

---

# Uzupełnienie skryptów do laboratorium sterowania analogowego

dr inż. Piotr Fiertek  
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji  
i Informatyki  
Politechnika Gdańska

Gdańsk, 2016



# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wymagania dotyczące sprawozdań</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Uwagi do poszczególnych ćwiczeń</b>	<b>9</b>
2.1	Ćwiczenie 1 . . . . .	9
2.2	Ćwiczenie 2 . . . . .	10
2.3	Ćwiczenie 3 . . . . .	11
2.4	Ćwiczenie 4 . . . . .	11
2.5	Ćwiczenie 5 . . . . .	11
2.6	Ćwiczenie 6 . . . . .	11
2.7	Zadanie projektowe . . . . .	11

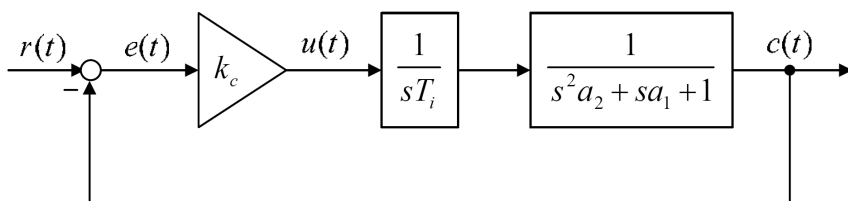
# Rozdział 1

## Wymagania dotyczące sprawozdań

Sprawozdanie z przeprowadzonych zajęć laboratoryjnych powinno stanowić kompletny i spójny dokument. Na pierwszej stronie powinna znajdować się tabelka z opisem przeprowadzonego ćwiczenia laboratoryjnego (nr ćwiczenia i tytuł), imiona i nazwiska studentów, data przeprowadzenia pomiarów, data oddania sprawozdania, miejsce na ocenę. W przypadku ponownego wykonania pomiarów, stosowna informacja powinna być umieszczona pod tabelką wraz z krótkim uzasadnieniem powodu powtórzenia pomiarów: np „Grupa była nieprzygotowana do zajęć.”, „Zabrakło czasu na wykonanie wszystkich pomiarów.” lub też „Powtórzono pomiary ze względu na niezgodność wyników symulacji z danymi pomiarowymi.”.

Następnie należy umieścić wstęp zawierający cel ćwiczenia i opis wykonywanych czynności. W razie potrzeby, opis procedury pomiarowej należy umieścić w różnych miejscach sprawozdania ale bez zbędnego powielania tego samego tekstu.

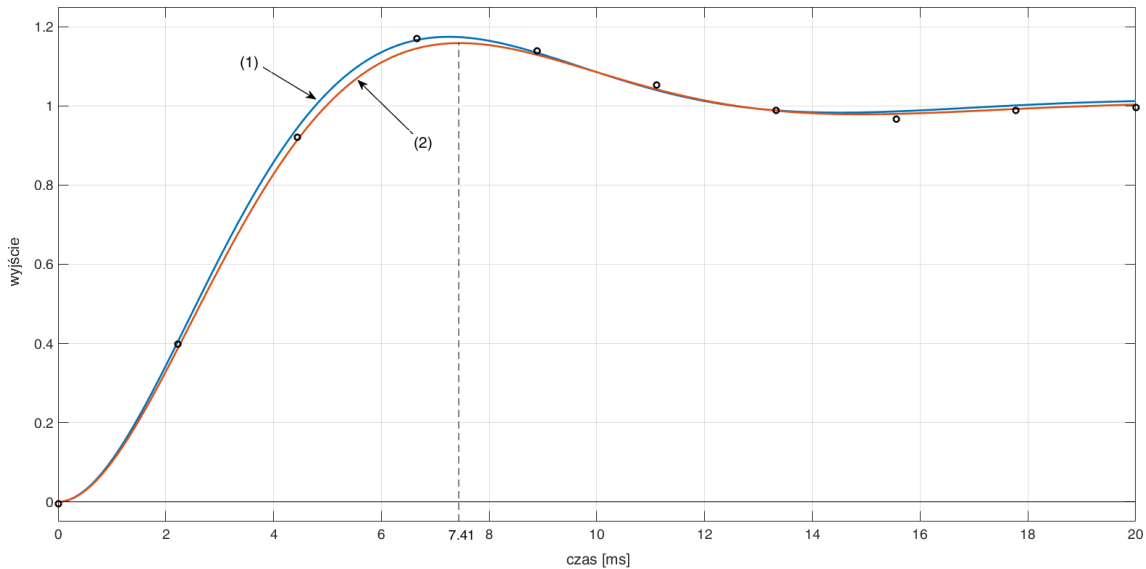
W sprawozdaniu należy umieścić schematy układów pomiarowych oraz schematy blokowe układów zamkniętych wraz z transmitancjami występujących w nich obiektów. Na rysunku 1.1 przedstawiono przykładowy schemat układu zamkniętego. Na rysunku podano transmitancję w formie sparametryzowanej, w tekście sprawozdania powinny być podane transmitancje w formie jawnej (powinny być podane konkretne wartości współczynników wielomianów licznika i mianownika).



Rysunek 1.1: Schemat układu zamkniętego.

