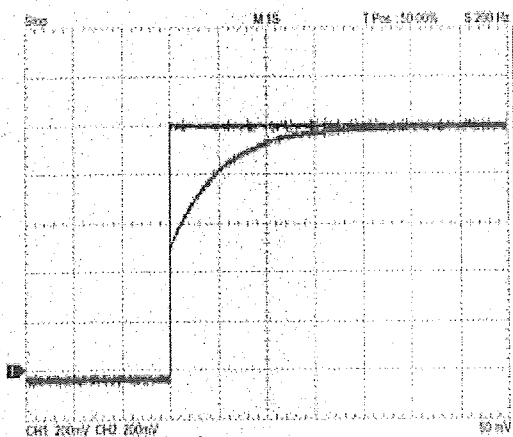
(a) $z=0,5$, $p=1$



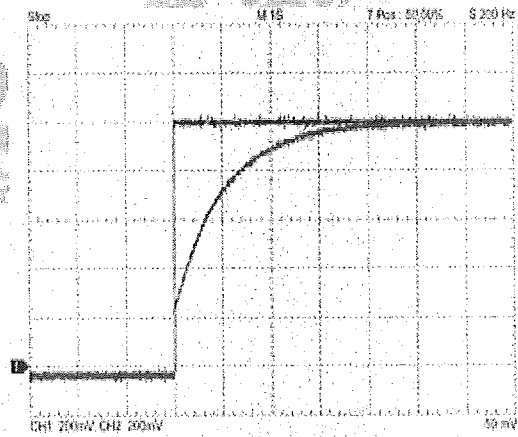
(b) $z=0,25$, $p=1$

Rys. 7-3

6. W module ACS-13009 ustawić stałą z na 2. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o modułu ACS-13009, które pokazano na rysunku 7-4(a). Gdy $z=2$, odpowiedź w stanie nieustalonym ma wartość początkową $1/2$, a uchyb ustalony wynosi 0.
7. Powtórzyć punkt 6 dla $z=4$ i zanotować wyniki, jak na rysunku 7-4(b). Gdy $z=4$, odpowiedź w stanie nieustalonym ma wartość początkową $1/4$, a uchyb ustalony wynosi 0.



(a) $z=2$, $p=1$

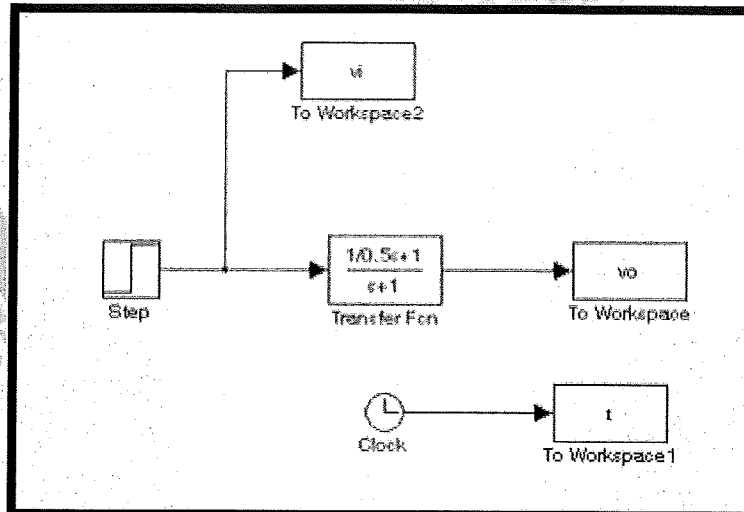


(b) $z=4$, $p=1$

Rys. 7-4

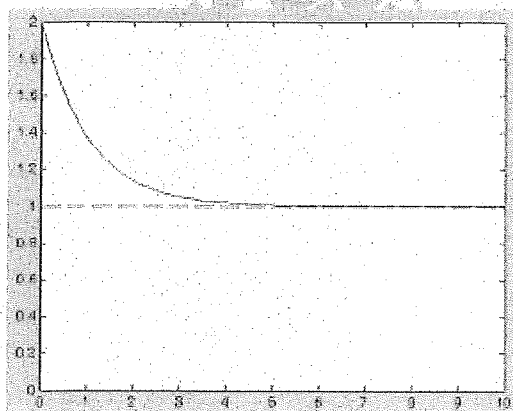
SYMULACJA SIMULINK

1. Otworzyć okno poleceń programu MATLAB.
2. W oknie poleceń MATLAB wpisać simulink < ↵ >.
3. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 7-5.

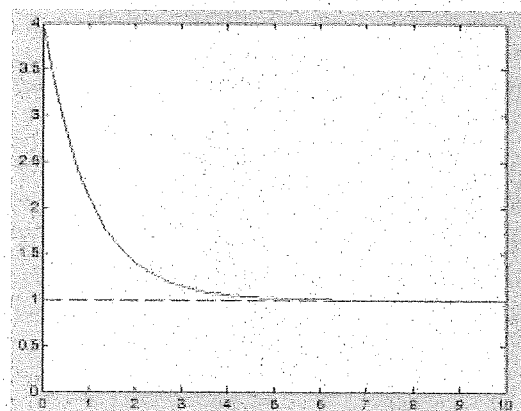


Rys. 7-5

4. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 0.
5. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 10.0.
6. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_7_1.mdl.
7. Uruchomić symulację i uzyskać wyniki jak na rysunku 7-6(a).



(a) $z=0,5, p=1$

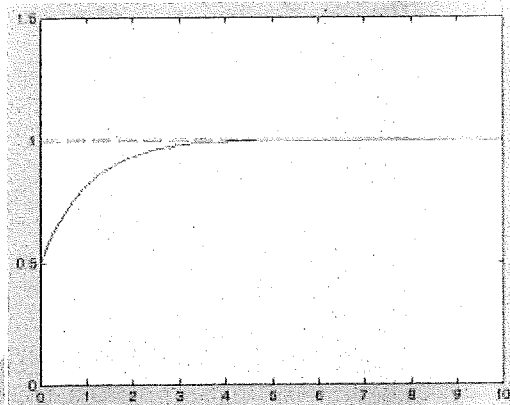


(b) $z=0,25, p=1$

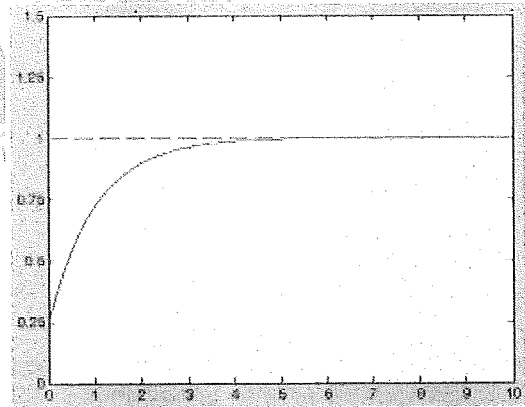
Rys. 7-6

8. Zmodyfikować funkcję przejściową Fcn na $\frac{s}{0,25} + 1$ i wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 7-6(b).

9. Zmodyfikować funkcję przejściową Fcn na $\frac{s}{s+1} + 1$ i wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 7-7(a).



(a) $z=2, p=1$



(b) $z=4, p=1$

Rys. 7-7

10. Zmodyfikować funkcję przejściową Fcn na $\frac{s}{s+1} + 4$ i wykonać symulację, aby uzyskać wyniki jak na rys. 7-7(b).

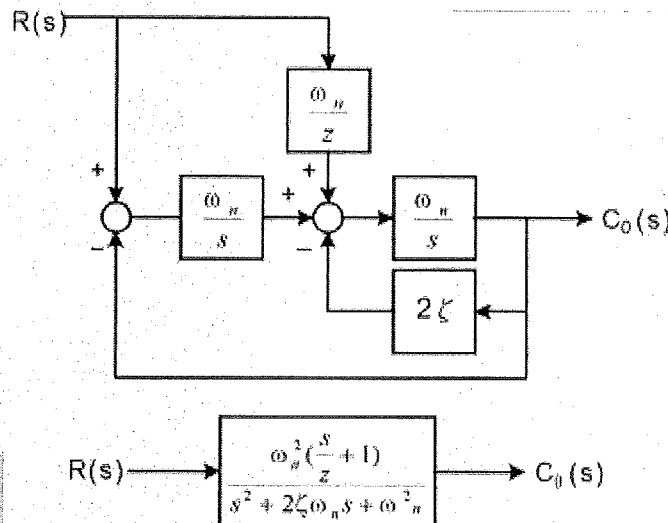
Ćwiczenie 8 Efekt zera w systemie drugiego rzędu

CEL ĆWICZEŃ

1. Przystudiowanie efektu zera w systemie drugiego rzędu, gdy $\zeta < 1$.
2. Przystudiowanie efektu zera w systemie drugiego rzędu, gdy $\zeta = 1$.
3. Przystudiowanie efektu zera w systemie drugiego rzędu, gdy $\zeta > 1$.

PODSTAWY TEORETYCZNE

W ćwiczeniu nr 5 przystudiowaliśmy charakterystyki systemu drugiego rzędu bez zera, jednakże systemy drugiego rzędu zwykle posiadają zero. Poniżej przedyskutujemy efekt zera w systemie drugiego rzędu.



Rys. 8-1 Schemat blokowy systemu drugiego rzędu z zerem

$$R \frac{\omega_n}{z} - C(2\zeta) + (R - C) \frac{\omega_n}{s} = C \frac{s}{\omega_n}$$

$$C \left(\frac{s}{\omega_n} + \frac{\omega_n}{s} + 2\zeta \right) = R \left(\frac{\omega_n}{z} + \frac{\omega_n}{s} \right)$$

$$C = \frac{\omega_n s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \frac{s\omega_n + z\omega_n}{sz} R = \frac{\omega_n^2 \left(\frac{s}{z} + 1 \right)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} R$$

Funkcja przejściowa takiego systemu jest wyrażana zależnością

$$\frac{C_o(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2 (s/z + 1)}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} + \frac{(\omega_n^2/z)s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Jeżeli na wejście systemu podamy sygnał skoku jednostkowego $R(s)=1/s$, otrzymujemy

$$C_o(s) = \frac{1}{s} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} + \frac{1}{s} \frac{(\omega_n^2/z)s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Niech

$$C(s) = \frac{1}{s} \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$C_1(s) = \frac{1}{s} \frac{(\omega_n^2/z)s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

Wtedy

$$C_o(s) = C(s) + C_1(s) = C(s) + \frac{1}{z} sC(s)$$

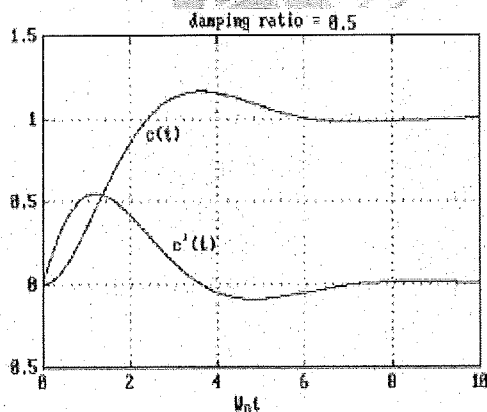
Zatem

$$c_o(t) = c(t) + \frac{1}{z} c'(t)$$

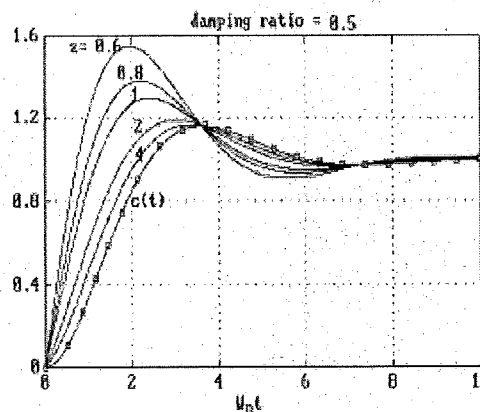
Ustawmy teraz ω_n na 1 i przedyskutujmy charakterystyki wyjściowe systemu przy różnych współczynnikach tłumienia ζ .

1. Przypadek niedotłumienia: $0 < \zeta < 1$

Przebiegi $c(t)$ i $c'(t)$ pokazano na rysunku 8-2, zaś rysunek 8-3 przedstawia przebiegi $c_o(t)$ dla różnych wartości z .



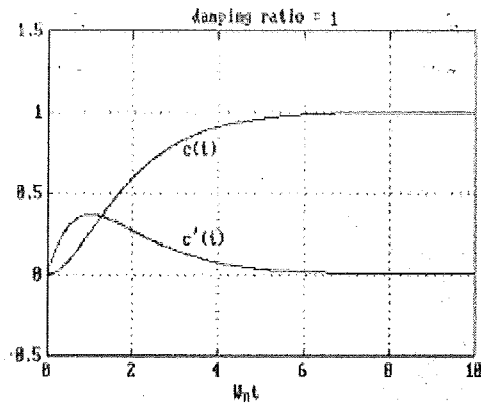
Rys. 8-2 Przebiegi $c(t)$ i $c'(t)$



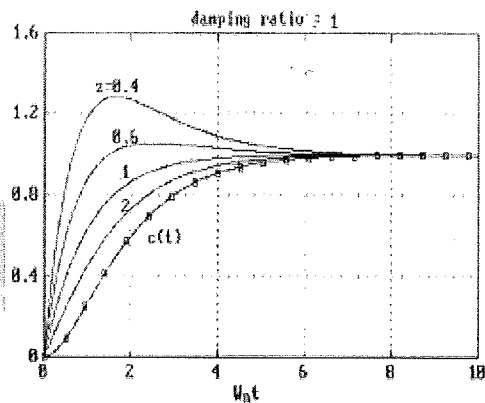
Rys. 8-3 Przebieg $c_o(t)$

2. Przypadek tłumienia krytycznego: $\zeta = 1$

Przebiegi $c(t)$ i $c'(t)$ pokazano na rysunku 8-4, zaś rysunek 8-5 przedstawia przebiegi $c_o(t)$ dla różnych wartości z .



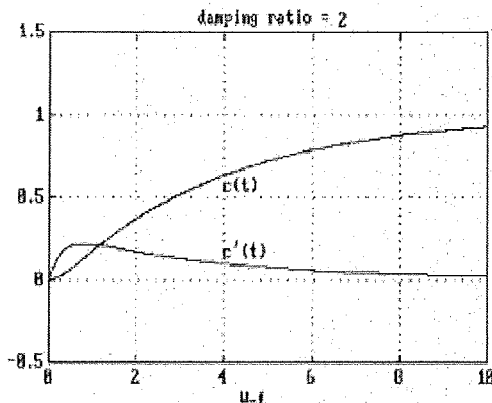
Rys. 8-4 Przebiegi $c(t)$ i $c'(t)$



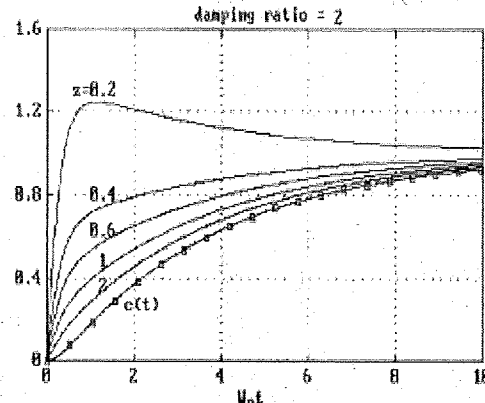
Rys. 8-5 Przebieg $c_o(t)$

3. Przypadek przetłumienia $\zeta > 1$

Przebiegi $c(t)$ i $c'(t)$ pokazano na rysunku 8-6, zaś rysunek 8-7 przedstawia przebiegi $c_o(t)$ dla różnych wartości z .



Rys. 8-6 Przebiegi $c(t)$ i $c'(t)$



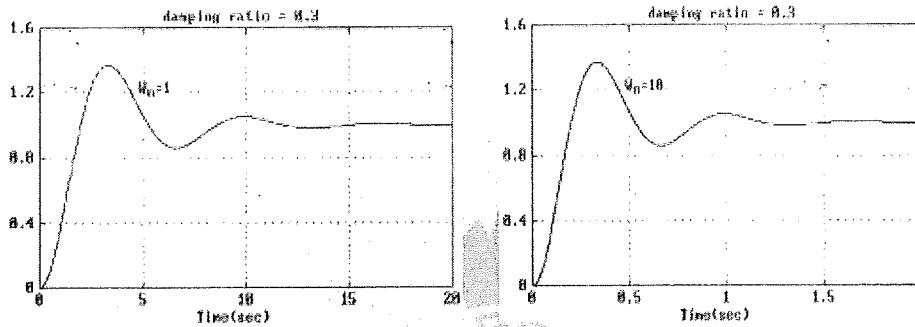
Rys. 8-7 Przebieg $c_o(t)$

Z powyższych wykresów możemy zobaczyć efekt zera w systemie drugiego rzędu. Charakterystykę odpowiedzi otrzymuje się, sumując $c'(t)/z$ i $c(t)$. Gdy z jest bardzo duże (lub $1/z$ jest bardzo małe), wpływ $c'(t)/z$ na system jest bardzo mały, zatem $c_o(t)$ jest determinowane krzywą $c(t)$. W odwrotnym przypadku duża wartość $1/z$ powoduje większy wpływ na system krzywej $c'(t)/z$, tym samym odpowiedź systemu jest szybsza, a przerost napięcia większy.

Poniżej przedyskutujemy zależność między częstotliwością drgań własnych ω_n a systemem drugiego rzędu z zerem.

$$C_o(s) = C(s) + C_j(s) = C(s) + \frac{1}{z} sC(s)$$

Z poprzednich ćwiczeń z systemem drugiego rzędu wiemy, że im większa wartość ω_n , to odpowiedź $c(t)$ systemu jest szybsza. Rysunek 8-8 przedstawia krzywe odpowiedzi $c(t)$ dla dwóch różnych wartości częstotliwości ω_n .



Rys. 8-8 Krzywe odpowiedzi $c(t)$ ($\omega_n = 1$ i $\omega_n = 10$)

Zależność między częstotliwością drgań własnych ω_n a odpowiedzią $c_1(t)$ jest bardziej skomplikowana. Normalizując funkcję $c_1(t)$, trzymujemy

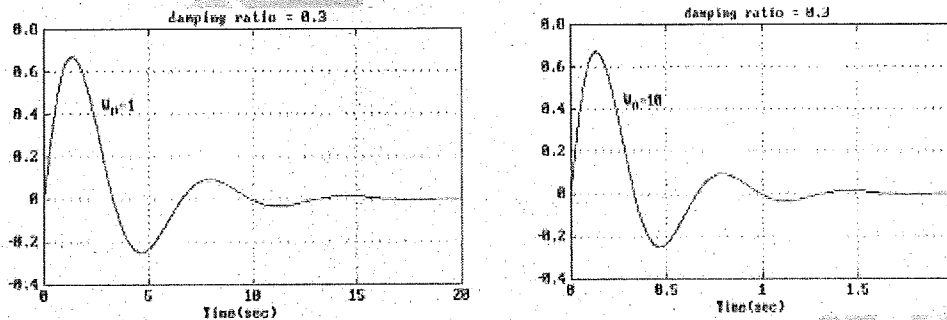
$$C_1(s) = \frac{1}{s} \frac{(\omega_n^2/z)s}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{1}{z} \frac{1}{s} \frac{s}{(s/\omega_n)^2 + 2\zeta(s/\omega_n) + 1}$$

$$= \frac{\omega_n}{z} \frac{1}{s} \frac{(s/\omega_n)}{(s/\omega_n)^2 + 2\zeta(s/\omega_n) + 1}$$

Niech

$$C_2(s) = \frac{1}{s} \frac{(s/\omega_n)}{(s/\omega_n)^2 + 2\zeta(s/\omega_n) + 1}$$

Z powyższego równania widzimy, że im większa wartość ω_n , tym szybsza odpowiedź $c_2(t)$ systemu. Rysunek 8-9 przedstawia krzywe odpowiedzi $c_2(t)$ dla dwóch różnych wartości częstotliwości ω_n .