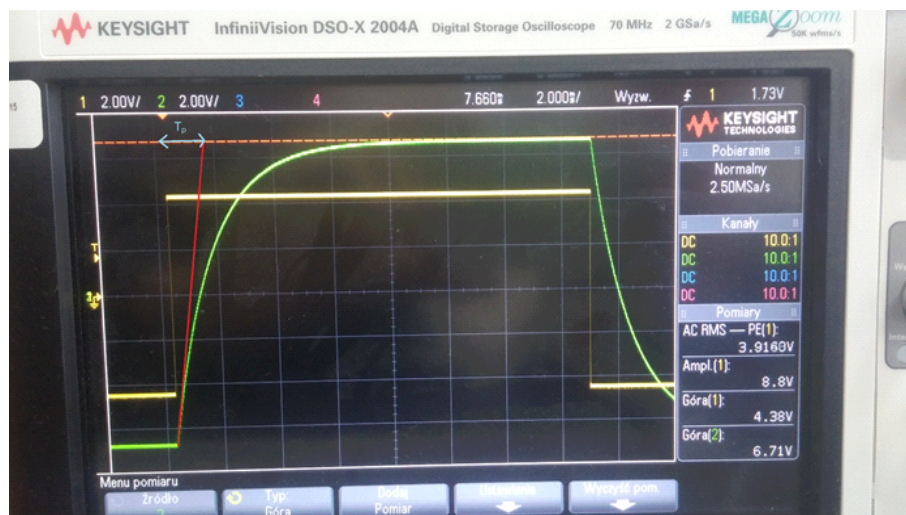
Rysunek 1.2 przedstawia przykładowy wykres odpowiedzi skokowej układu drugiego rzędu, jaki mógłby się pojawić w sprawozdaniu z ćwiczenia 1. Na podstawie tego rysunku można sformułować wymagania związane z umieszczaniem rysunków i wykresów w sprawozdaniu:

1. **W żadnym wypadku nie należy w sprawozdaniu umieszczać zdjęć ekranu oscyloskopu !!!** Na rysunku 1.3 przedstawiono jak **nie należy** prezentować otrzymanych wyników. Za umieszczanie zdjęć w sprawozdaniu będzie obniżana ocena !!! Powyższa uwaga odnosi się również do umieszczania przebiegów zapisanych do pliku graficznego (np BMP) - zrzut ekranu oscyloskopu.



Rysunek 1.2: Odpowiedź skokowa układu drugiego rzędu z naniesionymi punktami pomiarowymi. (1) - odpowiedź modelu zidentyfikowanego na podstawie charakterystyki częstotliwościowej. (2) - odpowiedź modelu zidentyfikowanego na podstawie odpowiedzi skokowej.

2. Nie należy umieszczać wykresów składających się wyłącznie z zarejestrowanych przebiegów. Szczególnie bez odpowiedniego przygotowania danych (odpowiedniego przesunięcia offsetu oraz wycięcia niepotrzebnej części danych). Umieszczenie wykresów składających się z niewłaściwie przygotowanych danych również skutkuje obniżeniem oceny. Właściwie przygotowany wykres powinien zawierać przebieg teoretyczny (np. wynik przeprowadzonej symulacji odpowiedzi skokowej układu lub charakterystykę częstotliwościową) z naniesionymi danymi pomiarowymi. Dane pomiarowe powinny być przeskalowane do zakresu wartości symulacji lub też poziom sygnału zadającego, użytego w symulacji, powinien być dostosowany do poziomu sygnału występującego w rzeczywistym układzie.
3. **W żadnym wypadku nie należy stosować wielomianów interpolacyjnych !!!** Dotyczy to w szczególności sytuacji, gdy mamy kilka punktów pomiarowych i chcemy je połączyć linią ciągłą. Wielomian interpolacyjny nie zastąpi teoretycznego przebiegu odpowiedzi skokowej układu lub teoretycznej charakterystyki Bodego.
4. Dane pomiarowe nie powinny przysłonić wyników symulacji. W przypadku zarejestrowanego na oscyloskopie przebiegu (kilkaset punktów pomiarowych) należy wybrać z nich losowo lub „co któryś” około 10 punktów. Dane pomiarowych nie łączymy za pomocą odcinków. Prezentujemy je np. w postaci kropek lub niewielkich kółek.
5. Przebiegi teoretyczne powinny być przygotowane dla dużej liczby punktów (są to zazwyczaj krzywe o łagodnej krzywiznie - nie składają się z kilku odcinków prostych).
6. Często należy porównać ze sobą kilka różnych przebiegów. Na rysunku 1.2 porównano odpowiedzi skokowe modeli otrzymanych różnymi metodami: z odpowiedzi skokowej oraz z charakterystyki częstotliwościowej. Odpowiednie przebiegi powinny zostać jednoznacznie oznakowane. O ile się na siebie nie nakładają. Przebiegi które chcemy ze sobą porównywać nie powinny być rysowane na oddzielnych wykresach. Jeszcze gorzej jest, gdy na każdym z tych wykresów mamy inną skalę w osi x i y. Umieszczenie interesujących nas przebiegów na jednym rysunku zmniejsza objętość pracy oraz pozwala lepiej dostrzec szukane zależności - np. w ćwiczeniu 2, odpowiedzi skokowe układu zamkniętego, otrzymane dla trzech różnych wzmocnień sterownika proporcjonalnego, powinniśmy umieścić na jednym rysunku.



Rysunek 1.3: Przykład jak wykres **nie** powinien wyglądać.

7. Każdy rysunek powinien być wyposażony w swój numer i opis, jednoznacznie określający co dany rysunek przedstawia. Odpowiednie oznaczenia widzimy na rysunkach 1.1, 1.2 i 1.3, np „*Rysunek 1.1: Schemat układu zamkniętego.*”. Dzięki numeracjom rysunków w łatwy sposób możemy odwoływać się do nich w treści sprawozdania.
8. Umieszczenie każdego rysunku powinno być uzasadnione. Tzn. nie należy dołączać nadmiarowej liczby wykresów bez wyraźnej potrzeby. Należy przyjąć zasadę, że do każdego umieszczonego rysunku, w tekście znajduje się odpowiednia adnotacja. Np „*Na rysunku 4 przedstawiono odpowiedź skokową układu (...) z której wynika (...)*” lub „*Z porównania odpowiedzi skokowych (...) przedstawionych na rysunku 3 wynika (...)*”.
9. Należy odpowiednio opisać osie wykresów i podać jednostki. Np rysunek 1.2. Na przedstawionym wykresie oś  $y$  nie ma zaznaczonej jednostki, gdyż w tym przypadku wyjście układu jest wyskalowane do wartości *znormalizowanej* (odpowiedź na pobudzenie sygnałem skokowym o wartości 1). Jeżeli rysunek byłby skalowany do poziomu zarejestrowanych sygnałów, na osi  $y$  mielibyśmy zaznaczoną jednostkę [V].