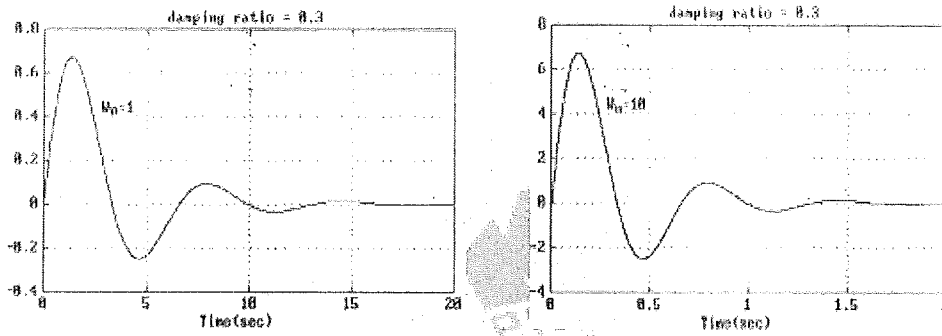


Rys. 8-9 Krzywe odpowiedzi $c_2(t)$ ($\omega_n = 1$ i $\omega_n = 10$)

Ponieważ

$$C_1(s) = \frac{\omega_n}{z} C_2(s),$$

to możemy zauważyć, że ω_n wpływa nie tylko na szybkość odpowiedzi $c_1(t)$, ale również na jej moduł. Rysunek 8-10 przedstawia krzywe odpowiedzi $c_1(t)$ dla różnych wartości częstotliwości ω_n .

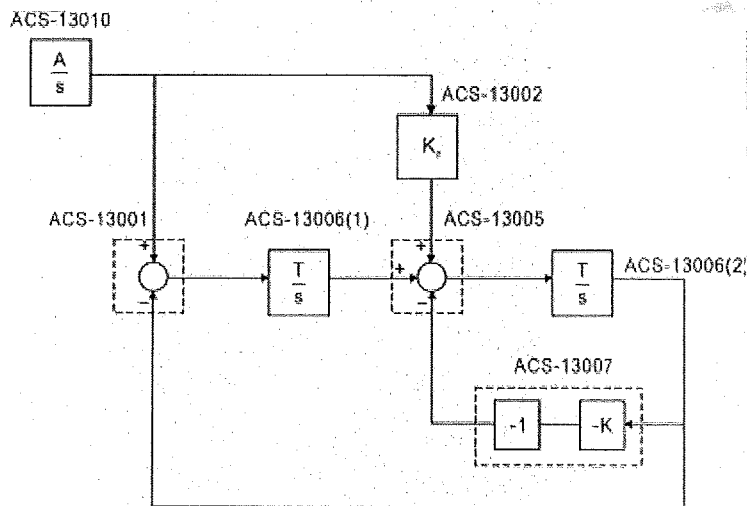


Rys. 8-10 Krzywe odpowiedzi $c_1(t)$ ($\omega_n = 1$ i $\omega_n = 10$)

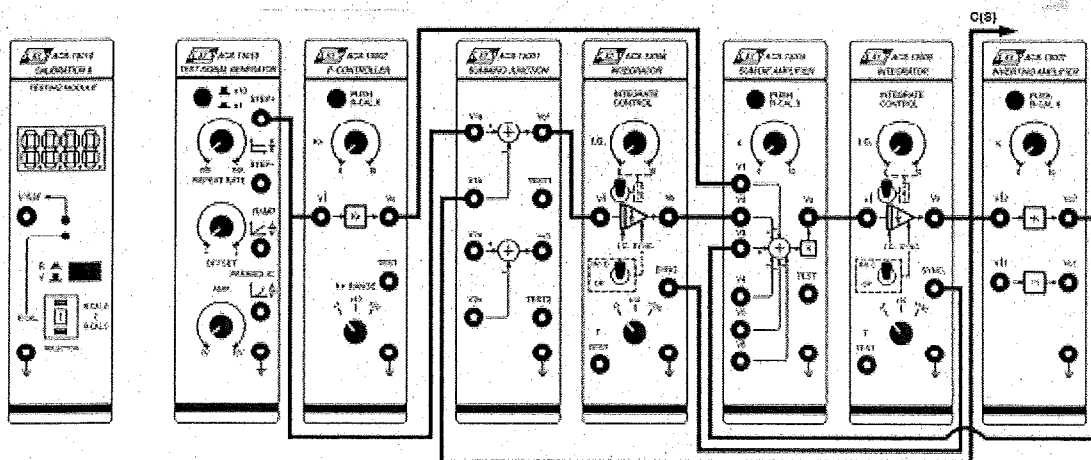
PROCEDURA

A. Efekt zera w systemie drugiego rzędu przy współczynniku tłumienia $\zeta > 1$

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 8-11.



(a) Schemat blokowy



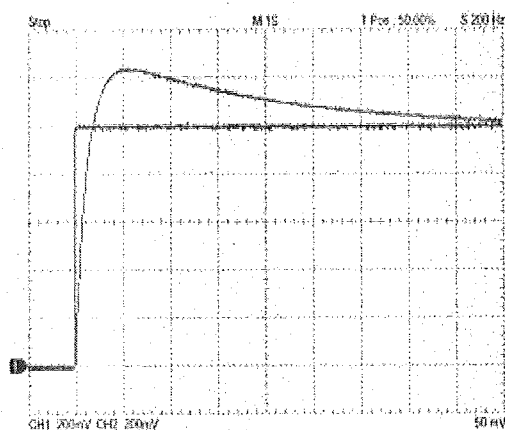
(b) Schemat połączeń

Rys. 8-11

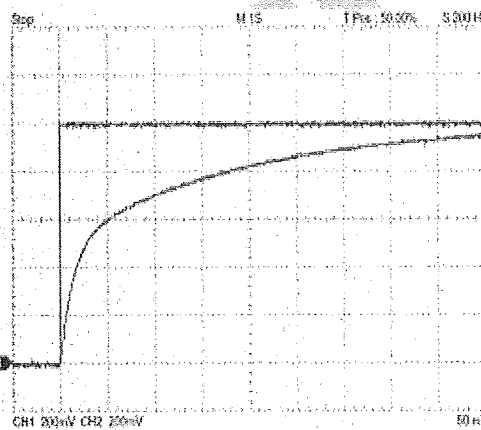
- W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,05Hz.
- Ustawić przełączniki modułów ACS13006(1) i ACS-13006(2) zgodnie z poniższą tabelą:

Przełącznik	ACS-13006(1)	ACS-13006(2)
T	x1	x1
I.C.	0	0
SYNC.	OP	OP

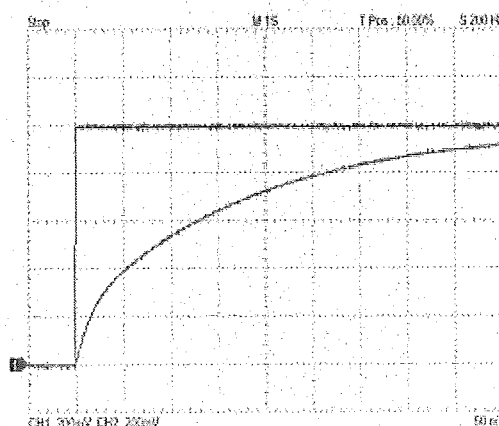
- W module ACS-13005 ustawić stałą K na 1.
- W celu obserwacji wpływu stałej z na system drugiego rzędu przy $\zeta > 1$, w module ACS-13007 ustawić K na 4 ($K=2\zeta$, $\zeta=2$).
- Ponieważ $\omega_n = 1 \Rightarrow K_p = \frac{1}{z}$, w module ACS-13002 ustawić $K_p=5$ ($z=0,2$). Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o modułu ACS-13006(2), które pokazano na rys. 8-12(a).
- Powtórzyć punkt 6 dla $K_p=2$ i 1 ($z=0,5$ i 1) i zarejestrować wyniki, które pokazano na rysunkach odpowiednio 8-12(b) i (c).



(a) $K_p=5$, $z=0,2$, $\zeta=2$



(b) $K_p=2$, $z=0,5$, $\zeta=2$



(c) $K_p=1$, $z=1$, $\zeta=2$

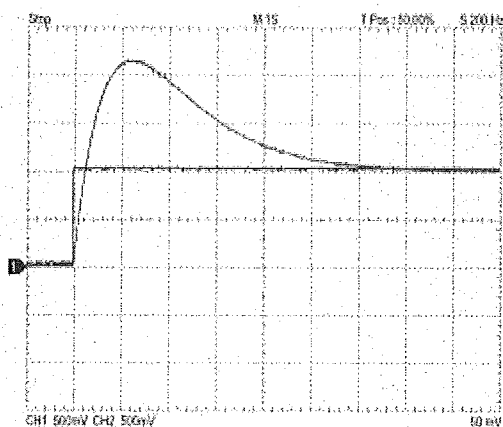
Rys. 8-12

B. Efekt zera w systemie drugiego rzędu przy współczynniku tłumienia $\zeta = 1$

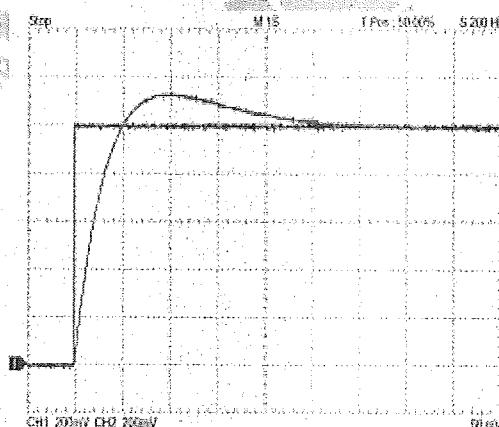
1. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,05Hz.
2. Ustawić przełączniki modułów ACS13006(1) i ACS-13006(2) zgodnie z poniższą tabelą:

Przełącznik	ACS-13006(1)	ACS-13006(2)
T	x1	x1
I.C.	0	0
SYNC.	OP	OP

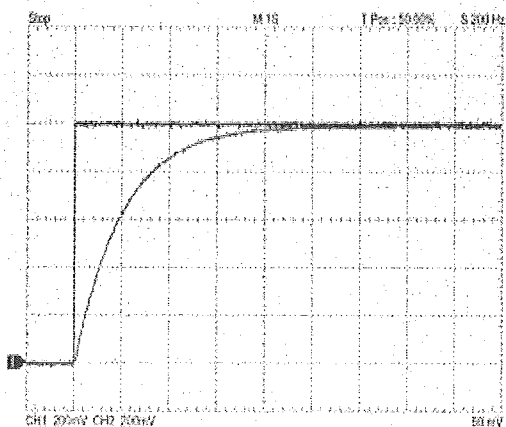
3. W module ACS-13005 ustawić stałą K na 1.
4. W celu obserwacji wpływu stałej z na system drugiego rzędu przy $\zeta = 1$, w module ACS-13007 ustawić K na 2 ($K=2\zeta$, $\zeta=1$).
5. W module ACS-13002 ustawić $K_p=5$ ($z=0,2$). Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o modułu ACS-13006(2), które pokazano na rys. 8-13(a).
6. Powtórzyć punkt 5 dla $K_p=2, 1, 0,5$ ($z=0,5, 1, 2$) i zarejestrować wyniki, które pokazano na rysunkach odpowiednio 8-13(b), (c) i (d).



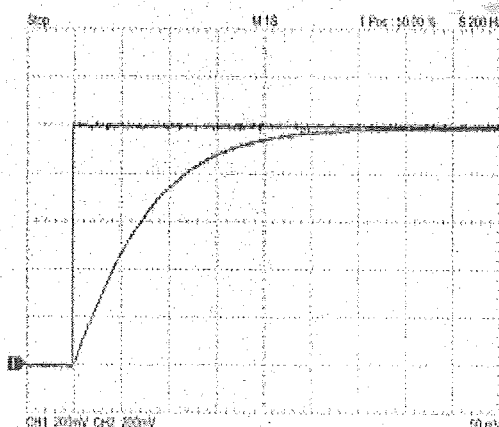
(a) $K_p=5, z=0,2, \zeta=1$



(b) $K_p=2, z=0,5, \zeta=1$



(a) $K_p=1, z=1, \zeta=1$



(b) $K_p=0,5, z=2, \zeta=1$

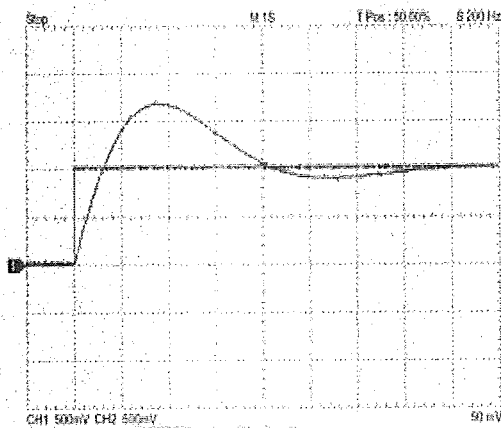
Rys. 8-13

C. Efekt zera w systemie drugiego rzędu przy współczynniku tłumienia $\zeta < 1$

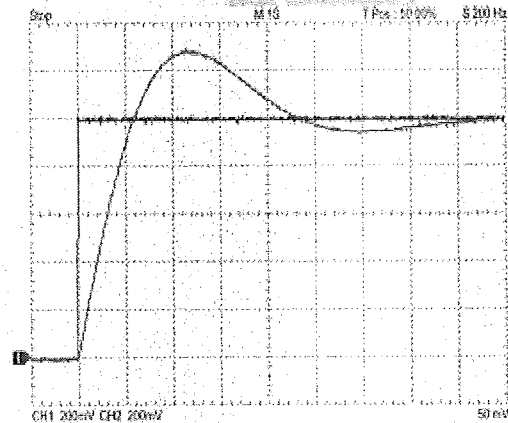
1. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,05Hz.
2. Ustawić przełączniki modułów ACS13006(1) i ACS-13006(2) zgodnie z poniższą tabelą:

Przełącznik	ACS-13006(1)	ACS-13006(2)
T	x1	x1
I.C.	0	0
SYNC.	OP	OP

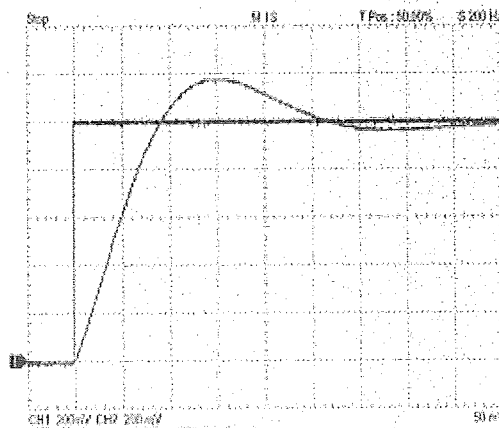
3. W module ACS-13005 ustawić stałą K na 1.
4. W celu obserwacji wpływu stałej z na system drugiego rzędu przy $\zeta < 1$, w module ACS-13007 ustawić K na 1 ($K=2\zeta$, $\zeta=0,5$).
5. W module ACS-13002 ustawić $K_p=2$ ($z=0,5$). Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o modułu ACS-13006(2), które pokazano na rys. 8-14(a).
6. Powtórzyć punkt 5 dla $K_p=1, 0,5$ ($z=1, 2$) i zarejestrować wyniki, które pokazano na rysunkach odpowiednio 8-14(b) i (c).



(a) $K_p=2$, $z=0,5$, $\zeta=0,5$



(b) $K_p=1$, $z=1$, $\zeta=0,5$



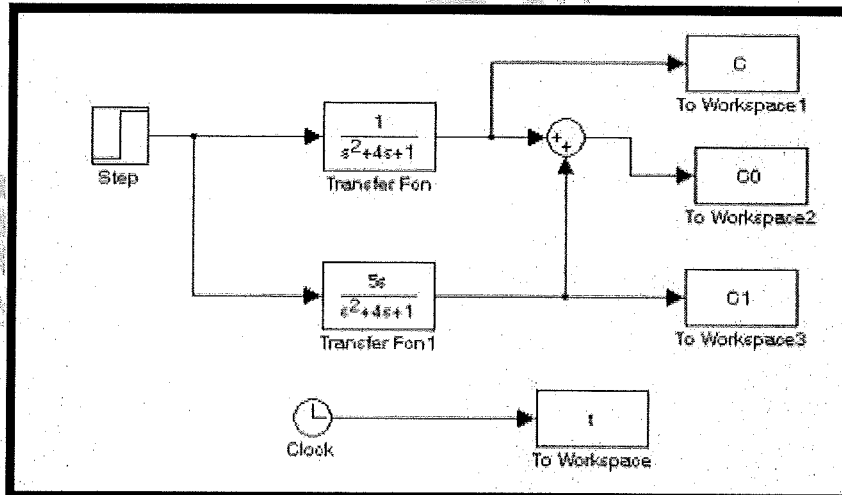
(c) $K_p=0,5$, $z=2$, $\zeta=0,5$

Rys. 8-14

SYMULACJA SIMULINK

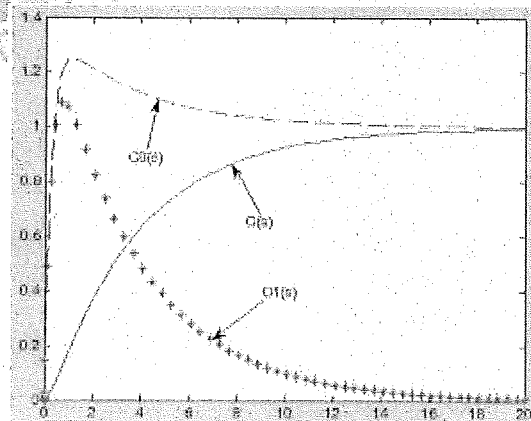
A. Efekt zera w systemie drugiego rzędu przy współczynniku tłumienia $\zeta > 1$

1. Otworzyć okno poleceń programu MATLAB.
2. W oknie poleceń MATLAB wpisać simulink < ↵ >
3. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 8-15.



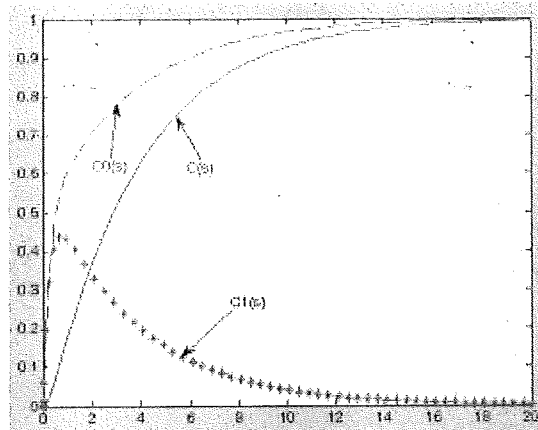
Rys. 8-15

4. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 0.
5. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 20.
6. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_8_1.mdl.
7. Uruchomić symulację, wybierając polecenie Simulation/Start lub naciskając [Ctrl]+T. Wynik symulacji pokazano na rysunku 8-16.



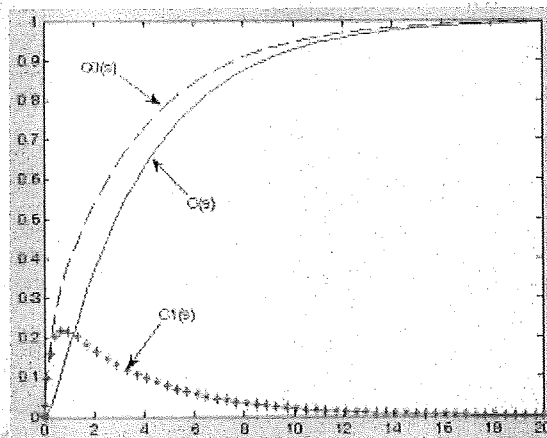
Rys. 8-16 $z=2, \zeta=2$

8. Zmodyfikować funkcję przejściową bloku Transfer Fcn1 na $2s/(s^2+4s+1)$ i uruchomić symulację, aby uzyskać wynik jak na rysunku 8-17.



Rys. 8-17 $z=0,5, \zeta=2$

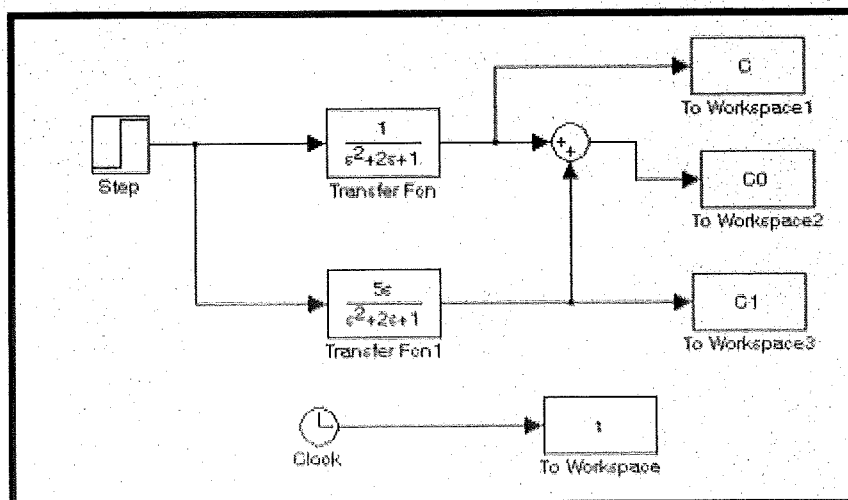
9. Zmodyfikować funkcję przejściową bloku Transfer Fcn1 na $s/(s^2+4s+1)$ i uruchomić symulację, aby uzyskać wynik jak na rysunku 8-18.



Rys. 8-18 $z=1, \zeta=2$

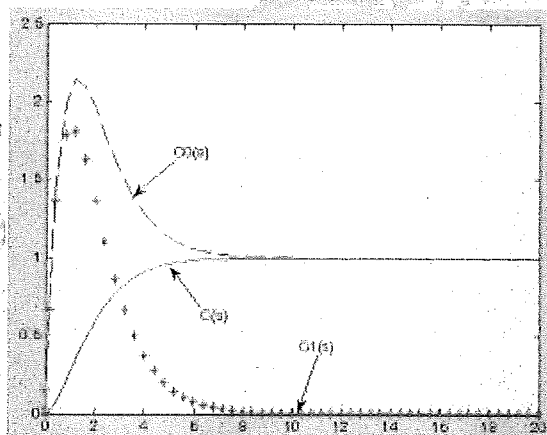
B. Efekt zera w systemie drugiego rzędu przy współczynniku tłumienia $\zeta = 1$

1. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 8-19.



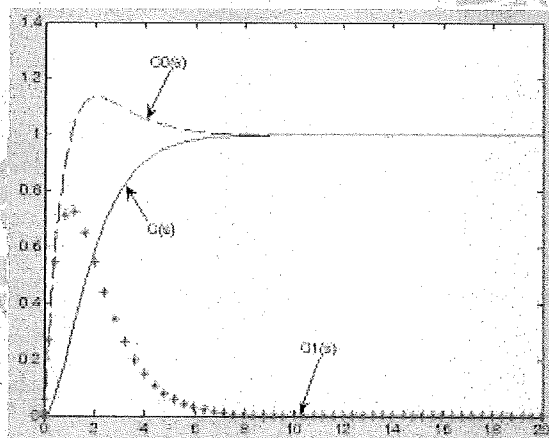
Rys. 8-19

2. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 0.
3. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czas symulacji zmienić czas Stop na 20.
4. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_8_2.mdl.
5. Uruchomić symulację, wybierając polecenie Simulation/Start lub naciskając [Ctrl]+T. Wynik symulacji pokazano na rysunku 8-20.



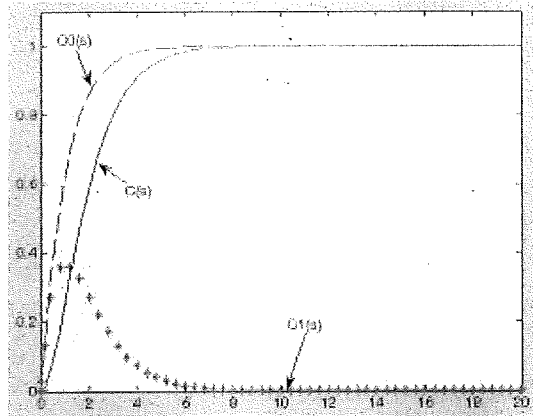
Rys. 8-20 $z=0,2, \zeta=1$

6. Zmodyfikować funkcję przejściową bloku Transfer Fcn1 na $2s/(s^2+2s+1)$ i uruchomić symulację, aby uzyskać wynik jak na rysunku 8-21.



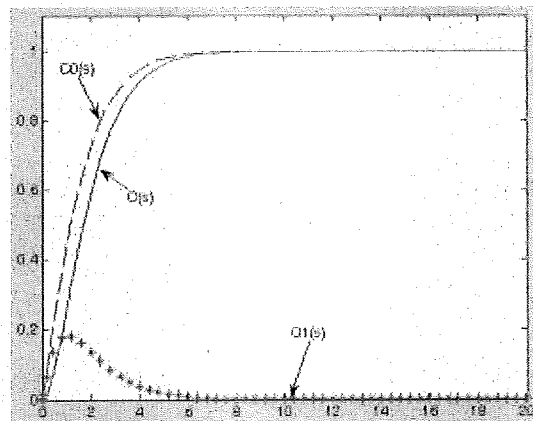
Rys. 8-21 $z=0,5, \zeta=1$

7. Zmodyfikować funkcję przejściową bloku Transfer Fcn1 na $s/(s^2+2s+1)$ i uruchomić symulację, aby uzyskać wynik jak na rysunku 8-22.



Rys. 8-22 $z=1, \zeta=1$

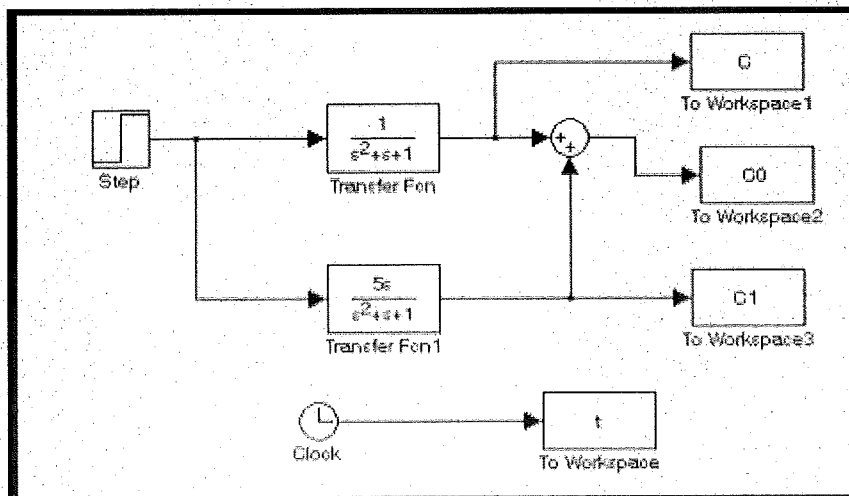
8. Zmodyfikować funkcję przejściową bloku Transfer Fcn1 na $0,5s/(s^2+2s+1)$ i uruchomić symulację, aby uzyskać wynik jak na rysunku 8-23.



Rys. 8-23 $z=2, \zeta=1$

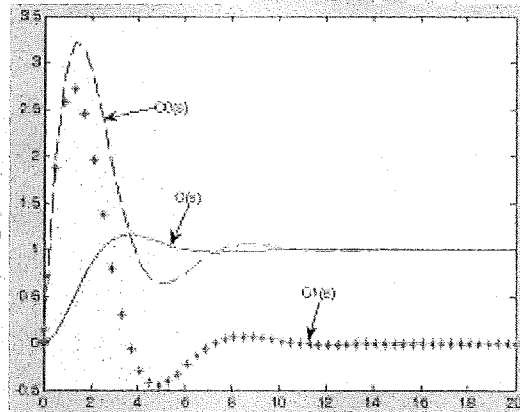
C. Efekt zera w systemie drugiego rzędu przy współczynniku tłumienia $\zeta < 1$

1. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 8-24.



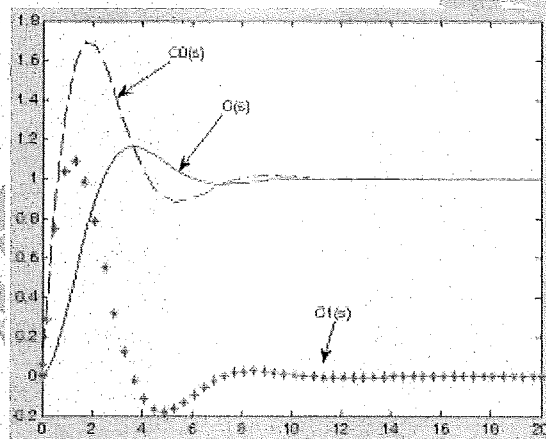
Rys. 8-24

2. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 0.
3. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czas symulacji zmienić czas Stop na 20.
4. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_8_3.mdl.
5. Uruchomić symulację, wybierając polecenie Simulation/Start lub naciskając [Ctrl]+T. Wynik symulacji pokazano na rysunku 8-25.



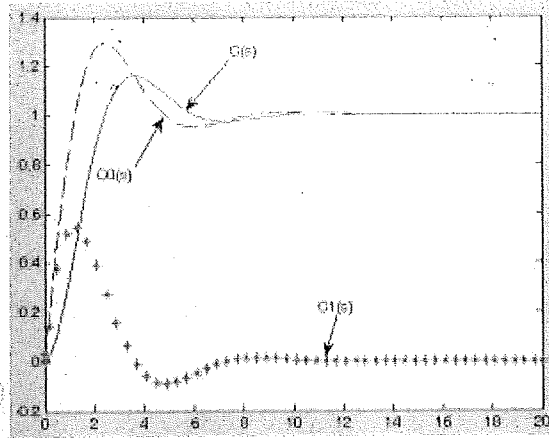
Rys. 8-25 $z=0,2, \zeta=0,5$

6. Zmodyfikować funkcję przejściową bloku Transfer Fcn1 na $2s/(s^2+s+1)$ i uruchomić symulację, aby uzyskać wynik jak na rysunku 8-26.



Rys. 8-26 $z=0,5, \zeta=0,5$

7. Zmodyfikować funkcję przejściową bloku Transfer Fcn1 na $s/(s^2+s+1)$ i uruchomić symulację, aby uzyskać wynik jak na rysunku 8-27.



Rys. 8-27 $z=1, \zeta=0,5$

Ćwiczenie 9 Biegun dominujący w systemie drugiego rzędu

CEL ĆWICZEŃ

1. Poznanie i zrozumienie pojęcia bieguna dominującego w systemie drugiego rzędu.
2. Weryfikacja tezy, że system drugiego rzędu może być aproksymowany systemem pierwszego rzędu.

PODSTAWY TEORETYCZNE

Jeżeli dwa pierwiastki systemu drugiego rzędu są rzeczywiste, różne i leżą w dużej odległości od siebie, to system drugiego rzędu może być aproksymowany systemem pierwszego rzędu, którego pierwiastki leżą blisko środka układu współrzędnych.

Funkcja przejściowa (transmitancja) systemu drugiego rzędu może być rozłożona na czynniki jak niżej

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{ab}{(s+a)(s+b)} = \frac{X}{s+a} + \frac{Y}{s+b}$$

Gdzie wartość X i Y będą równe

$$X = \frac{ab}{b-a} \quad \text{i} \quad Y = -\frac{ab}{b-a}$$

Wykorzystując zasady operacji na ułamkach prostych do powyższej funkcji przejściowej, możemy ją przekształcić do postaci

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{ab}{b-a} \frac{1}{s+a} - \frac{ab}{b-a} \frac{1}{s+b}$$

Dla pobudzenia skokiem jednostkowym otrzymujemy

$$C(s) = \frac{1}{s} \left[\frac{ab}{b-a} \frac{1}{s+a} - \frac{ab}{b-a} \frac{1}{s+b} \right]$$

W celu powrotu w dziedzinę czasu wykorzystujemy odwrotną transformatę Laplace'a funkcji C(s)

$$c(t) = 1 - \frac{b}{b-a} e^{-at} + \frac{a}{b-a} e^{-bt}$$

Rozważmy teraz poniższą funkcję przejściową systemu pierwszego rzędu

$$\frac{C_1(s)}{R(s)} = \frac{a}{s+a}$$

Zatem dla pobudzenia skokiem jednostkowym otrzymujemy

$$C_1(s) = \frac{1}{s} \frac{a}{s+a}$$

W celu powrotu w dziedzinę czasu wykorzystujemy odwrotną transformatę Laplace'a funkcji $C_1(s)$

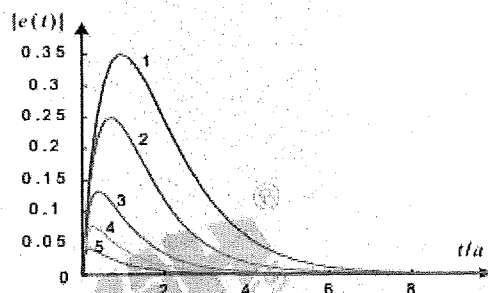
$$c_1(t) = 1 - e^{-at}$$

Rozważmy teraz różnicę między systemami pierwszego i drugiego rzędu

$$e(t) = c_1(t) - c(t) = 1 - e^{-at} - \left[1 - \frac{b}{b-a} e^{-at} + \frac{a}{b-a} e^{-bt} \right]$$

$$= \frac{1}{b/a - 1} (e^{-at} - e^{-bt})$$

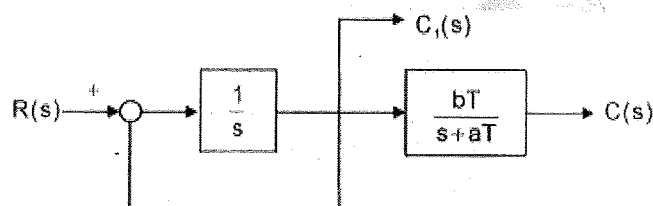
Wartość bezwzględna różnicy $e(t)$ wskazuje na bliskość obu systemów. Jeżeli $e(t)$ jest bardzo mała, to oba systemy są bardzo bliskie sobie lub inaczej odpowiedź systemu drugiego rzędu jest bardzo podobna do odpowiedzi systemu pierwszego rzędu. W takim przypadku system drugiego rzędu można zastąpić systemem pierwszego rzędu. Rysunek 9-1 pokazuje krzywe $|e(t)|$. Na tym rysunku oś X wykalowana jest w stosunku t/a , a krzywe 1 do 5 wykreślono dla zależności współczynników a i b odpowiednio $b=1,1a$, $b=2a$, $b=5a$, $b=10a$ i $b=20a$. Z krzywych wyraźnie widać, że im większa wartość b lub mniejsza wartość $|e(t)|$, tym odpowiedź systemu drugiego rzędu jest bliższa odpowiedzi systemu pierwszego rzędu. Gdy b dąży do nieskończoności, to różnica $e(t)$ dąży do zera.