### Dalsze uwagi dotyczące sprawozdania:

- Ponieważ mamy do czynienia z pomiarami, dla każdego prezentowanego wyniku należy oszacować dokładność podawanej wielkości. Z pewnością nie należy podawać wyników z dokładnością do pięciu cyfr znaczących. Idealem byłoby przeprowadzenie rachunku błędów z prawdziwego zdarzenia, niemniej wystarczy oszacowanie wiarygodności prezentowanych wyników. Podając zmierzone wielkości nie należy zapominać o jednostkach.

W oszacowaniu dokładności podawanych wyników może pomóc eksperyment polegający na celowej zmianie danej wielkości (np parametru modelu obiektu w ćwiczeniu 1) i sprawdzeniu jak bardzo przebiegi teoretyczne (odpowiedź skokowa i charakterystyka częstotliwościowa) odbiegają od wartości zmierzonych.

- Jeżeli podajemy jakąś liczbę lub zidentyfikowaną wartość, nie należy podawać jej z dokładnością do dziesięciu lub kilkunastu cyfr znaczących. Jaka jest dokładność pomiaru? Zazwyczaj wystarczy podać liczbę z dokładnością do 3-4 cyfr znaczących (jeśli nie przeprowadziliśmy oszacowania dokładności pomiaru).

- Sprawozdanie powinno być spójne i kompletne, dlatego też nie należy odwoływać się do rysunków i wzorów ze skryptu (np. „Zgodnie ze wzorem (1.51) umieszczonym na stronie 11 skryptu (...)"). Jeżeli jest potrzebny jakiś wzór lub rysunek, należy go umieścić w sprawozdaniu.
- W sprawozdaniu powinny być umieszczone wnioski płynące z przeprowadzonych pomiarów i badań symulacyjnych. Sprawozdanie powinno zakończyć się krótkim podsumowaniem. Nie należy jednak pisać wniosków i podsumowania *na siłę*. Wnioski powinny być inteligentne. Np. cały komentarz do wykresu nie może sprowadzać się do takich zdań: „Na wykresie widzimy, że sygnał najpierw maleje a później rośnie.”. To widać, ale co z tego wynika? Dlaczego jest tak a nie inaczej? To są pytania na które powinniśmy starać się znaleźć odpowiedź. Inny przykład: „Na wykresie 1.2 widzimy, że układ zachowuje się zgodnie z oczekiwaniami.”. Całkiem możliwe, ale w tym miejscu należałoby zadać sobie pytanie, co autor miał na myśli. Jakie są jego oczekiwania? Czego się spodziewał?
- Nie należy pisać, że pomiary nie zgadzają się z symulacją z powodu niedoskonałości przyrządów laboratoryjnych. Sprzęt jest bardzo dobrej klasy. Jeśli jednak ktoś szuka błędu po stronie sprzętu laboratoryjnego (np oscyloskopów), wpierw niech wykona rachunek błędów i określi z jaką dokładnością wyznaczył wartości parametrów modelu (każdy pomiar obarczony jest pewnym błędem) a następnie określi, czy jego przebiegi teoretyczne mieszczą się (lub nie) wewnątrz obszaru zmienności wynikającej z przyjętej niepewności pomiarowej.

Duże rozbieżności wyników teoretycznych z wartościami pomierzonymi często mają następujące przyczyny:

- Błędy popełnione podczas wyznaczania wartości parametrów modeli wykorzystywanych w symulacji.
- Błędnie wykonana symulacja.
- Rzeczywistość jest bardziej złożona niż model wykorzystywany w symulacji.
- Nie uwzględnienie wyjścia układu poza zakres liniowy. Najczęściej mamy do czynienia z przekroczeniem przez dany sygnał wartości napięć zasilających. Wzmacniacze operacyjne, z których zbudowane są zestawy laboratoryjne, zasilane są napięciem  $\pm 15V$ . W swoich symulacjach należałoby założyć, że sygnały nie powinny przekraczać wartości z przedziału  $\langle -14, 5V; 14, 5V \rangle$ . Należy również uwzględnić strukturę układu. Odpowiednie schematy można znaleźć w skryptach do poszczególnych ćwiczeń. Podanie na wejście układu sygnału o małej amplitudzie (np  $\pm 0,5V$ ) pozwala mieć nadzieję, że nie wyjdziemy poza obszar liniowej pracy układu. Nie uwzględnienie ograniczeń nałożonych na maksymalne wartości sygnałów powoduje, że wyniki teoretyczne odbiegają od pomiarów. W niektórych przypadkach różnice potrafią być bardzo duże. Szczególnie istotne jest to w ćwiczeniu 3 i 4.
- W języku polskim do oddzielenia części całkowitej liczby od części ułamkowej używamy przecinka a nie kropki.
- W przypadku sprawozdania z projektu (ćwiczenie 7), pliki używane do wykonywania obliczeń i symulacji należy dołączyć do sprawozdania. W celu uniknięcia zostawiania nośników danych, wystarczające jest dostarczenie odpowiednich plików drogą mailową.

Nie jest wymagane, aby wszystkie części sprawozdania były drukowane. Dla zaoszczędzenia czasu, możliwe jest pozostawienie w wydruku sprawozdania wolnego miejsca, w którym ręcznie zostaną narysowane schematy blokowe badanych układów lub wykorzystane wzory. Można

również ręcznie nanosić oznaczenia na wykresy (np strzałki wskazujące dane przebiegi teoretyczne). Możliwe jest napisanie całego sprawozdania ręcznie i drukować jedynie dołączane wykresy. Pisana ręcznie część sprawozdania powinna być czytelna, w przeciwnym wypadku nie będzie sprawdzana.



# Rozdział 2

## Uwagi do poszczególnych ćwiczeń

### 2.1 Ćwiczenie 1

Z małymi wyjątkami wszystkie zadania przeprowadzamy zgodnie z instrukcjami zawartymi w skrypcie do ćwiczenia 1.

#### Uwagi:

1. Rejestrowanie charakterystyk częstotliwościowych:

Na wejście badanego obiektu podajemy sygnał **sinusoidalny** o małej częstotliwości  $f_s$  i sprawdzamy jaka jest amplituda sygnału wyjściowego. Następnie zwiększamy częstotliwość sygnału wejściowego tak długo, aż amplituda sygnału wyjściowego znacząco zmaleje (np 5 krotnie). Odczytujemy aktualną częstotliwość sygnału wejściowego  $f_d$ . Następnie wybieramy 3-4 częstotliwości w przedziale  $\langle f_s; f_d \rangle$  (plus częstotliwości  $f_s$  i  $f_d$ ). Wybrane częstotliwości powinny być mniej więcej równomiernie rozmieszczone w skali logarytmicznej. Przy wyborze częstotliwości pomiarowych można posłużyć się obserwowaną zmianą amplitudy sygnału wyjściowego. Dla prostych obiektów (układ 1 rzędu, układ nieminimalnofazowy) wystarczy 5 punktów pomiarowych. Dla nieco bardziej złożonych, jak układ 2 rzędu, dobrze jest przyjąć 6 punktów pomiarowych. Staramy się znaleźć częstotliwość 3dB ( $f_{3dB}$  - wzmocnienie układu jest o 3dB mniejsze niż dla małych częstotliwości) lub częstotliwość rezonansową (dla układu 2 rzędu - częstotliwość dla której wzmocnienie układu jest najwyższe, jeżeli podbicie rezonansowe występuje). Na koniec nie zapominamy przeliczyć amplitudy sygnału wyjściowego na wzmocnienie i częstotliwości na pulsację.

2. Człon całkujący:

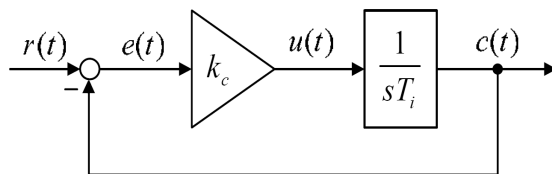
W przypadku członu całkującego realizujemy dwie procedury pomiarowe:

- (a) Na wejście członu całkującego podajemy sygnał prostokątny i mierzymy pochodną sygnału wyjściowego. Wartość pochodnej sygnału wyjściowego będzie zależała od wartości napięcia wejściowego i od stałej całkowania  $T_i$ . Pomiar wykonujemy dla trzech różnych wartości napięć wejściowych. Dane pomiarowe wraz z wynikami umieszczamy w tabeli. Końcowy wynik (wyznaczona wartość stałej  $T_i$ ) jest średnią z trzech pomiarów.

**Uwaga!** Napięcie wejściowe mierzymy względem napięcia 0V - nie jest to różnica między napięciem  $U_{max}$  i  $U_{min}$  sygnału prostokątnego.

- (b) Zamykamy człon całkujący pętlą sprzężenia zwrotnego (rys. 2.1). Transmitancja układu zamkniętego jest postaci:

$$G_z(s) = \frac{1}{sT_z + 1} \quad (2.1)$$



Rysunek 2.1: Schemat układu zamkniętego z członem całkującym.

Transmitancję układu zamkniętego wyznaczamy w ten sam sposób, w jaki identyfikowany jest model obiektu pierwszego rzędu (tzn. z odpowiedzi skokowej i z charakterystyki częstotliwościowej). Mając transmitancję układu zamkniętego oraz wzmocnienie sterownika proporcjonalnego wyznaczamy wartość stałej  $T_i$ .

**Uwaga!** Pętlę sprzężenia zwrotnego zamykamy prowadząc sygnał wyjściowy do sumatora przez człon oznaczony symbolem „-1”.

Nie wyznaczamy charakterystyki częstotliwościowej członu całkującego, w związku z czym nie jest konieczne umieszczanie jej w sprawozdaniu.

3. Wyznaczamy parametry funkcji przeliczającej wskazania potencjometru obrotowego na wzmocnienie sterownika proporcjonalnego. W skrypcie do ćwiczenia 2 możemy znaleźć zależność  $k_c = 0,47 + n/2$ , ( $n = 0 \div 10$ ), gdzie  $n$  jest liczbą obrotów potencjometru. Podane wartości współczynników powinny być właściwe, niemniej dobrze jest się upewnić na ile wciąż są aktualne. W tym celu sprawdzamy wzmocnienie sterownika proporcjonalnego dla kilku ustawień potencjometru (np 5 pozycji). Następnie korzystając z regresji liniowej wyznaczamy nowe wartości współczynników powyższej zależności.

### Uwaga !!!

W sprawozdaniu nie umieszczamy wykresów Nyquista identyfikowanych modeli, pomimo, że takie polecenie jest umieszczone w oryginalnym skrypcie do ćwiczenia 1. Zazwyczaj wykresy Nyquista rysujemy w celu zbadania stabilności układu zamkniętego na podstawie charakterystyki częstotliwościowej układu otwartego. W tym ćwiczeniu zajmujemy się identyfikacją parametrów modeli obiektów a nie badaniem układów zamkniętych.

## 2.2 Ćwiczenie 2

Wszystkie zadania przeprowadzamy zgodnie z instrukcjami zawartymi w skrypcie do ćwiczenia 2. Należy przebadać układy zamknięte wskazane przez prowadzącego (trzy układy). Każda grupa laboratoryjna powinna zarejestrować 9 odpowiedzi skokowych i 9 charakterystyk Bodego (po trzy dla każdego wybranego układu). Należy tak wybrać wzmocnienia sterownika, aby wzmocnienie o największej wartości było odpowiednio mniejsze od wzmocnienia granicznego  $k_{gr}$ . Jeżeli najmniejsze wzmocnienie wynosi  $k_{min}$ , możemy wykonać badanie układu zamkniętego dla następującego zestawu wzmocnień sterownika proporcjonalnego:

$$k_1 = k_{min}, \quad k_2 = 0,66 * k_{min} + 0,34 * k_{gr}, \quad k_3 = 0,33 * k_{min} + 0,67 * k_{gr}. \quad (2.2)$$

W sprawozdaniu należy umieścić wykresy Nyquista oraz linie pierwiastkowe odpowiadające badanym układom (wraz z odpowiednimi komentarzami - jakie informacje możemy z tych wykresów odczytać). Na podstawie przeprowadzonych pomiarów należy podać wnioski związane z wpływem wzmocnienia sterownika proporcjonalnego na zachowanie układu zamkniętego (preregulowanie i czas ustalania odpowiedzi skokowej, dokładność sterowania, pasmo przenoszenia układu zamkniętego, szczyt rezonansowy itp.).