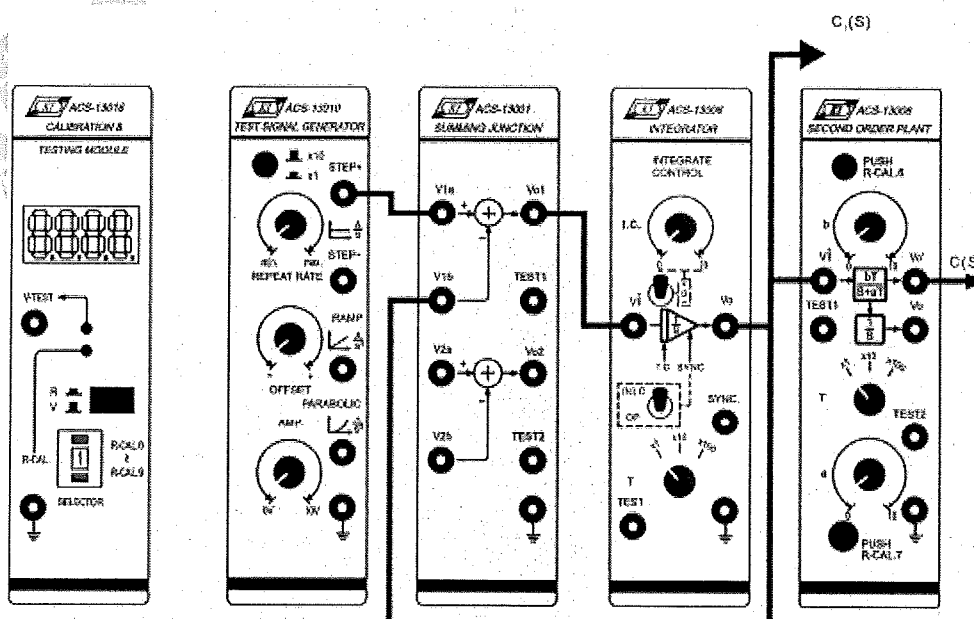
Rys. 9-1 Krzywe $|e(t)|$

PROCEDURA

- Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 9-2.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 9-2

- W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,05Hz.
- Ustawić przełączniki modułu ACS13006 zgodnie z poniższą tabelą:

Przełącznik	ACS-13006
T	x1
I.C.	0
SYNC.	OP

- W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x1, a stałe a i b ustawić na wartość 1. W takim przypadku funkcja przejściowa systemu jest równa:

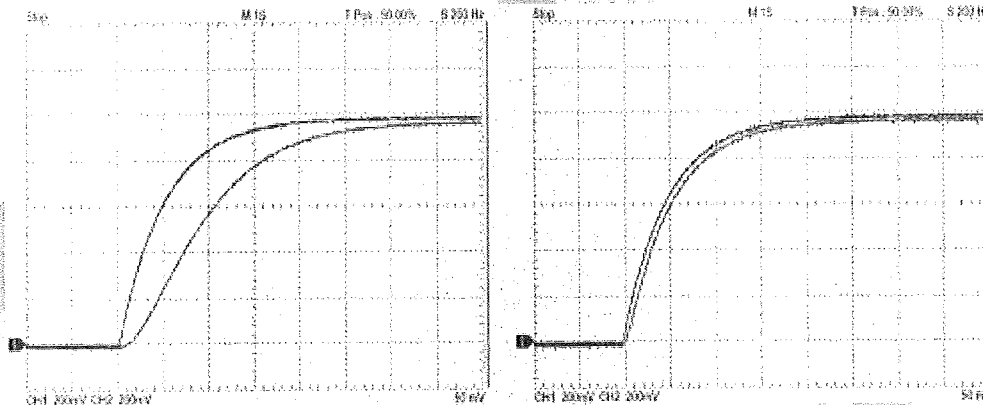
$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{(s+1)(s+1)}$$

Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_0 ($C_1(t)$) modułu ACS-13006 i V_0' ($C(s)$) modułu ACS-13008, które pokazano na rys. 9-3(a).

5. W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, a stałe a i b ustawić na wartość 1. W takim przypadku funkcja przejściowa systemu jest równa:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{10}{(s+1)(s+10)}$$

Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_o ($C_1(t)$) modułu ACS-13006 i V_o' ($C(s)$) modułu ACS-13008, które pokazano na rys. 9-3(b).



(a) $\frac{1}{(s+1)}, \frac{1}{(s+1)(s+1)}$

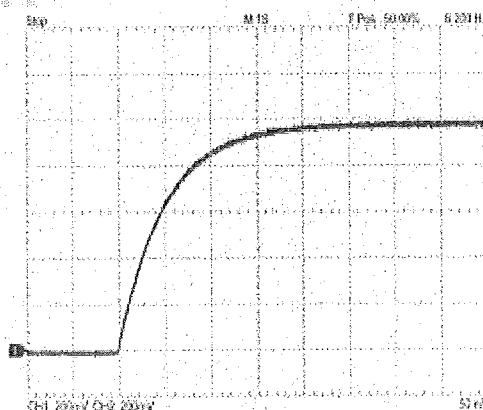
(b) $\frac{1}{(s+1)}, \frac{10}{(s+1)(s+10)}$

Rys. 9-3

6. W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, a stałe a i b ustawić na wartość 10. W takim przypadku funkcja przejściowa systemu jest równa:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{100}{(s+1)(s+100)}$$

Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach V_o ($C_1(t)$) modułu ACS-13006 i V_o' ($C(s)$) modułu ACS-13008, które pokazano na rys. 9-4. Jak widać na rysunku sygnał błędny e jest prawie równy zero.

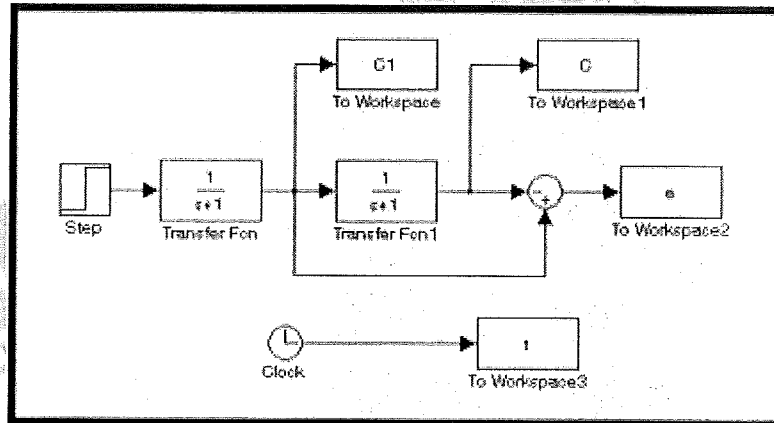


$$\frac{1}{(s+1)}, \frac{100}{(s+1)(s+100)}$$

Rys. 9-4

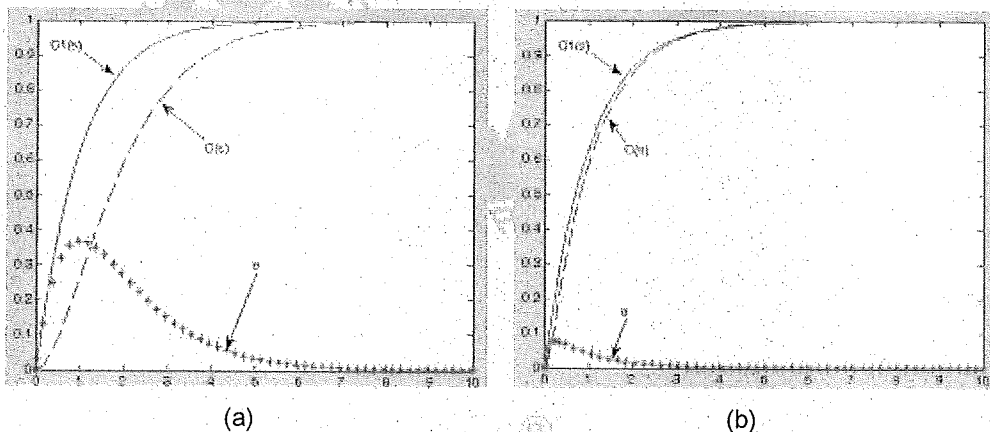
SYMULACJA SIMULINK

1. Otworzyć okno poleceń programu MATLAB.
2. W oknie poleceń MATLAB wpisać simulink < J >.
3. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 9-5.



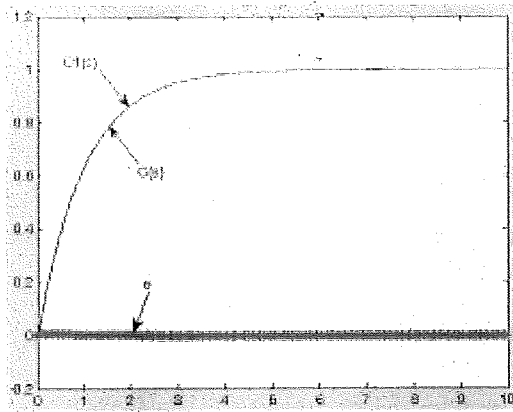
Rys. 9-5

4. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 0.
5. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 10.
6. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_9_1.mdl.
7. Aby uruchomić symulację wybrać polecenie Simulation/Start lub nacisnąć [Ctrl]+T. Wyniki symulacji pokazano na rysunku 9-6(a).
8. Zmodyfikować funkcję przejściową bloku Transfer Fcn na $10/(s+10)$ i zachować schemat pod nazwą Experiment_9_2.mdl. Wykonać symulację, aby uzyskać wyniki pokazane na rys. 9-6(b).



Rys. 9-6

9. Zmodyfikować funkcję przejściową bloku Transfer Fcn na $10/(s+10)$ i zachować schemat pod nazwą Experiment_9_3.mdl. Wykonać symulację, aby uzyskać wyniki pokazane na rysunku 9-7.



Rys. 9-7

KAM
PRODUCTS

KAM
PRODUCTS

KAM
PRODUCTS

KAM
PRODUCTS

KAM
PRODUCTS

Ćwiczenie 10 Charakterystyki serwosilnika DC PM

CEL ĆWICZEŃ

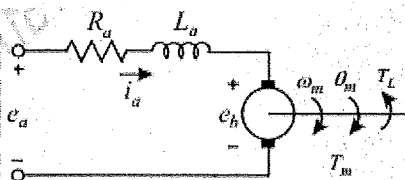
1. Zapoznanie się z parametrami charakterystycznymi serwosilnika prądu stałego (DC) z magnesami stałymi (PM – permanent magnet).
2. Pomiary parametrów charakterystycznych serwosilników DC PM.

PODSTAWY TEORETYCZNE

W czasie studiów z zakresu automatyki sterowania serwosilnik DC jest często wykorzystywany jako element wykonawczy systemu do tworzenia i badania procedur sterujących zgodnie z teorią sterowania. Do podstawowych powodów takiego postępowania należą:

1. Serwosilniki DC są szeroko stosowane jako napędy (elementy wykonawcze) w automatyce przemysłowej.
2. Serwosilniki DC są rzeczywistymi systemami najłatwiejszymi do sterowania.
3. Model serwosilnika DC jest bardzo prosty.
4. Serwosilnik DC charakteryzuje się dobrą liniowością, dlatego jest łatwy do sterowania.

Moduł ACS-18001 DC Servo Motor jest silnikiem prądu stałego z magnesami stałymi, w którym uzwojenie wzbudzenia stojana zastąpiono magnesami stałymi, stąd do sterowania silnikiem wykorzystywane jest uzwojenie wirnika (silnik dc sterowany wirnikiem). Dla uproszczenia założmy najpierw, że silnik DC PM jest systemem liniowym, w którym część nieliniowa została pominięta. Rysunek 10-1 przedstawia schemat zastępczy obwodu silnika prądu stałego z magnesami stałymi.



Rys. 10-1 Obwód zastępczy silnika DC PM

Zmienne i parametry występujące na rysunku 10-1 definiowane są jak niżej:

R_a = rezystancja zastępcza uzwojeń wirnika, Ω

L_a = indukcyjność zastępcza uzwojeń wirnika, H

K_i = stała momentu obrotowego, Nm/A

K_b = stała siły elektromotorycznej indukcji, Vs/rad

J_m = moment bezwładności silnika zredukowany do wirnika, kgm^2

B_m = współczynnik tarcia lepkiego zredukowany do wirnika, Nms/rad

$e_a(t)$ = napięcie zasilające wirnik silnika, V

$i_a(t)$ = prąd płynący w uzwojeniu silnika, A

$e_b(t)$ = siła elektromotoryczna (SEM) indukcji, V

$T_m(t)$ = moment obrotowy silnika, Nm

$T_L(t)$ = moment obciążenia, Nm

$\omega_m(t)$ = prędkość kątowa wału wirnika, rad/s

$\theta_m(t)$ = kąt obrotu wału wirnika, rad

Ponieważ uzwojeniem wzbudzenia stojana serwsilnika DC PM jest magnes stały, to strumień magnetyczny w szczeliny powietrznej $\phi(t)$ jest stały. Moment obrotowy silnika jest wprost proporcjonalny do strumienia magnetycznego w szczeliny powietrznej i prądu uzwojenia wirnika $i_a(t)$ i może być wyrażony równaniem:

$$T_m(t) = K\phi(t)i_a(t)$$

gdzie zarówno K , jak i $\phi(t)$ mają wartość stałą.

Niech

$$K_i = K\phi(t) = \text{stała momentu obrotowego}$$

Wtedy moment $T_m(t)$ może być opisany wyrażeniem

$$T_m(t) = K_i i_a(t)$$

Gdy wirnik silnika obraca się, to jego uzwojenie przecina linie sił pola magnetycznego, wytwarzając siłę elektromotoryczną indukcyjną oznaczoną na rysunku 10-1 jako $e_b(t)$. $e_b(t)$ jest proporcjonalna do prędkości obrotowej silnika i może być wyrażona równaniem

$$e_b(t) = K_b \omega_m(t) = K_b \frac{d\theta_m(t)}{dt}$$

Z punktu widzenia elektrycznego obwód zastępczy obwodu z rysunku 10-1 może być opisany wyrażeniem:

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} = e_a(t) - R_a i_a(t) - e_b$$

$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} e_a(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{1}{L_a} e_b$$

Z punktu widzenia mechanicznego moment dostarczany przez silnik $T_m(t)$ jest wykorzystywany do przewyciężenia momentu bezwładności silnika zredukowanego do wirnika J_m , momentu obciążającego $T_L(t)$ i współczynnika tarcia lepkiego B_m . W konsekwencji silnik prądu stałego może być opisany równaniem matematycznym:

$$\frac{d^2 \theta_m(t)}{dt^2} = \frac{1}{J_m} T_m(t) - \frac{1}{J_m} T_L(t) - \frac{B_m}{J_m} \frac{d\theta_m(t)}{dt}$$

Podsumowując powyższe rozważania, silnik prądu stałego z magnesami stałymi w całości opisują równania

$$T_m(t) = K_i i_a(t)$$

$$e_b(t) = K_b \omega_m(t) = K_b \frac{d\theta_m(t)}{dt}$$

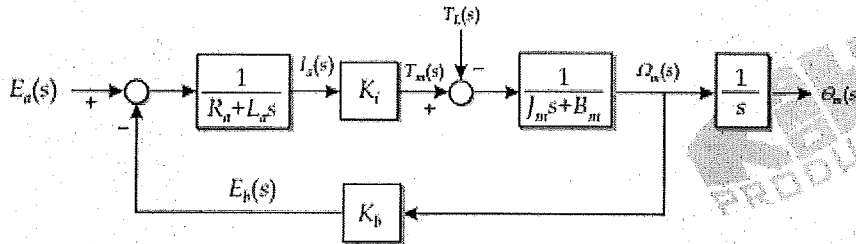
$$\frac{di_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} e_a(t) - \frac{R_a}{L_a} i_a(t) - \frac{1}{L_a} e_b$$

$$\frac{d^2 \theta_m(t)}{dt^2} = \frac{1}{J_m} T_m(t) - \frac{1}{J_m} T_L(t) - \frac{B_m}{J_m} \frac{d\theta_m(t)}{dt}$$

Przekształcając powyższe równania do dziedziny zespolonej (Laplace'a), otrzymujemy

$$\begin{aligned} T_m(s) &= K_i I_a(s) \\ E_b(s) &= K_b \Omega_m(s) = K_b s \Theta_m(s) \\ (L_a s + R_a) I_a(s) &= E_a(s) - E_b(s) \\ (J_m s^2 + B_m s) \Theta_m(s) &= T_m(s) - T_L(s) \end{aligned}$$

Na rysunku 10-2 przedstawiono schemat blokowy serwosilnika DC PM.



Rys. 10-2 Schemat blokowy silnika DC PM

Ze schematu obwodu zastępczego z rysunku 10-1 widzimy, że moc dostarczona do silnika DC wynosi

$$P_i(t) = e_a(t) i_a(t) \quad \text{watów}$$

Część mocy $P_i(t)$ jest przekształcana na energię mechaniczną, którą opisuje zależność

$$P_m(t) = e_b(t) i_a(t) \quad \text{watów}$$

Pod kątem mechanicznym energia mechaniczna może być opisana równaniem

$$P_m(t) = T_m(t) \omega_m(t) \quad \text{watów}$$

gdzie $T_m(t)$ jest mierzone w Nm, $\omega_m(t)$ w rad/s, a $P_m(t)$ w watach.

Ponieważ $e_b(t) = K_b \omega_m(t)$, $i_a(t) = \frac{T_m(t)}{K_i}$

$$P_m(t) = T_m(t) \omega_m(t) = K_b \omega_m(t) \frac{T_m(t)}{K_i} \quad \text{watów}$$

To $K_b = K_i$

Zakładając, że $T_L(t)=0$ i przekształcając powyższe równania, funkcja przejściowa serwosilnika DC PM może być wyrażona równaniami

$$\frac{\Omega_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_i}{L_a J_m s^2 + (R_a J_m + B_m L_a) s + (K_b K_i + R_a B_m)}$$

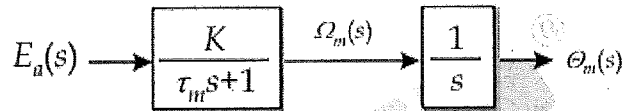
$$\frac{\Theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_i}{L_a J_m s^3 + (R_a J_m + B_m L_a) s^2 + (K_b K_i + R_a B_m) s}$$

gdzie

$$K = K_i / (K_b K_i + R_a B_m) = \text{stała wzmacnienia silnika}$$

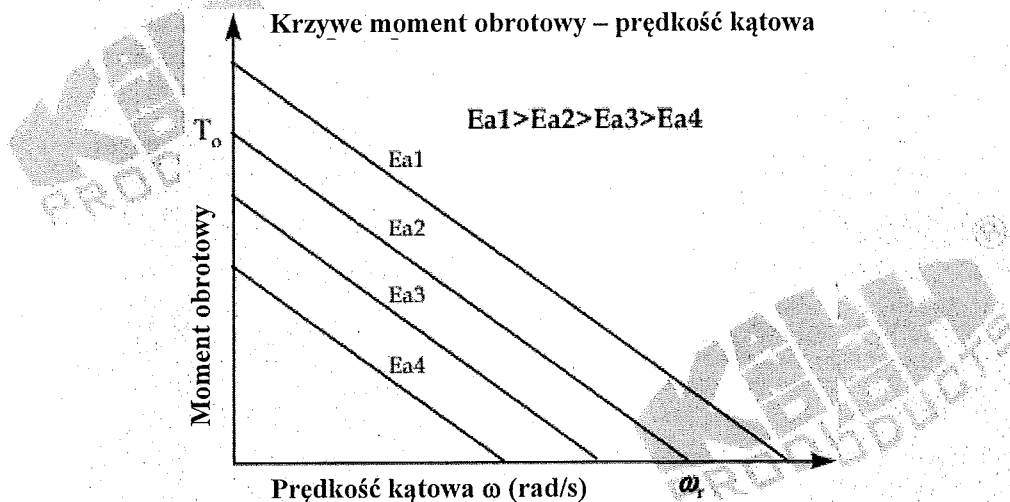
$$\tau_m = R_a J_m / (K_b K_i + R_a B_m) = \text{stała czasowa silnika}$$

W efekcie uproszczony schemat blokowy serwosilnika DC PM będzie wyglądał jak na rysunku 10-3.



Rys. 10-3 Uproszczony schemat blokowy silnika DC PM

Na koniec przedyskutujmy krzywe moment obrotowy – prędkość kątowna silnika prądu stałego. Krzywe moment-prędkość kątowna przy różnych napięciach na uzwojeniu wirnika pokazano na rysunku 10-4.