Część związaną z badaniem tłumienia zakłóceń występujących w układzie zamkniętym należy wykonać w domu na drodze symulacyjnej.

## 2.3 Ćwiczenie 3

W skrypcie opisującym ćwiczenie 3, na stronie 17, możemy znaleźć wzór służący do przeliczenia położenia potencjometrów na stałe czasowe  $T_I$  i  $T_D$ :

$$T_{I/D} = (2,2 + n \times 4,7) \times 2,2 \times 10^{-4} [sek] \quad (2.3)$$

Do wyznaczenia wartości stałych  $T_I$  i  $T_D$  należy użyć następujących wzorów:

$$T_I = (1,2 + n \times 3,16) \times 1,2 \times 10^{-4} [sek], \quad (2.4)$$

$$T_D = (1,0 + n \times 3,16) \times 1,0 \times 10^{-4} [sek]. \quad (2.5)$$

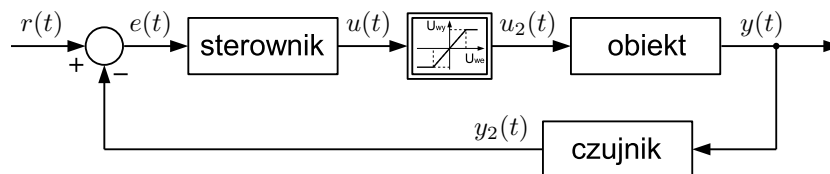
## 2.4 Ćwiczenie 4

## 2.5 Ćwiczenie 5

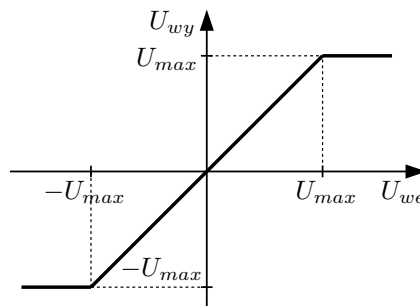
## 2.6 Ćwiczenie 6

## 2.7 Zadanie projektowe

Rysunek 2.2 przedstawia schemat układu sterowania, zawierający obiekt sterowany, czujnik, sterownik oraz element o nieliniowej charakterystyce, ograniczający wartości sygnału sterującego podawanego na wejście sterowanego obiektu. Poszczególne obiekty opisane są transmitancjami:  $G_p(s)$  (obiekt sterowany),  $G_t(s)$  (czujnik) i  $G_c(s)$  (sterownik). Transmitancje  $G_p(s)$  i  $G_t(s)$  są ustalane niezależnie dla każdej grupy laboratoryjnej. Charakterystyka członu nieliniowego przedstawiona jest na rysunku 2.3.



Rysunek 2.2: Schemat układu zamkniętego.



Rysunek 2.3: Charakterystyka układu nieliniowego.

Poniżej przedstawione są przykładowe transmitancje obiektu oraz czujnika:

1.  $G_p(s) = \frac{1}{sT_i} \cdot \frac{K_p}{1+sT_p} \cdot \frac{1}{1+sa_1+s^2a_2} \cdot e^{-s5T_o}$ ,  $G_t(s) = \frac{1}{1+s \cdot 0,1T_p} \cdot e^{-sT_o}$ ,  $U_{max} = 2$
2.  $G_p(s) = \frac{1}{sT_i} \cdot \frac{K_p}{1+sT_p} \cdot \frac{1}{1+sa_1+s^2a_2} \cdot e^{-s4T_o}$ ,  $G_t(s) = \frac{1}{1+s \cdot 0,2T_p}$ ,  $U_{max} = 5$
3.  $G_p(s) = \frac{1}{1+sa_1+s^2a_2} \cdot \frac{1-sT_x}{1+sT_y} \cdot e^{-s6T_o}$ ,  $G_t(s) = \frac{1}{1+s \cdot 0,15T_p} \cdot e^{-s0,5T_o}$ ,  $U_{max} = 3$
4.  $G_p(s) = \frac{1}{sT_i} \cdot \frac{K_p}{1+sT_p} \cdot \frac{1-sT_x}{1+sT_y} \cdot e^{-s3T_o}$ ,  $G_t(s) = \frac{1}{1+s \cdot 0,05T_p} \cdot e^{-sT_o}$ ,  $U_{max} = 10$
5.  $G_p(s) = \frac{1}{sT_i} \cdot \frac{1}{1+sa_1+s^2a_2} \cdot \frac{1-sT_x}{1+sT_y} \cdot e^{-s2T_o}$ ,  $G_t(s) = \frac{1}{1+s \cdot 0,1T_p} \cdot e^{-sT_o}$ ,  $U_{max} = 4$
6.  $G_p(s) = \frac{1}{sT_i} \cdot \frac{K_p}{1+sT_p} \cdot \frac{1}{1+sa_1+s^2a_2} \cdot e^{-s4T_o}$ ,  $G_t(s) = \frac{1}{1+s \cdot 0,1T_p} \cdot e^{-sT_o}$ ,  $U_{max} = 5$
7.  $G_p(s) = \frac{K_p}{1+sT_p} \cdot \frac{1}{1+sa_1+s^2a_2} \cdot e^{-s4T_o}$ ,  $G_t(s) = \frac{1}{1+s \cdot 0,2T_p}$ ,  $U_{max} = 6$
8.  $G_p(s) = \frac{1}{sT_i} \cdot \frac{K_p}{1+sT_p} \cdot \frac{1-sT_x}{1+sT_y} \cdot e^{-s3T_o}$ ,  $G_t(s) = \frac{1}{1+s \cdot 0,1T_p} \cdot e^{-sT_o}$ ,  $U_{max} = 7$
9.  $G_p(s) = \frac{1}{sT_i} \cdot \frac{K_p}{1+sT_p} \cdot \frac{1}{1+sa_1+s^2a_2} \cdot e^{-s5T_o}$ ,  $G_t(s) = \frac{1}{1+s \cdot 0,05T_p} \cdot e^{-sT_o}$ ,  $U_{max} = 5$
10.  $G_p(s) = \frac{K_p}{1+sT_p} \cdot \frac{1}{1+sa_1+s^2a_2} \cdot \frac{1-sT_x}{1+sT_y} \cdot e^{-s10T_o}$ ,  $G_t(s) = \frac{1}{1+s \cdot 0,1T_p} \cdot e^{-s0,5T_o}$ ,  $U_{max} = 4$

Wartości parametrów  $K_p$ ,  $T_p$ ,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $T_x$ ,  $T_y$ ,  $T_i$  i  $T_o$  należy przyjąć z ćwiczenia 1 (zidentyfikowane parametry modeli z ćwiczenia 1). W sprawozdaniu należy wyraźnie podać przyjęte wartości parametrów modeli oraz ostateczne postacie transmitancji  $G_p(s)$  i  $G_t(s)$ . Po konsultacji z prowadzącym zajęcia, transmitancje  $G_p(s)$  i  $G_t(s)$  mogą ulec zmianie. Podane transmitancje wraz z proponowanymi transmitancjami sterownika są podstawą do weryfikacji poprawności przedstawionych wyników symulacji działania układu zamkniętego.

Do sprawozdania należy dołączyć pliki zawierające program lub skrypt realizujący symulację układu sterowania oraz obliczenia związane z projektowaniem sterownika. Mogą to być m-pliki w przypadku gdy obliczenia są wykonywane w programie MATLAB lub plik arkusza kalkulacyjnego, gdy obliczenia wykonywane są np w programie EXCEL lub w arkuszu kalkulacyjnym Open Office. Preferuje się przesłanie odpowiednich plików drogą mailową (aby niepotrzebnie nie dołączać nośników danych do wersji papierowej sprawozdania). Do przesyłanych plików należy również dołączyć sprawozdanie w wersji elektronicznej (z wyjątkiem sytuacji, gdy sprawozdanie pisane jest ręcznie a dołączane są do niego jedynie wydruki odpowiednich wykresów).

## Zadania projektowe:

### 1. symulacja układu sterowania

Symulacja powinna uwzględniać możliwość implementacji różnych postaci sterownika: P, PI, PD, PID, LEAD, LAG, LEAD-LAG, sprzężenie od stanu wraz z obserwatorem stanu. Symulacja powinna uwzględniać obecność elementu nieliniowego na wyjściu sterownika oraz opóźnienie transportowe występujące w obiekcie lub w torze pomiarowym.

Nie narzuca się programu komputerowego, wykorzystywanego do wykonania symulacji. Symulację układu zamkniętego można wykonać między innymi w środowisku MATLAB, dowolnym arkuszu kalkulacyjnym (po odpowiednim zdefiniowaniu zawartości komórek arkusza), własnej aplikacji napisanej np w języku C++ (lub innym). Jeżeli student do wykonania symulacji wybierze środowisko MATLAB, preferuje się wykonanie symulacji w odpowiednio napisanym skrypcie (wykonanie odpowiednich obliczeń w pętli FOR) niż wykorzystanie narzędzia SIMULINK. Powyższe wytyczne wynikają jedynie z powodów dydaktycznych a nie z powodu niewłaściwego działania narzędzia SIMULINK. Samodzielne opracowanie przez studenta równań symulacji oraz ich implementacja pozwala

przypuszczać, że student rozumie w jaki sposób osiągnięte zostały wyniki przeprowadzonej symulacji układu sterowania i w przyszłości będzie samodzielnie potrafił zaimplementować symulację różnego rodzaju układów sterowania na innych platformach. Wykonanie symulacji układu sterowania w SIMULINK-u jest akceptowalne ale będzie niżej oceniane.

Symulacja układu sterowania powinna być wykorzystywana do weryfikacji działania układu sterowania z zaprojektowanymi przez studentów sterownikami.

## 2. sterownik proporcjonalny

$$G_c(s) = k_p \quad (2.6)$$

Należy znaleźć takie wzmocnienie  $k_p$  sterownika  $G_c(s)$ , dla którego układ zamknięty posiada najkrótszy czas ustalania  $T_{s\Delta}$  odpowiedzi skokowej przy przeregulowaniu nie większym niż  $\kappa_{max}$ .  $\Delta$  oraz  $\kappa_{max}$  podaje prowadzący. Przykładowe wartości to  $\Delta = 2\%$  i  $\kappa_{max} = 30\%$ . W zależności od specyfiki układu możliwe jest znalezienie takiej wartości wzmocnienia sterownika proporcjonalnego, dla której osiągamy najkrótszy czas ustalania  $T_{s\Delta}$  przy przeregulowaniu  $\kappa < \kappa_{max}$ . W sprawozdaniu należy podać wykres pokazujący jak zmienia się czas ustalania oraz przeregulowanie odpowiedzi skokowej układu zamkniętego wraz ze zmianą wartości wzmocnienia sterownika proporcjonalnego (obie zależności umieścić na jednym rysunku). Jeżeli nie jest możliwe ustabilizowanie układu zamkniętego za pomocą sterownika proporcjonalnego lub też nie da się spełnić warunku  $\kappa < \kappa_{max}$ , należy zgłosić się do prowadzącego w celu zmiany parametrów modelu obiektu i czujnika.