Rys. 10-4. Krzywe zależności momentu obrotowego od prędkości kątowej silnika DC PM

Na podstawie krzywych moment-prędkość kątowna stała momentu K_i i stała SEM indukcji K_b serwosilnika prądu stałego mogą być wyznaczone jak niżej:

1. Wyznaczanie K_b

W przypadku, gdy moment dostarczany przez silnik $T_m=0$, to przy napięciu zasilającym e_a i prędkości kątowej wirnika ω_m K_b spełnia zależność

$$K_b = \frac{e_a}{\omega_m}$$

Są dwa sposoby znalezienia prędkości kątowej silnika ω_m dla $T_m=0$:

- (1) Znaleźć wartość ω_m w punkcie przecięcia się krzywej moment-prędkość z osią X ($T_m=0$),
- (2) Podać na uzwojenie wirnika silnika napięcie e_a i obciążyć wał wirnika zewnętrznym momentem T_L takim, żeby $i_a=0$ (wtedy $T_m=0$). W takim przypadku prędkość wirnika jest szukaną prędkością kątowną ω_m .

2. Wyznaczanie K_i

W przypadku, gdy $\omega_m=0$ (wirnik jest nieruchomy), to przy napięciu zasilającym e_a i momencie wyjściowym silnika T_o , stała k jest definiowana zależnością:

$$k = \frac{T_o}{e_a}$$

Ponieważ wirnik nie obraca się, $e_b = K_b \omega_m = 0$ i e_a jest napięciem stałym, to nie ma spadku napięcia na indukcyjności L_a . Wtedy

$$T_o(t) = K_i i_a = K_i \frac{e_a}{R_a} = e_a \frac{K_i}{R_a}$$

Z tych dwóch powyższych równań otrzymujemy

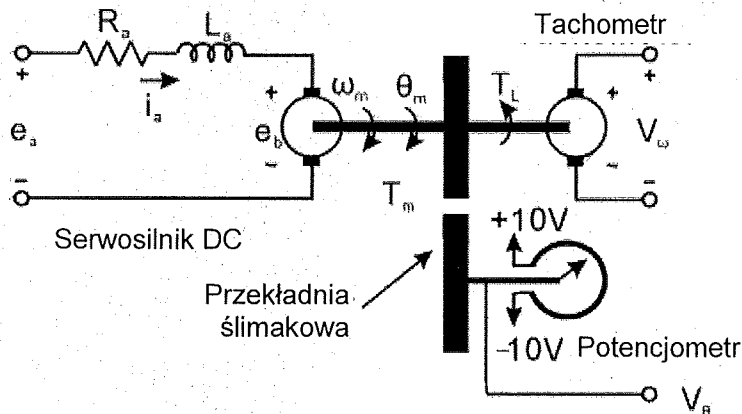
$$K_i = kR_a$$

Są dwa sposoby znalezienia momentu obrotowego silnika T_o w przypadku, gdy $\omega_m=0$:

- (1) Znaleźć wartość T_o w punkcie przecięcia się krzywej moment-prędkość z osią Y ($\omega_m=0$),
- (2) Podać na uzwojenie wirnika silnika napięcie e_a i obciążyć wał wirnika zewnętrznym momentem T_L takim, żeby $\omega_m=0$ (wirnik nie obraca się). W takim przypadku moment obrotowy silnika jest równy momentowi obciążenia, czyli $T_o=T_L$.

Możliwość bezpośrednich pomiarów prędkości kątovej $\omega_m(t)$ i kąta obrotu $\theta_m(t)$ z serwo-silnika i jego współczynników nieliniowych nie była brana pod uwagę w procesie różniczkowania funkcji przejściowej serwo-silnika prądu stałego z magnesami stałymi.

Moduł ACS-18001 DC Servo Motor & Control Unit zawiera silnik prądu stałego (Dc) z magnesami stałymi (PM), tachometr, przekładnię ślimakową, potencjometr detekcji kąta i obciążenie wiropądowe do hamowania silnika. Rysunek 10-5 prezentuje budowę modułu ACS-18001.



Rys. 10-5 Budowa modułu ACS-18001

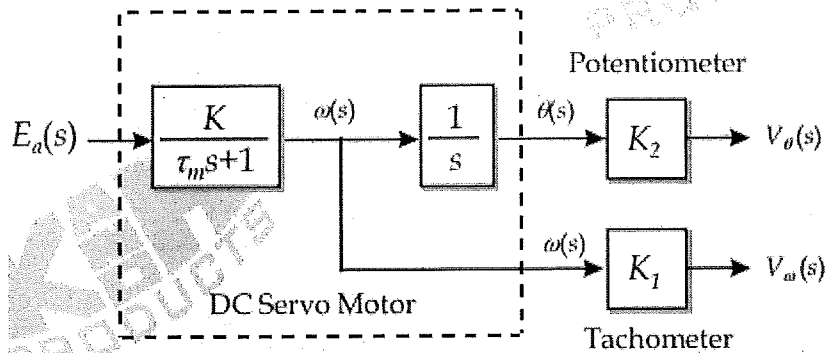
Ponieważ tachometr modułu połączony jest sztywno z wałkiem silnika, to obraca się z tą samą prędkością co wirnik silnika. Tachometr jest praktycznie prądnicą prądu stałego, która generuje napięcie proporcjonalne do prędkości kątovej silnika. Jeżeli napięcie generowane przez tachometr oznaczymy jako $V_m(s)$ i prędkość silnika jako $\omega(s)$, to transmitancję tachometru można wyrazić zależnością:

$$\frac{V_m(s)}{\omega(s)} = K_1$$

Detektor kąta położenia wałka jest potencjometrem o kącie obrotu 360° . W celu ochrony przed uszkodzeniem prędkość obrotowa potencjometru jest redukowana przez przekładnię ślimakową. Funkcja przejściowa potencjometru jest wyrażana zależnością:

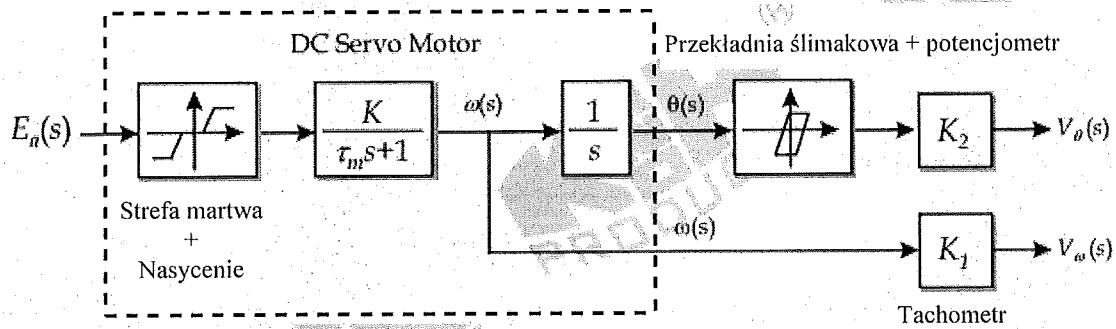
$$\frac{V_\theta(s)}{\theta(s)} = K_2$$

Zatem schemat blokowy modułu ACS-18001 ma postać jak na rysunku 10-6.



Rys. 10-6 Schemat blokowy modułu serwoilnika ACS-18001

Schemat blokowy z rysunku 10-6 traktuje serwoilnik DC jako system liniowy. W praktyce serwoilnik ma współczynniki nieliniowe, jak: luzy, strefy martwe i zjawisko nasycenia. Po dodaniu czynników nieliniowych systemu zmodyfikowany schemat blokowy modułu ACS-18001 będzie miał postać jak na rysunku 10-7.

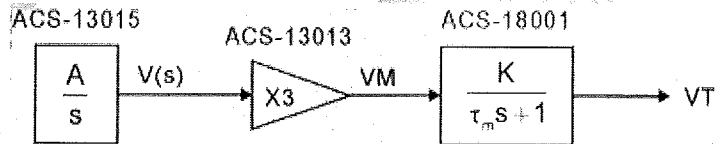


Rys. 10-7 Schemat blokowy systemu sterowania serwoilnikiem DC w układzie otwartej pętli

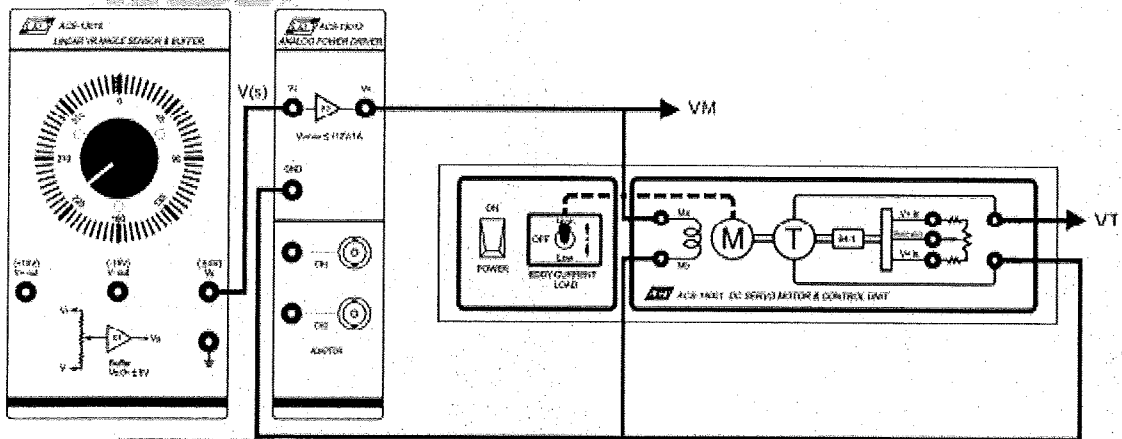
PROCEDURA

A. Znajdowanie strefy martwej serwo silnika DC, wzmocnienia K_s oraz współczynnika K funkcji przejściowej

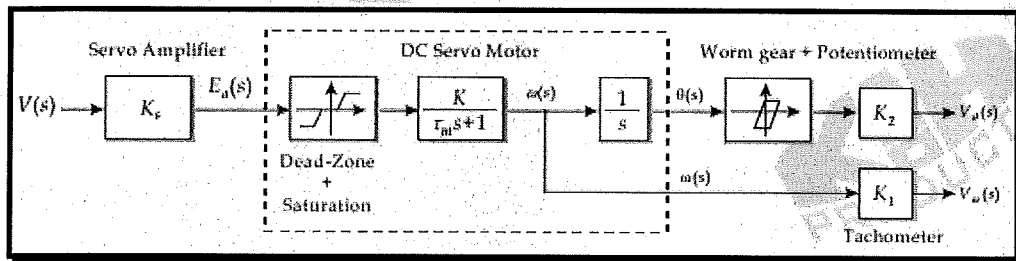
1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 10-8.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń



(c) Schemat blokowy modułu ACS-18001

Rys. 10-8

2. W module ACS-13005 regulować pokrętkiem ustawiania kąta od 180° ze skokiem co 10 stopni. Gdy serwo silnik będzie się obracać w sposób stabilny, zmierzyć i zanotować napięcia VM i VT.
3. Narysować krzywą VT-VM, odkładając zanotowaną wartość napięcia VM na osi X, a wartość napięcia VT na osi Y. Pojawienie się napięcia VT oznacza, że odpowiadające mu napięcie VM jest punktem krytycznym strefy martwej serwo silnika.
4. Aby znaleźć wartość K w liczniku funkcji przejściowej serwo silnika, dla wygody łącząc funkcje przejściowe silnika i tachometru, otrzymujemy:

$$\frac{VT}{VM} = \frac{V_\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K'}{\tau_m s + 1}, \quad K' = K \times K_1$$

5. Ustawić VM na 10V. Gdy serwosilnik obraca się w sposób stabilny, zmierzyć i zanotować napięcia $V(s)$, VM i VT oraz obliczyć współczynniki K' i K_s zgodnie z poniższymi zależnościami:

$$\frac{VT}{VM} (\text{stan ustalony}) = K'$$

$$\frac{VM}{V(s)} = K_s$$

6. Zmierzyć prędkość obrotową serwosilnika $\omega_{rpm}(s)$ i obliczyć K_1 z zależności:

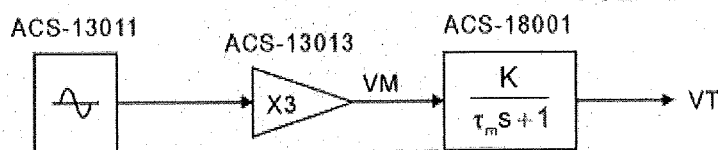
$$\frac{VT}{\omega_{rpm}(s)} \frac{360}{2\pi} = K' \approx 0,34$$

7. Obliczyć współczynnik K licznika funkcji przejściowej serwosilnika DC, podstawiając K' i K_1 do poniższego równania:

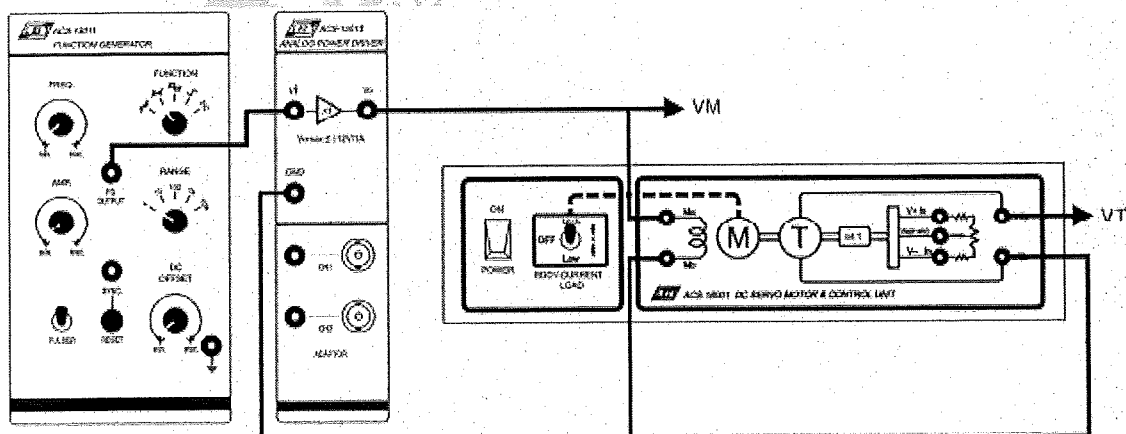
$$\frac{K'}{K_1} = K$$

B. Znajdowanie współczynnika τ_m w mianowniku funkcji przejściowej serwosilnika DC

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 10-9.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 10-9

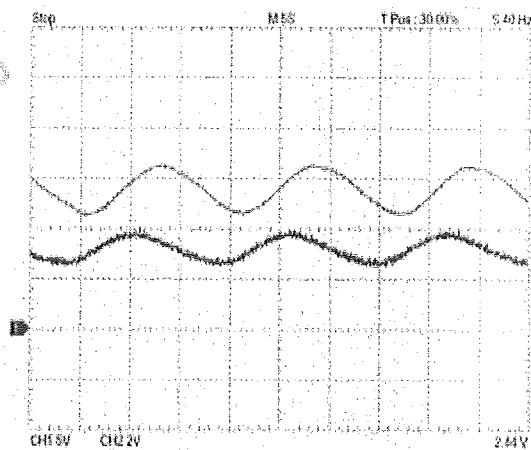
2. Na wyjściu FG OUTPUT modułu ACS-13011 ustawić przebieg sinusoidalny o częstotliwości 0,16Hz ($\omega=1$) i amplitudzie 1Vpp (poziom niski = 2V).

- Zmierzyć napięcia międzyszczytowe VM i VT, jak pokazano na rysunku 10-10. Obliczyć wzmocnienie serwosilnika K_{mag} z zależności:

$$K_{mag} = \frac{VT}{VM}$$

- Zmienić częstotliwość wyjściową modułu ACS-13011, aby uzyskać wzmocnienie K_{mag} serwosilnika DC równe 0,7K'. Zmierzyć i zanotować częstotliwość f.
- Wykorzystując zanotowaną częstotliwość f, obliczyć współczynnik τ_m z zależności:

$$\tau_m = \frac{1}{2\pi f} = \frac{\quad}{\quad}$$



Rys. 10-10 $f=0,07\text{Hz}$, $K_{mag}=1,7$

Ćwiczenie 11 Regulator proporcjonalny

CEL ĆWICZEŃ

1. Poznanie działania regulatora proporcjonalnego w różnych systemach sterowania.
2. Symulacja regulatora proporcjonalnego wykorzystanego w układzie zamkniętej pętli w obwodzie sterowania prędkością serwośilnika prądu stałego.
3. Symulacja regulatora proporcjonalnego wykorzystanego w układzie zamkniętej pętli w obwodzie sterowania położeniem serwośilnika prądu stałego.

PODSTAWY TEORETYCZNE

Regulator PID (ang. *Proportional-Integral-Derivative*) jest jednym z najszerzej stosowanych regulatorów w automatyce przemysłowej. W poniższym ćwiczeniu do przestudiowania działania regulatora proporcjonalnego (ang. *P controller*) w systemie regulacji wykorzystamy odpowiedź systemu na pobudzenie skokiem jednostkowym.

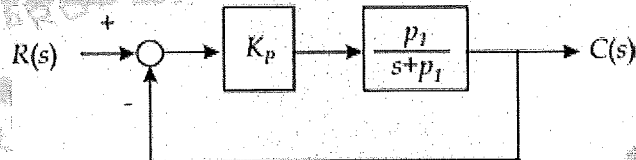
1. Obiekty pierwszego rzędu

Obiekty pierwszego rzędu można podzielić na dwa typy:

- (1) System typu 0

$$G(s) = \frac{p_1}{s + p_1}$$

Gdy regulator P jest włączony w system, to schemat blokowy takiego systemu będzie miał postać jak na rysunku 11-1.



Rys. 11-1 Schemat blokowy systemu pierwszego rzędu typu 0 z regulatorem P

Wtedy funkcja przejściowa układu z otwartą pętlą będzie wyrażona zależnością

$$G(s) = \frac{K_p p_1}{s + p_1}$$

a funkcja przejściowa układu z zamkniętą pętlą będzie wyrażona zależnością

$$M(s) = \frac{K_p p_1}{s + (1 + K_p) p_1}$$

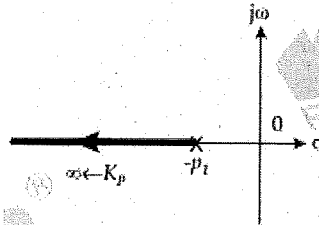
Dla pobudzenia skokiem jednostkowym $u_s(t)$ rozważmy najpierw uchyb ustalony e_{ss} w systemie typu 0 z regulatorem proporcjonalnym. Z definicji uchybu ustalonego mamy

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K_p}$$

Jest oczywiste, że zwiększanie wartości K_p powoduje zmniejszenie uchybu ustalonego e_{ss} w systemie typu 0. Rozważmy teraz odpowiedź w stanie nieustalonym. Z funkcji przejściowej układu z zamkniętą pętlą wiemy, że biegun p systemu jest równy

$$p = -(1 + K_p)p_1$$

Z powyższego równania wynika, że zwiększanie wartości K_p powoduje oddalanie się bieguna od środka układu współrzędnych (patrz lokalizacja pierwiastka na rysunku 11-2), czyli odpowiedź układu staje się szybsza.