Układ zamknięty z wyznaczonym sterownikiem proporcjonalnym traktowany powinien być jako układ referencyjny. Parametry odpowiedzi skokowych oraz odpowiedzi na pobudzenie rampą, wyznaczone dla innych sterowników (opracowanych w dalszej kolejności) powinny być konfrontowane z referencyjną odpowiedzią skokową układu zamkniętego z sterownikiem proporcjonalnym (dla przykładu rysowaną jaśniejszym kolorem). Dla układu referencyjnego należy wyznaczyć następujące parametry:

- $T_{s\Delta}$  - czas ustalania odpowiedzi skokowej układu zamkniętego
- $\kappa$  - przeregulowanie odpowiedzi skokowej układu zamkniętego
- $e_p$  - uchyb w stanie ustalonym dla pobudzenia układu zamkniętego skokiem jednostkowym
- $e_v$  - uchyb w stanie ustalonym dla pobudzenia układu zamkniętego sygnałem typu rampa
- $\Delta_p$  - zapas fazy
- $\Delta_g$  - zapas modułu

Powyższe wskaźniki są podstawą do ustalenia wymagań projektowych stawianych przed kolejnymi sterownikami. Dla przykładu, sterownik LEAD powinien zmniejszyć czas ustalania odpowiedzi skokowej układu zamkniętego przy zachowaniu (lub zmniejszeniu) przeregulowania. Można również zażądać zmniejszenia przeregulowania przy zachowaniu dotychczasowego stanu ustalania. Od sterownika LAG będziemy natomiast oczekiwać zmniejszenia wartości uchybu pozycyjnego  $e_p$  lub prędkościowego  $e_v$ . W przypadku projektowania w dziedzinie częstotliwości należy poprawić zapas fazy  $\Delta_p$ , zapas wzmocnienia  $\Delta_g$  oraz dokładność sterowania.

Zadaniem studentów jest określenie realistycznych wymagań projektowych, oznaczających poprawę charakterystyk układu zamkniętego w stosunku do układu referencyjnego. Należy wyraźnie podać jakie zostały przyjęte wymagania projektowe oraz czy udało się je

spełnić w poszczególnych przypadkach (sterownik PID, LEAD, LEAD-LAG, sprzężenie od stanu).

### 3. sterownik PID

$$G_c(s) = k_p + k_i \cdot \frac{1}{s} + k_d \cdot s \quad (2.7)$$

Należy zaprojektować sterownik PID (jeżeli specyfika obiektu tego wymaga, można użyć niepełnego sterownika PID, np sterownik PI lub PD). Należy wykonać następujące procedury projektowe:

- Zastosować procedury projektowe Zieglera-Nicholsa (I-y i II-gi rodzaj reguł).
- Ręczne dostrajanie parametrów sterownika PID (metoda prób i błędów). Jako punkt startowy można przyjąć nastawy otrzymane za pomocą metody Zieglera-Nicholsa.
- Numeryczne strojenie parametrów sterownika PID (np wykorzystując funkcję `fminsearch/fmins` środowiska MATLAB). W tym przypadku można skorzystać z gotowych wskaźników jakości sterowania (np. ISE, ITAE, ITSE itp.) lub opracować własny wskaźnik uwzględniający między innymi akceptowalny czas ustalania  $T_{s\Delta}$  i przeregulowania  $\kappa_{max}$  odpowiedzi skokowej.

#### Uwaga !

Implementując człon całkujący sterownika PID należy wprowadzić ograniczenie na maksymalną i minimalną wartość wewnętrznej zmiennej członu całkującego (nie chodzi tylko o proste obcięcie sygnału wyjściowego, gdy wartość wewnętrznej zmiennej członu całkującego wciąż rośnie lub maleje). Maksymalna i minimalna wartość na wyjściu członu całkującego powinna być związana z maksymalną i minimalną wartością sygnału sterującego (na wyjściu członu nieliniowego). W sprawozdaniu należy umieścić obliczenia uzasadniające przyjęty poziom odcięcia członu całkującego oraz przedstawić na jednym wykresie wyniki dwóch symulacji z włączonym i wyłączonym ograniczeniem wartości wewnętrznej zmiennej członu całkującego (dla jednego wybranego przypadku).

### 4. sterownik LEAD, LAG, LEAD-LAG

$$G_c(s) = G_{lead}(s) \cdot G_{lag}(s) = k_c \cdot \frac{s + z_{lead}}{s + z_{lead}} \cdot \frac{s + z_{lag}}{s + z_{lag}} \quad (2.8)$$

Projektowanie sterowników LEAD, LEAD-LAG należy wykonać za pomocą dwóch procedur projektowych:

- Projektowanie za pomocą linii pierwiastkowych

W przypadku sterownika LEAD poprawiamy takie parametry odpowiedzi skokowej jak czas ustalania  $T_{s\Delta}$  i przeregulowanie  $\kappa$ . Za pomocą sterownika LAG poprawiamy dokładność sterowania (zmniejszenie uchybu pozycyjnego  $e_p$  lub prędkościowego  $e_v$ ). Wykorzystanie linii pierwiastkowych do wyznaczenia właściwych nastaw sterownika wymaga dokonania pewnego uproszczenia związanego z obecnością opóźnienia transportowego w modelu obiektu. Wynika to stąd, że opóźnienia transportowego nie można bezpośrednio uwzględnić podczas rysowania przebiegu linii pierwiastkowych. W tym celu należy wyznaczyć uproszczony model zastępczy obiektu, składający się z samych zer i biegunów transmitancji. Nie zaleca się zastępowanie opóźnienia transportowego transmitancją zwracaną przez matlabową funkcję `PADE`. Otrzymany model z formalnego punktu widzenia jest prawidłowy, niemniej bardzo złożony, przez co otrzymany przebieg linii pierwiastkowych jest nieczytelny.

Zamiast tego proponuje się uproszczenie modelu obiektu (wraz z opóźnieniem transportowym) modelem drugiego lub trzeciego rzędu z nieminimalnofazowym zerem. Przykład: Zadana transmitancja obiektu wynosi

$$G_p(s) = e^{-sT_o} \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{s(b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0)}. \quad (2.9)$$

Upraszczamy transmitancję obiektu do postaci

$$G'_p(s) = \frac{a'_1 s + a'_0}{s(b'_2 s^2 + b'_1 s + b'_0)}, \quad a'_1 < 0. \quad (2.10)$$

Wpierw wyznaczamy odpowiedź skokową układu opisanego transmitancją

$$G_{p2}(s) = e^{-sT_o} \frac{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}. \quad (2.11)$$

Otrzymany przebieg traktujemy jako dane pomiarowe dla których wyznaczamy parametry transmitancji  $G'_p(s)$ . Korzystamy z metod identyfikacji poznanych w ćwiczeniu 1 (np z matlabowej funkcji `fminsearch`).