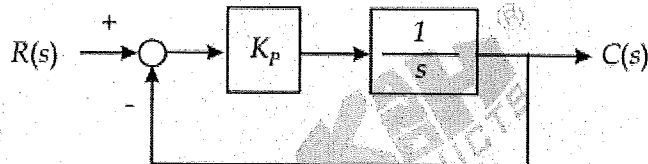
Rys. 11-2 Wykres położenia pierwiastka funkcji przejściowej

Jak powiedziano wyżej, im większa jest wartość K_p , tym szybsza jest odpowiedź systemu i mniejszy jest uchyb ustalony, jednakże uchyb w stanie ustalonym w tym systemie istnieje zawsze, chyba że $K_p = \infty$.

(2) System typu 1

$$G(s) = \frac{1}{s}$$

Rysunek 11-3 przedstawia schemat blokowy systemu typu 1 z regulatorem proporcjonalnym.



Rys. 11-3 Schemat blokowy systemu pierwszego rzędu typu 1 z regulatorem P

W tym przypadku funkcja przejściowa układu z otwartą pętlą ma postać

$$G(s) = \frac{K_p}{s}$$

a funkcja przejściowa układu z zamkniętą pętlą będzie wyrażona zależnością

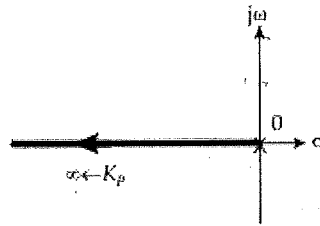
$$M(s) = \frac{K_p}{s + K_p}$$

Dla systemu bez regulatora P $e_{ss} = 0$ zgodnie z równaniem opisującym uchyb ustalony. Z regulatorem proporcjonalnym typ obiektu nie ulega zmianie i żaden uchyb w stanie ustalonym nie powstaje.

Z funkcji przejściowej układu z zamkniętą pętlą widzimy, że biegun p systemu jest równy

$$p = -K_p$$

Zwiększanie wartości K_p powoduje oddalanie się bieguna od środka układu współrzędnych (patrz rysunek 11-4), zatem odpowiedź układu staje się szybsza.



Rys. 11-4 Wykres położenia pierwiastka funkcji przejściowej

Jak powiedziano wyżej, odpowiedź takiego systemu nie zawiera uchybu ustalonego, zatem K_p nie ma wpływu na powstawanie tego błęd. Im większa jest wartość K_p , tym szybsza jest odpowiedź systemu.

Na podstawie powyższych rozważań można stwierdzić, że regulator proporcjonalny P w systemach pierwszego rzędu ma wpływ na:

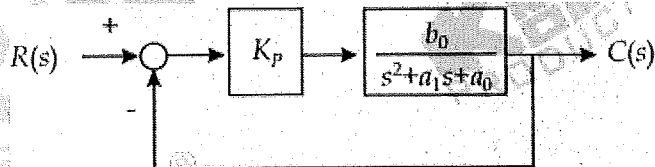
- (a) Charakterystykę czasową
Im większa jest wartość K_p , tym szybsza jest odpowiedź systemu.
- (b) Uchyb ustalony przy pobudzeniu skokiem jednostkowym
Jeżeli system oryginalny ma uchyb ustalony, to zwiększanie wartości K_p zmniejsza ten uchyb, przy czym uchyb ustalony zawsze istnieje, chyba że $K_p = \infty$. Im większa jest wartość K_p , tym szybsza jest odpowiedź systemu. Jeżeli w systemie oryginalnym (bez regulatora) uchyb w stanie ustalonym nie istnieje, to wielkość K_p , z oczywistych względów, nie ma żadnego wpływu na uchyb ustalony.

2. Obiekty drugiego rzędu

Obiekty drugiego rzędu można podzielić na trzy typy:

(1) System typu 0

Rysunek 11-5 przedstawia schemat blokowy systemu typu 0 z regulatorem P.



Rys. 11-5 Schemat blokowy systemu drugiego rzędu typu 0 z regulatorem P

Funkcja przejściowa układu z otwartą pętlą jest wyrażona zależnością

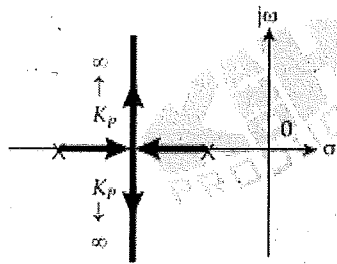
$$G(s) = \frac{K_p b_0}{s^2 + a_1 s + a_0}$$

a funkcja przejściowa układu z zamkniętą pętlą jest wyrażona zależnością

$$M(s) = \frac{K_p b_0}{s^2 + a_1 s + (a_0 + K_p b_0)}$$

Ponadto system typu 0 może być podzielony na trzy typy:

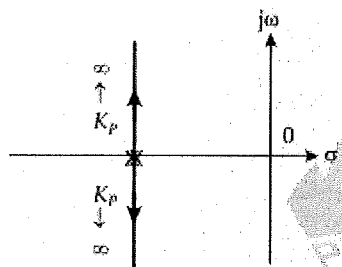
- (a) Dwa pierwiastki są rzeczywiste i różne
Położenie pierwiastków pokazano na rysunku 11-6.



Rys. 11-6 Wykres położenia pierwiastków (dwa pierwiastki rzeczywiste i różne)

(b) Dwa pierwiastki są rzeczywiste i równe

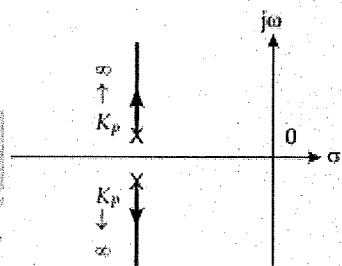
Położenie pierwiastków pokazano na rysunku 11-7.



Rys. 11-7 Wykres położenia pierwiastków (dwa pierwiastki rzeczywiste i równe)

(c) Dwa pierwiastki są zespolone i sprzężone

Położenie pierwiastków pokazano na rysunku 11-8.



Rys. 11-8 Wykres położenia pierwiastków (dwa pierwiastki zespolone i sprzężone)

Przedyskutujmy teraz uchyb ustalony e_{ss} z funkcji przejściowej układu z otwartą pętlą.

Z definicja uchybu ustalonego otrzymujemy

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + (K_p b_0 / a_0)}$$

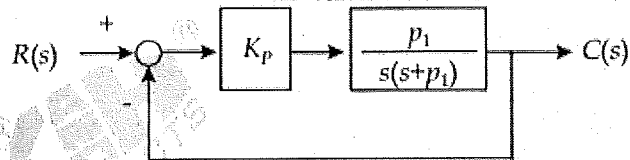
Jak łatwo zauważyć im większa wartość K_p , tym mniejszy uchyb ustalony.

Rozważmy teraz odpowiedź systemu w układzie z zamkniętą pętlą, przyjmując $a_1 = 2\zeta\omega_n$ i $a_0 + K_p b_0 = \omega_n^2$. Ponieważ a_1 , a_0 i b_0 są współczynnikami obiektu, to są one stałe. K_p jest regulowanym wzmocnieniem regulatora P, zatem im większe K_p , tym większa częstotliwość drgań własnych ω_m i dodatkowo, ponieważ $2\zeta\omega_n$ ma wartość stałą, to im większa jest ω_n , tym mniejsze tłumienie ζ . Z własność systemu drugiego rzędu wynika, że im większa częstotliwość drgań własnych ω_m , to tym większa jest szybkość odpowiedzi, jednocześnie wielkość współczynnika tłumienia ζ wpływa nie tylko na szybkość odpowiedzi, ale również powoduje przerosty w krzywej odpowiedzi systemu. Im mniejsza wartość ζ , tym szybsza odpowiedź systemu i większy przerost charakterystyki. Jak wynika z powyższej dyskusji im większa wartość K_p , tym szybsza odpowiedź systemu, większy przerost charakterystyki i mniejszy uchyb ustalony.

(2) System typu 1

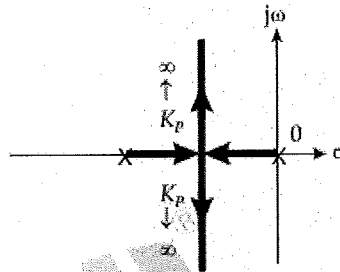
$$G(s) = \frac{p_1}{s(s + p_1)}$$

Schemat blokowy systemu typu 1 z regulatorem P pokazano na rysunku 11-9.



Rys. 11-9 Schemat blokowy systemu drugiego rzędu typu 1 z regulatorem P

Rysunek 11-10 przedstawia położenie pierwiastków tego systemu.



Rys. 11-10 Wykres położenia pierwiastków

W tym przypadku funkcja przejściowa układu z otwartą pętlą ma postać

$$G(s) = \frac{K_p p_1}{s(s + p_1)}$$

a funkcja przejściowa układu z zamkniętą pętlą będzie wyrażona zależnością

$$M(s) = \frac{K_p p_1}{s^2 + p_1 s + K_p p_1}$$

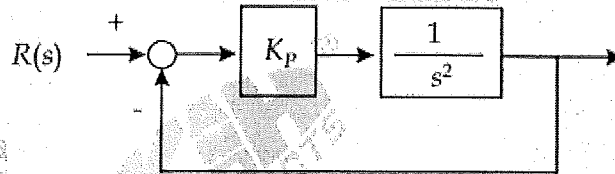
Dla systemu bez regulatora P $e_{ss} = 0$ zgodnie z równaniem opisującym uchyb ustalony. Z regulatorem proporcjonalnym typ obiektu nie ulega zmianie i żaden uchyb w stanie ustalonym nie powstaje.

Rozważmy teraz odpowiedź systemu w układzie z zamkniętą pętlą, przyjmując $p_1 = 2\zeta\omega_n$ i $K_p p_1 = \omega_n^2$. Ponieważ p_1 jest współczynnikiem obiektu, to jest on stały. K_p jest regulowanym wzmocnieniem regulatora P, zatem im większe K_p , tym większa częstotliwość drgań własnych ω_m i dodatkowo, ponieważ $2\zeta\omega_n$ ma wartość stałą, to im większa jest ω_n , tym mniejsze tłumienie ζ . Innymi słowy, im większe K_p , tym większa ω_m i mniejszy współczynnik tłumienia ζ . Z własności systemu drugiego rzędu wynika, że im większa częstotliwość drgań własnych ω_m , to tym większa jest szybkość odpowiedzi, jednocześnie wielkość współczynnika tłumienia ζ wpływa nie tylko na szybkość odpowiedzi, ale również powoduje przerosty w krzywej odpowiedzi systemu. Im mniejsza wartość ζ , tym szybsza odpowiedź systemu i większy przerost charakterystyki. Jak wynika z powyższej dyskusji im większa wartość K_p , tym szybsza odpowiedź systemu i większy przerost charakterystyki. Ten rodzaj systemu nie ma uchybu ustalonego.

(2) System typu 2

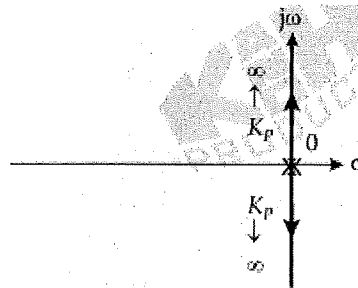
$$G(s) = \frac{1}{s^2}$$

Schemat blokowy systemu typu 2 z regulatorem P pokazano na rysunku 11-11.



Rys. 11-11 Schemat blokowy systemu drugiego rzędu typu 2 z regulatorem P

Rysunek 11-12 przedstawia położenie pierwiastków tego systemu.



Rys. 11-12 Wykres położenia pierwiastków

W tym przypadku funkcja przejściowa układu z otwartą pętlą ma postać

$$G(s) = \frac{K_p}{s^2}$$

a funkcja przejściowa układu z zamkniętą pętlą będzie wyrażona zależnością

$$M(s) = \frac{K_p}{s^2 + K_p}$$

Przy pobudzeniu skokiem jednostkowym $u_s(t)$ system będzie oscylował, a częstotliwość oscylacji będzie determinowana przez K_p . Zależność między częstotliwością oscylacji ω a K_p opisywana jest zależnością $\omega^2 = K_p$. Im większa wartość K_p , tym większa częstotliwość.

Na podstawie powyższych rozważań można stwierdzić, że regulator proporcjonalny P w systemach drugiego rzędu wpływa na:

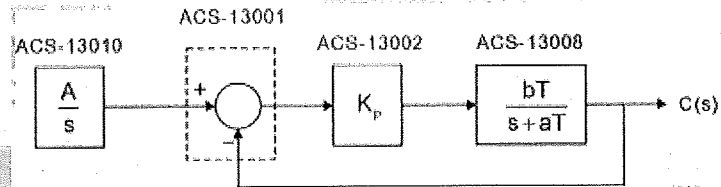
- (a) Charakterystykę czasową
Im większa wartość K_p , tym szybsza jest odpowiedź systemu. Przy wzroście K_p do określonej wartości pojawia się przerost w charakterystyce.
- (b) Uchyb ustalony przy pobudzeniu skokiem jednostkowym
Jeżeli system oryginalny ma uchyb ustalony, to zwiększanie wartości K_p zmniejsza ten uchyb, przy czym uchyb ustalony zawsze istnieje, chyba że $K_p = \infty$. Jeżeli w systemie oryginalnym (bez regulatora) uchyb w stanie ustalonym nie istnieje, to wielkość K_p , z oczywistych względów, nie ma żadnego wpływu na uchyb ustalony.

PROCEDURA

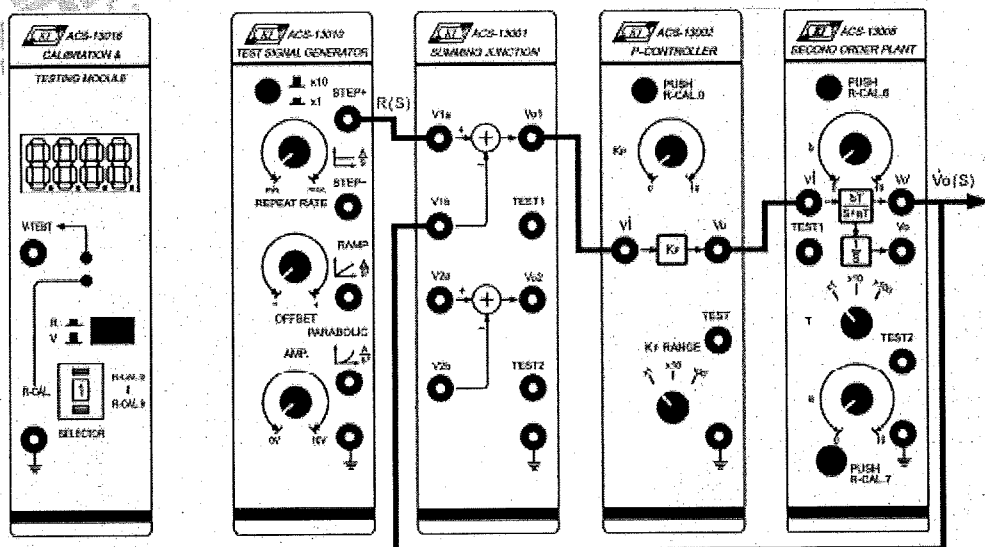
W ćwiczeniu wykorzystano moduł obiektu drugiego rzędu ACS-13008 do symulacji serwosilnika DC.

A. Regulator P w układzie sterowania prędkością serwosilnika z zamkniętą pętlą.

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 11-13.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 11-13

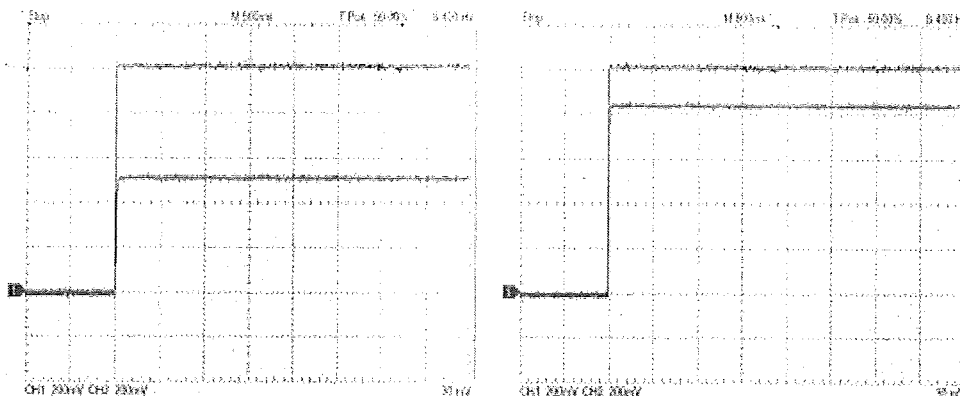
2. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,05Hz.
3. W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x10, a stałe a i b ustawić na wartość 5. W takim przypadku funkcja przejściowa systemu jest równa:

$$G_p(s) = \frac{50}{s + 50}$$

a funkcja przejściowa układu z zamkniętą pętlą

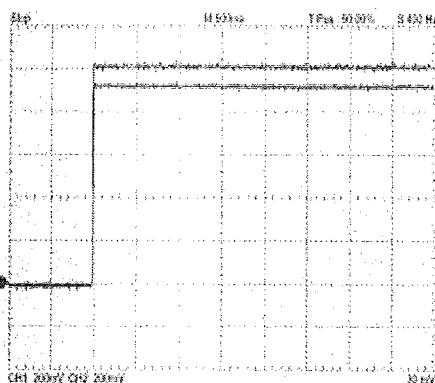
$$M(s) = \frac{50K_p}{s + (50 + 50K_p)}$$

4. W module ACS-13002 ustawić $K_p=1$. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_o modułu ACS-13008, które pokazano na rys. 11-14(a).



(a) $K_p=1$

(b) $K_p=5$



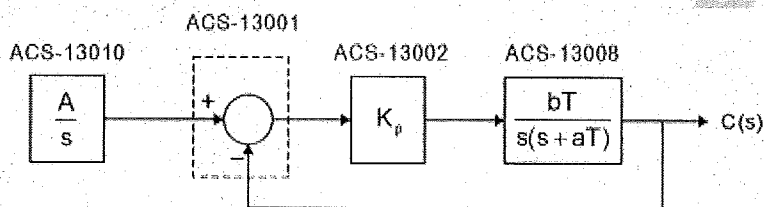
(c) $K_p=10$

Rys. 11-14 Odpowiedź na skok jednostkowy

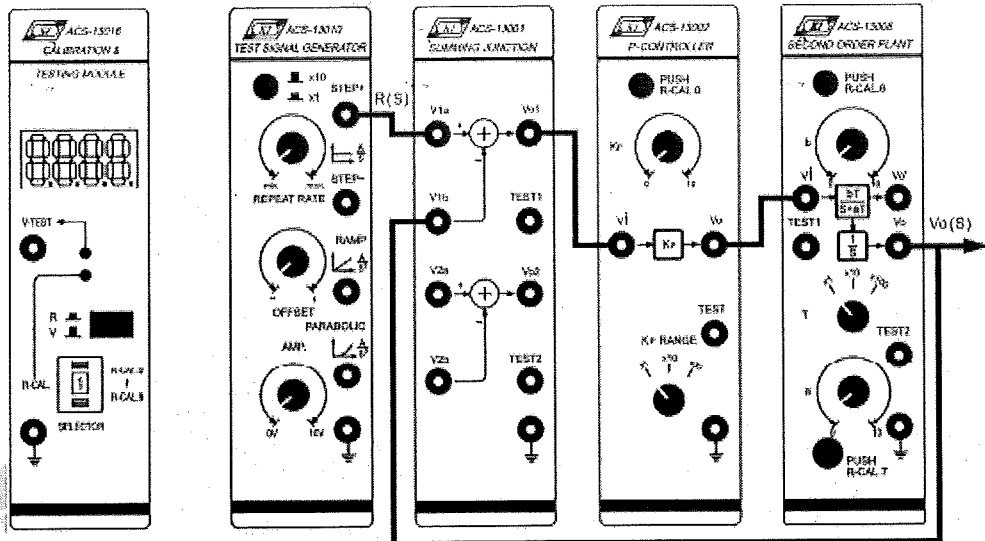
5. Powtórzyć punkt 4 dla $K_p=5$ i zanotować wyniki, które pokazano na rysunku odpowiednio 11-14(b) i 11-14(c).
6. Porównać zanotowane wartości uchybu ustalonego i charakterystyki czasowe dla różnych wartości K_p .

B. Regulator P w układzie kontroli położenia serwosilnika z zamkniętą pętlą.

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 11-15.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 11-15

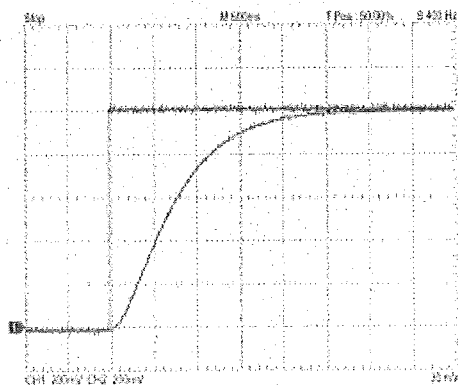
- W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,05Hz.
- W module ACS-13008 ustawić przełącznik T na pozycji x1, a stałe a i b ustawić na wartość 5. W takim przypadku funkcja przejściowa systemu jest równa:

$$G_p(s) = \frac{5}{s(s+5)}$$

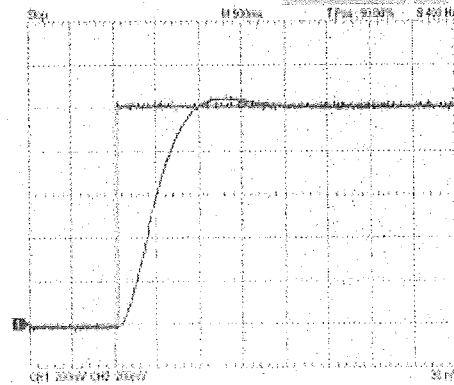
a funkcja przejściowa układu z zamkniętą pętlą

$$M(s) = \frac{5K_p}{s^2 + 5s + 5K_p}$$

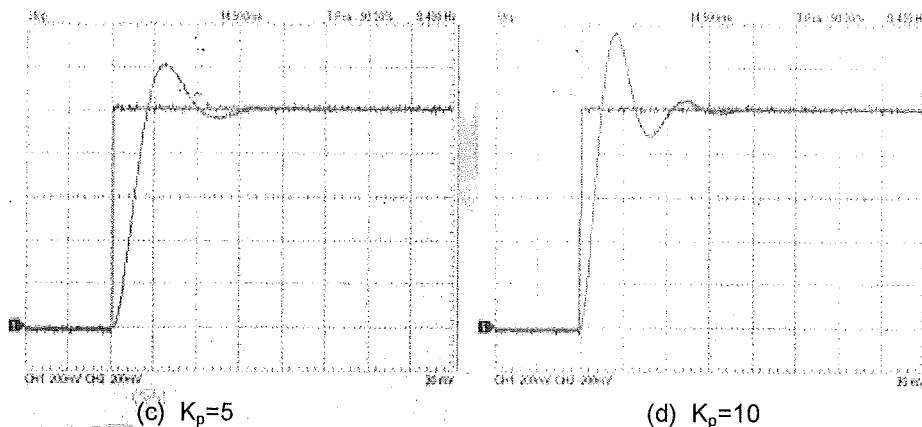
- W module ACS-13002 ustawić $K_p=1$. Za pomocą oscyloskopu zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 i V_0 modułu ACS-13008, które pokazano na rys. 11-16(a).
- Powtórzyć punkt 4 dla $K_p=2, 5$ i 10 oraz zanotować wyniki, które pokazano na rysunku odpowiednio 11-16(b), 11-16(c) i 11-16(d).
- Porównać zanotowane wartości uchybu ustalonego i charakterystyki czasowe dla różnych wartości K_p .



(a) $K_p=1$



(b) $K_p=2$

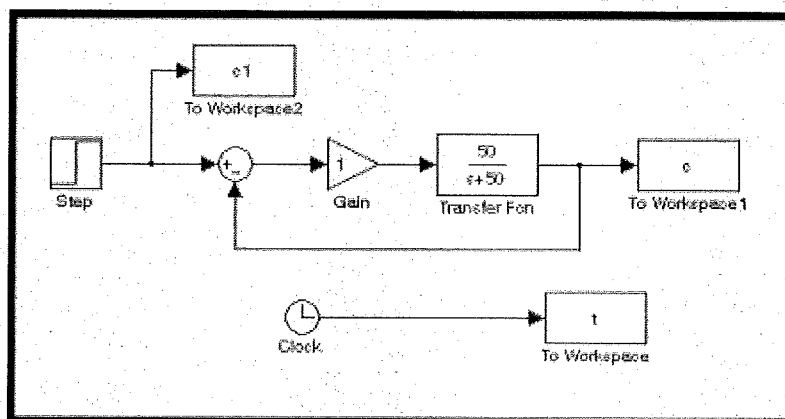


Rys. 11-16 Odpowiedź na skok jednostkowy

SYMULACJA SIMULINK

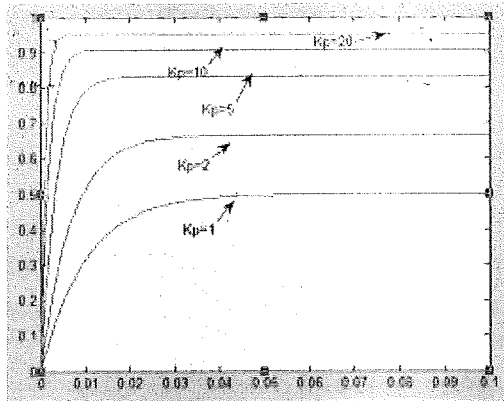
A. Regulator P w układzie sterowania prędkością serwośilnika z zamkniętą pętlą.

1. Otworzyć okno poleceń programu MATLAB.
2. W oknie poleceń MATLAB wpisać simulink < J >.
3. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 11-17.



Rys. 11-17

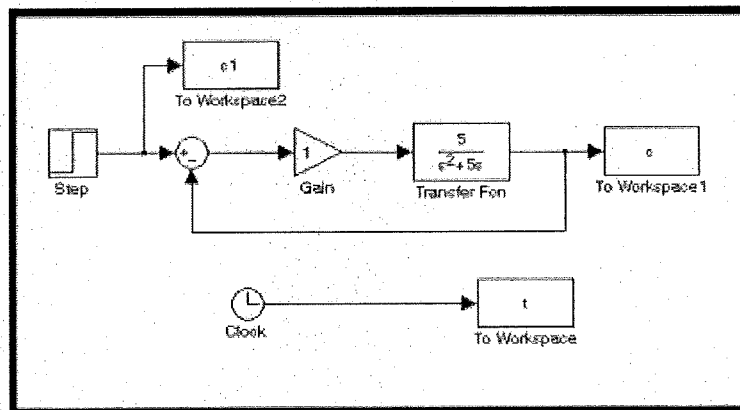
4. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 0.
5. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 0,1.
6. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_11_1.mdl.
7. Uruchomić symulację odpowiedzi na skok jednostkowy dla różnych wartości K_p , zmieniając wartość wzmocnienia bloku Gain kolejno na 1, 2, 5, 10 i 20, aby uzyskać wyniki jak na rysunku 11-18.



Rys. 11-18

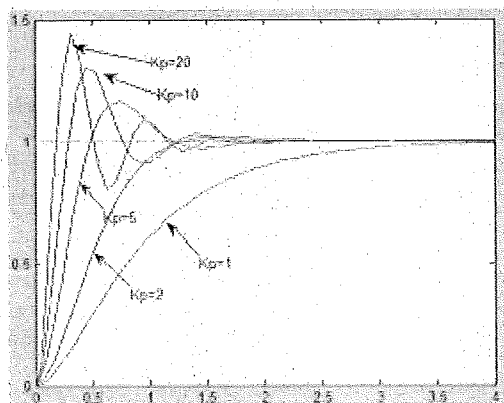
B. Regulator P w układzie kontroli położenia serwosilnika z zamkniętą pętlą.

1. W oknie roboczym narysować schemat blokowy, jak na rysunku 11-19.



Rys. 11-19

2. Wartość końcową bloku Step ustawić na 1 i czas skoku na 0.
3. Wybrać polecenie Simulation/Configuration Parameters i w oknie dialogowym ustawić czasu symulacji zmienić czas Stop na 4,0.
4. Zapisać schemat blokowy pod nazwą Experiment_11_2.mdl.
5. Uruchomić symulację odpowiedzi na skok jednostkowy dla różnych wartości K_p , zmieniając wartość wzmocnienia bloku Gain kolejno na 1, 2, 5, 10 i 20, aby uzyskać wyniki jak na rysunku 11-20.



Rys. 11-20

Ćwiczenie 12 Zastosowanie regulatora P do kontroli prędkości i położenia serwo silnika prądu stałego

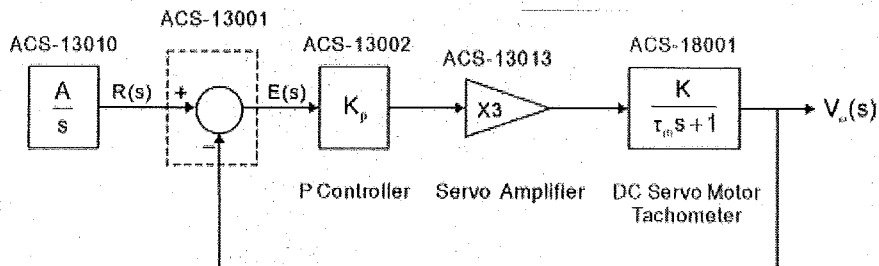
CEL ĆWICZEŃ

1. Poznanie zasady działania systemu kontroli prędkości i położenia serwo silnika DC PM.
2. Budowa praktycznego układu sterowania prędkością obrotową serwo silnika prądu stałego z regulatorem proporcjonalnym.
3. Budowa praktycznego układu sterowania położeniem kątowym serwo silnika prądu stałego z regulatorem proporcjonalnym.

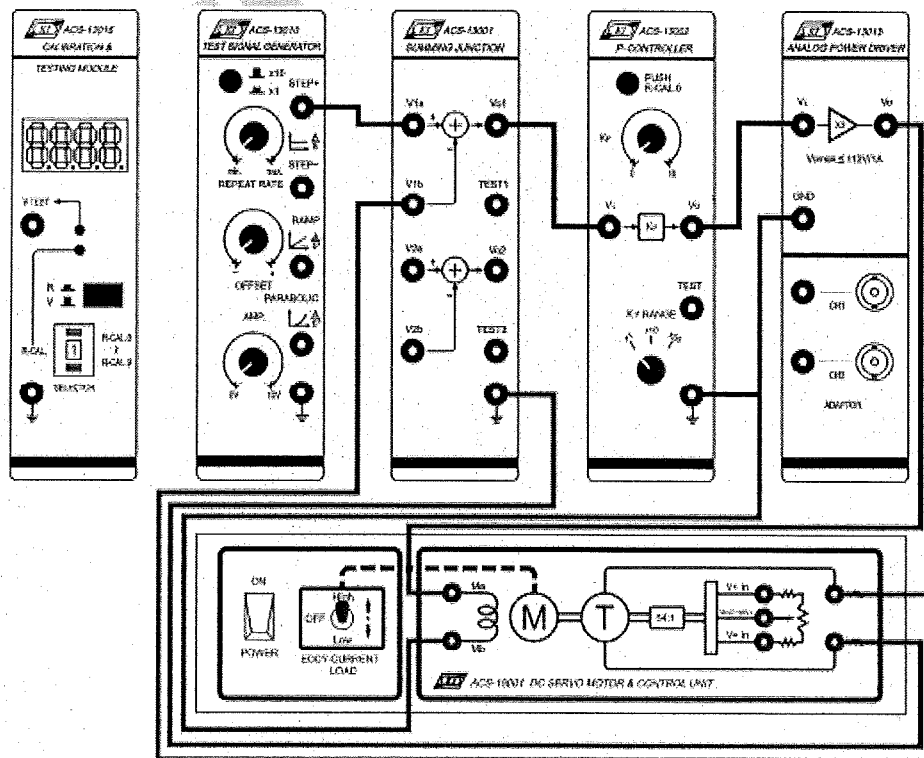
PROCEDURA

A. Regulator P w układzie sterowania prędkością serwo silnika z zamkniętą pętlą.

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 12-1.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 12-1

2. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp (poziom niski = 2V) i częstotliwości 0,05Hz;
3. Uproszczona funkcja przejściowa serwosilnika prądu stałego $G_m(s)$ jest wyrażana zależnością:

$$G_m(s) = \frac{V_\omega(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{\tau_m s + 1}$$

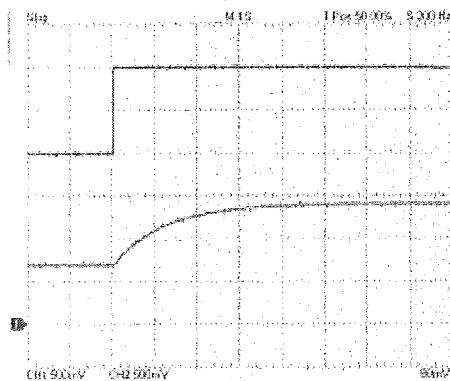
Zlinearyzowana funkcja przejściowa układu z zamkniętą pętlą $M(s)$ opisywana jest wtedy zależnością

$$M(s) = \frac{V_\omega(s)}{R(s)} = \frac{3K_p K}{\tau_m s + (1 + 3K_p K)}$$

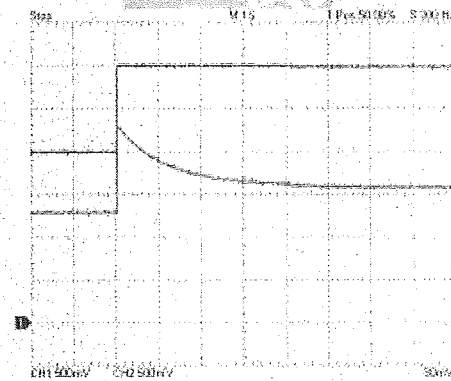
4. W module ACS-13002 ustawić $K_p=1$. Zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 ($R(s)$) i VTa (prędkość $V_\omega(s)$) modułu ACS-13001, które pokazano na rys. 12-2(a). Zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 ($R(s)$) i V_{o1} (uchyb ustalony $E(s)$) modułu ACS-13001, które pokazano na rys. 12-2(b).

Uwaga: Zbyt duża wartość K_p spowoduje niestabilność systemu.

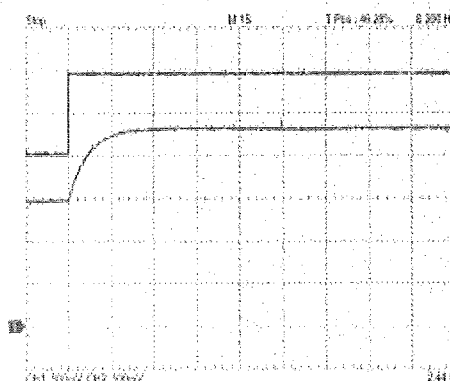
5. Powtórzyć punkt 4 dla $K_p=3$ i zanotować wyniki, które pokazano na rysunku odpowiednio 12-2(c) i 12-2(d). Porównać zanotowane wartości uchybu ustalonego i krzywe odpowiedzi dla różnych wartości K_p .



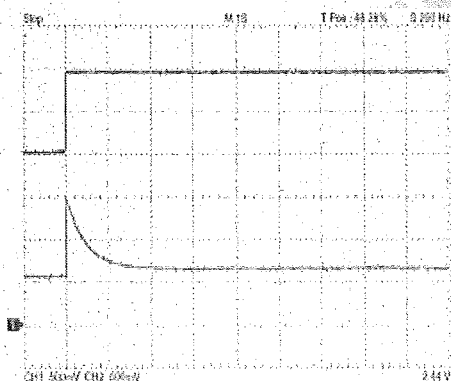
(a) $K_p=1$, prędkość $V_\omega(s)$



(b) $K_p=1$, uchyb ustalony $E(s)$



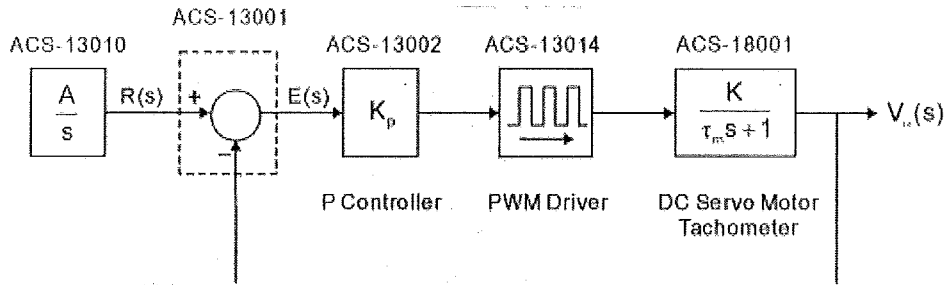
(c) $K_p=3$, prędkość $V_\omega(s)$



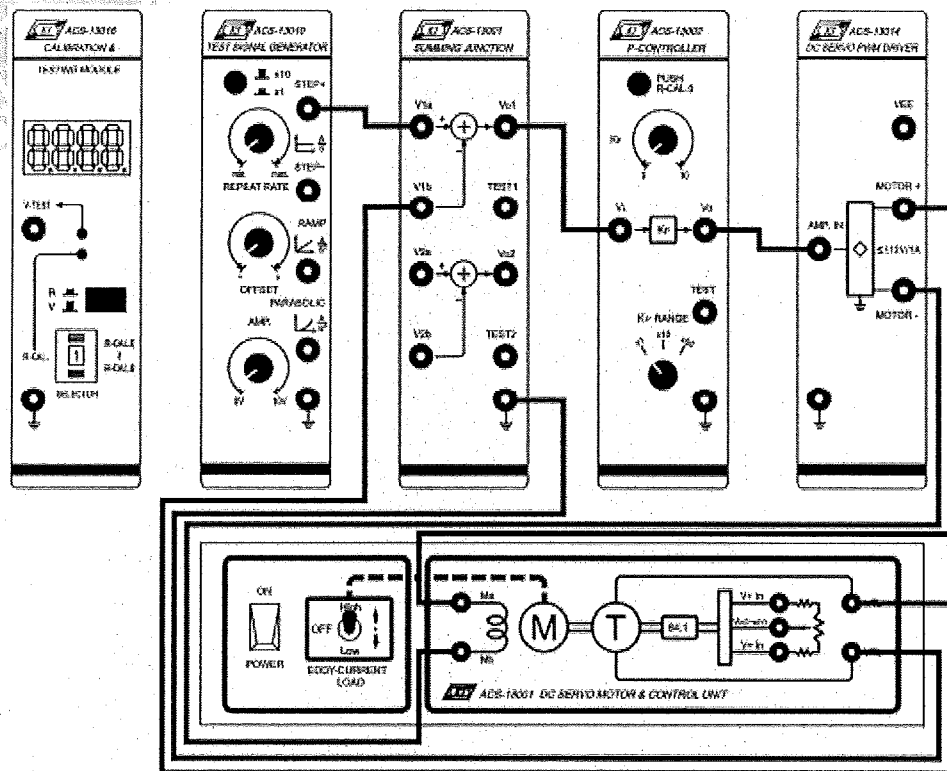
(d) $K_p=3$, uchyb ustalony $E(s)$

Rys. 12-2

6. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 12-3. W tym układzie sterownik analogowy ACS13013 zastąpiony jest sterownikiem PWM ACS-13014.