Całą procedurę projektową przeprowadzamy dla uproszczonego modelu obiektu, natomiast działanie układu zamkniętego z zaprojektowanym sterownikiem weryfikujemy za pomocą dokładnej symulacji. Wykorzystanie uproszczonego modelu obiektu podczas fazy projektowania nastaw regulatora jest dopuszczalne z następujących powodów:

- (a) Procedura projektowa (na podstawie linii pierwiastkowych, zakładająca obecność pary biegunów dominujących układu zamkniętego) ze swej natury jest procedurą uproszczoną - układ zamknięty posiada większą liczbę zer i biegunów.
- (b) Jest to procedura iteracyjna. Po wyznaczeniu nastaw regulatora LEAD, LEAD-LAG powinna nastąpić faza weryfikacji otrzymanych wyników i w zależności od otrzymanych rezultatów procedura projektowa jest powtarzana dla nieco innego położenia pary dominujących biegunów układu zamkniętego lub też kończymy całą procedurę gdy uda się spełnić wymagania projektowe.
- Projektowanie w dziedzinie częstotliwości

W tym przypadku należy poprawić zapas fazy i zapas wzmocnienia układu zamkniętego oraz zwiększyć dokładność sterowania (zmniejszyć uchyb w stanie ustalonym). Procedura projektowa polega na odpowiedniej modyfikacji charakterystyki Bodego układu otwartego. Korzystamy z pełnego modelu obiektu (nie upraszczamy modelu obiektu).

W celu pokazania w jaki sposób sterownik modyfikuje charakterystykę częstotliwościową układu otwartego, na wspólnym wykresie należy przedstawić charakterystyki częstotliwościowe układu otwartego bez i z sterownikiem. Na wykresach należy zaznaczyć poprzedni i nowy zapas fazy oraz zapas wzmocnienia. Należy również pokazać jak zmieniło się wzmocnienie położeniowe lub prędkościowe.

Poza charakterystykami częstotliwościowymi należy przedstawić odpowiedź skokową układu zamkniętego (lub/i odpowiedź na pobudzenie rampą - gdy zmniejszamy uchyb prędkościowy) z naniesioną odpowiedzią skokową układu zamkniętego z punktu 2 (sterownik proporcjonalny).

## 5. sterownik realizujący sprzężenie od stanu

Implementacja sterownika realizującego sprzężeniem od stanu. W sprawozdaniu powinny znaleźć się następujące punkty:

- (a) Wyznaczenie modelu stanowego obiektu. Równanie przejścia stanu modelu stanowego ma postać:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \quad (2.12)$$

Ponieważ w modelu tym nie można bezpośrednio uwzględnić opóźnień transportowego, należy przyjąć uproszczony model obiektu. Proponuje się przyjęcie bardziej złożonego modelu niż ma to miejsce w punkcie 4 (np model transmitancyjny z dwoma zerami i trzema lub czterema biegunami)

$$G(s)'' = \frac{a_2' s^2 + a_1' s + a_0}{s(b_4' s^4 + b_3' s^3 + b_2' s^2 + b_1' s + b_0')}. \quad (2.13)$$

Jeżeli okaże się, że model o mniejszej liczbie zer i biegunów wystarczająco dobrze odtwarza zachowanie się naszego obiektu, możemy przyjąć prostszy model zastępczy. Po uproszczeniu modelu obiektu wyznaczamy jego model stanowy, przyjmując np fazowe zmienne stanu.

- (b) Projektowanie obserwatora stanu - zakładamy, że sterownik ma jedynie dostęp do wejścia i wyjścia obiektu (obserwowane sygnały) i wartości zmiennych stanu muszą być aproksymowane. Położenie biegunów obserwatora stanu musi być dobrane w zgodzie z położeniem zer i biegunów obiektu (obserwator nie może być ani zbyt powolny ani zbyt szybki). Wybór położenia biegunów obserwatora stanu należy uzasadnić.
- (c) Sprzężenie od stanu. Na podstawie znajomości dynamiki obiektu oraz wymagań projektowych należy dobrać właściwe położenie biegunów układu zamkniętego. Na tej podstawie należy wyliczyć wektor wzmocnienia od stanu.
- (d) Narysować schemat sterowania ze sprzężeniem od stanu oraz zaimplementować sterownik, tak aby mógł współpracować z symulacją z punktu 1. **Implementacja sterownika w środowisku symulacyjnym jest bardzo ważna, bez niej zakłada się, że punkt związany z sprzężeniem od stanu nie został w ogóle zrealizowany.** Tzn. nie są przyznawane żadne punkty, nawet jeśli wyznaczono wektor wzmocnień obserwatora stanu i wektor wzmocnień sprzężenia od stanu.

#### Uwaga !

W przypadku sprzężenia od stanu dokładność sterowania jest wypadkowa. Dobierając odpowiedni wektor wzmocnień sprzężenia od stanu kierujemy się jedynie wymaganym położeniem biegunów układu zamkniętego. Wymagania związane z dokładnością sterowania w ogóle nie są brane pod uwagę podczas realizacji procedury projektowej. Może się więc zdarzyć, że układ zamknięty na pobudzenie sygnałem jednostkowym odpowie np sygnałem o wartości w stanie ustalonym równym  $y(\infty) = 0, 1$  lub mniejszym.

W takim przypadku można zastosować sztuczkę, polegającą na umieszczeniu na wyjściu sterownika członu całkującego  $1/s$ . Fizycznie człon całkujący jest częścią sterownika ale traktujemy go jak część obiektu sterowanego. W ten sposób zwiększamy rząd astatyzmu układu zamkniętego. Jeśli nie zdestabilizujemy układu zamkniętego, uchyb w stanie ustalonym będzie zerowy. Pozostałą część sterownika projektujemy tak jakbyśmy realizowali sprzężenie od stanu dla obiektu powiększonego o dodatkowy człon całkujący. Dzięki dodatkowemu członowi całkującemu poprawiamy dokładność sterowania, natomiast realizując sprzężenie od stanu otrzymujemy wymagane położenie biegunów układu zamkniętego.