(a) Schemat blokowy

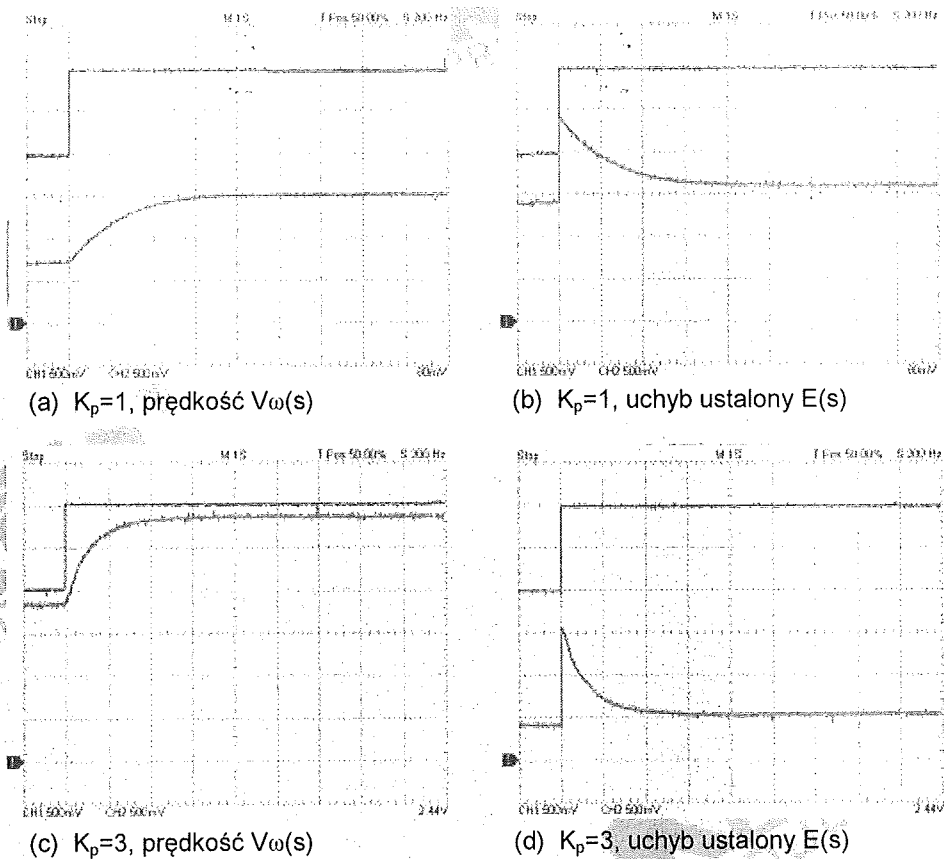


Rys. 12-3

7. Powtórzyć czynności z punktów 2 do 5 i zanotować wyniki, które pokazano na rys. 12-4.

Uwaga: Wzmocnienie K_m sterownika PWM serwośilnika DC wynosi około 5.

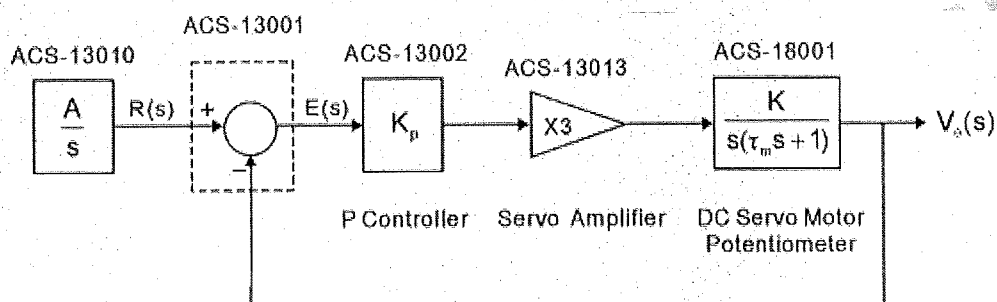
8. Porównać zanotowane wartości uchybu ustalonego i charakterystyki czasowe dla różnych typów sterowników.



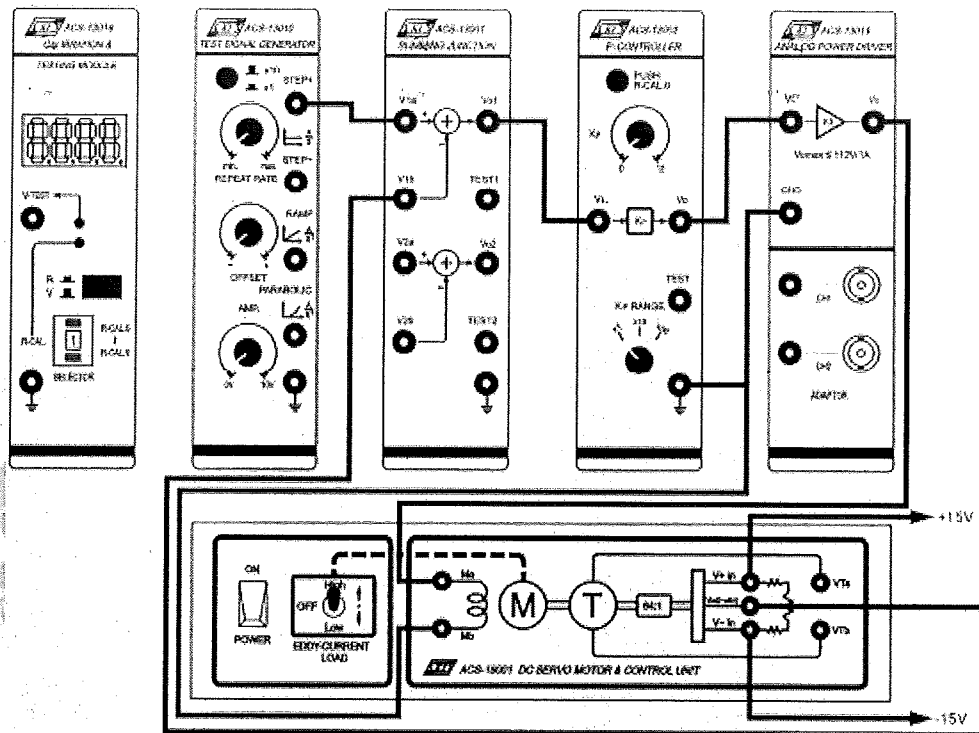
Rys. 12-4

B. Regulator P w układzie kontroli położenia serwośilnika z zamkniętą pętlą.

1. Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 12-5. Zasilanie $\pm 15V$ jest dostarczane przez moduł ACS-13015.



(a) Schemat blokowy



(b) Schemat połączeń

Rys. 12-5

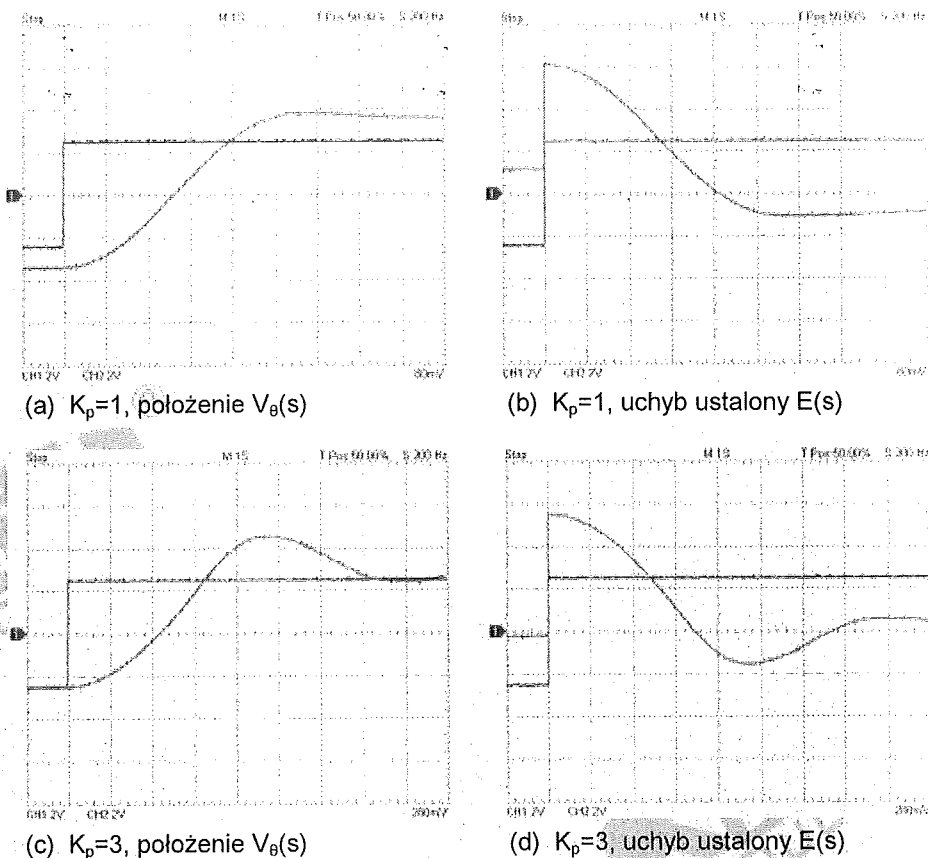
2. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 1Vpp i częstotliwości 0,05Hz.
3. Uproszczona funkcja przejściowa serwosilnika prądu stałego $G_m(s)$ jest wyrażana zależnością:

$$G_m(s) = \frac{V_\theta(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s(\tau_m s + 1)}$$

Zlinearyzowana funkcja przejściowa układu z zamkniętą pętlą $M(s)$ opisywana jest wtedy zależnością

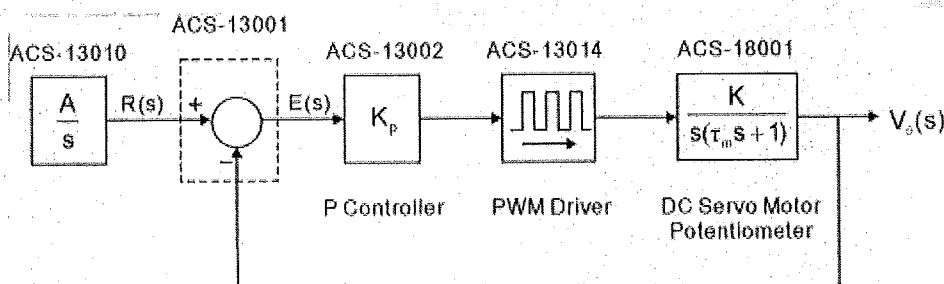
$$M(s) = \frac{V_\theta(s)}{R(s)} = \frac{3K_p K}{\tau_m s^2 + s + 3K_p K}$$

4. W module ACS-13002 ustawić $K_p=1$. Zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 ($R(s)$) i V_0 (położenie $V_\theta(s)$) modułu ACS-13001, które pokazano na rys. 12-6(a). Zmierzyć i zarejestrować sygnały na wyjściach STEP+ modułu ACS-13010 ($R(s)$) i V_{01} (uchyb ustalony $E(s)$) modułu ACS-13001, które pokazano na rys. 12-6(b).

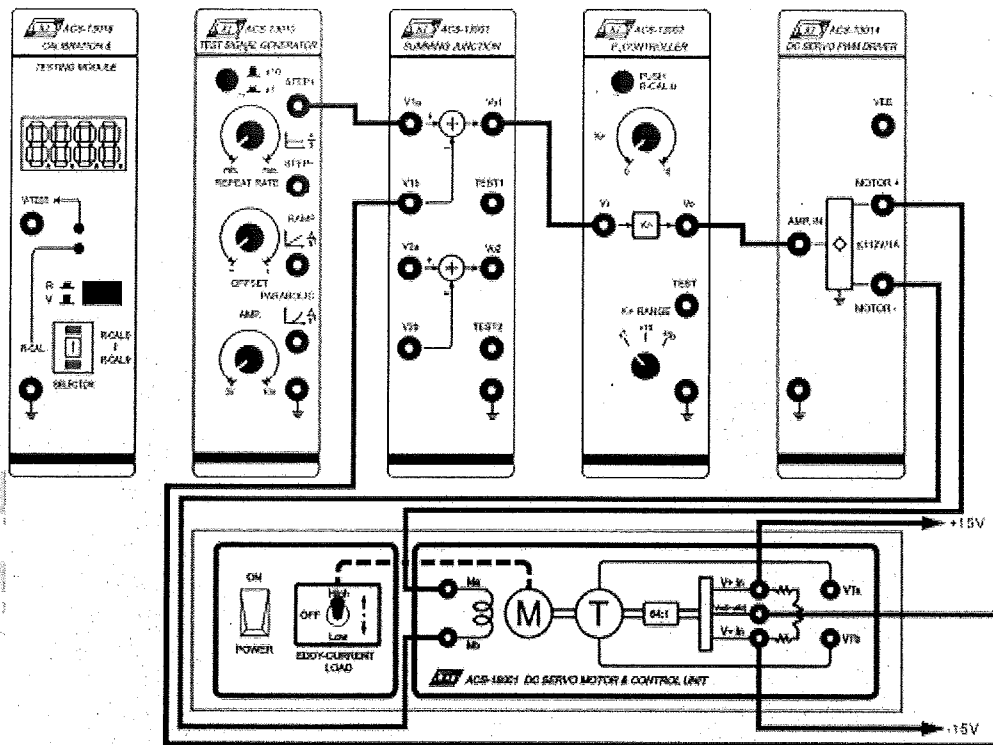


Rys. 12-6

- Powtórzyć punkt 4 dla $K_p=3$ i zanotować wyniki, które pokazano na rysunku odpowiednio 12-2(c) i 12-2(d). Porównać zanotowane wartości uchybu ustalonego i charakterystyki odpowiedzi położenia dla różnych wartości K_p . Wyznaczyć uchyb ustalony e_{ss} , czas opóźnienia t_d , czas narastania t_r , czas szczytu t_p , maksymalny przerost $M_p\%$ i czas ustalania t_s z zarejestrowanych krzywych.
- Zestawić układ pomiarowy zgodnie ze schematem blokowym i schematem połączeń przedstawionymi na rysunku 12-7. W tym układzie sterownik analogowy ACS13013 zastąpiony jest sterownikiem PWM ACS-13014.



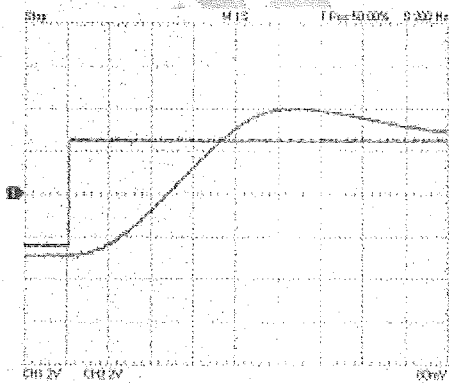
(a) Schemat blokowy



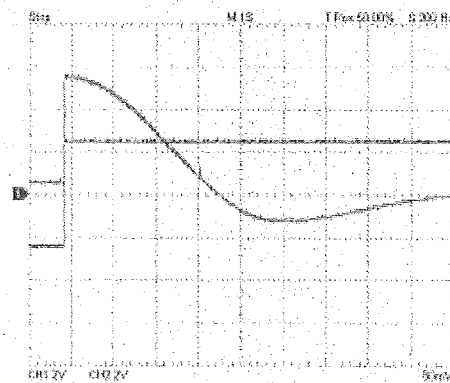
(b) Schemat połączeń

Rys. 12-7

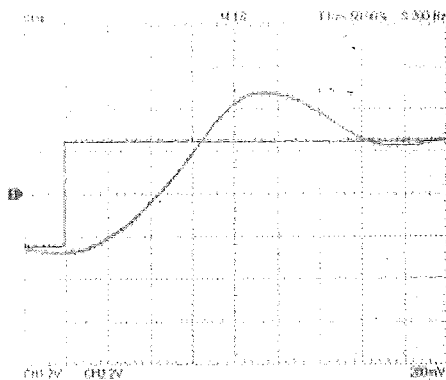
7. W module ACS-13010 ustawić na wyjściu STEP+ przebieg prostokątny o amplitudzie 5Vpp i częstotliwości 0,05Hz.
8. Powtórzyć czynności z punktów 4 i 5 i zanotować wyniki, które pokazano na rys. 12-8.



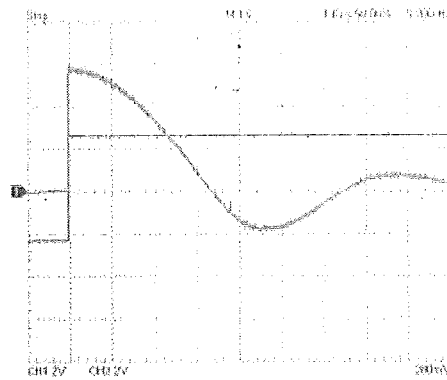
(a) $K_p=1$, położenie $V_\theta(s)$



(b) $K_p=1$, uchyb ustalony $E(s)$



(c) $K_p=3$, położenie $V_{\theta}(s)$



(d) $K_p=3$, uchyb ustalony $E(s)$

Rys. 12-8

9. Porównać zanotowane wartości uchybu ustalonego i charakterystyki czasowe dla różnych typów sterowników.