

Sterowanie adaptacyjne i estymacja

Maciej Cebula
Kajetan Piertusa
Daniel Rubak

Kraków, 2017

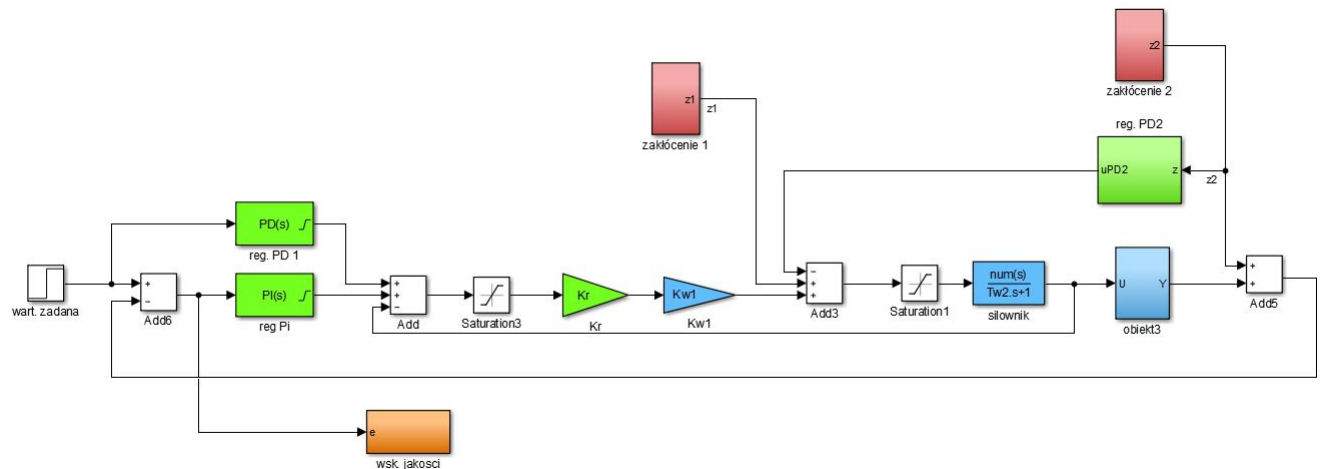
Spis treści

1	Wstęp	2
1.1	Cel zajęć	2
1.2	Model obiektu	2
1.3	Regulatory	3
1.4	Filtr wind-up	3
1.5	Wskaźnik jakości	4
2	Implementacja	5
3	Optymalizacja	8
3.1	Wprowadzenie	8
3.2	Optymalizacja nastaw regulatorów	8
4	Weryfikacja przyjętej struktury regulatora	13
5	Wnioski	16

Wstęp

1.1 Cel zajęć

Celem niniejszej pracy była analiza oraz dobór parametrów systemu adaptacyjnego w zależności od występujących w systemie zakłóceń oraz transmitancji obiektu, którym sterowano. Przyjęty model przedstawiono na rysunku 1.1.



Rys. 1.1: Model układu sterowania

1.2 Model obiektu

Obiekt sterowania jest modelem Strejca, opisany transmitancją 1.1. Wzór ten ze względu na swoją postać - n szeregowo połączonych obiektów inercyjnych pierwszego rzędu z dodatkowym opóźnieniem czasowym, może opisywać dynamikę np. instalacji kaskadowo połączonych zbiorników. W zależności od dynamiki układu, współczynnik n może przyjmować coraz to większe wartości 1, 2, 3, Na potrzeby niniejszej pracy ograniczono się do rozpatrywania omawianego modelu rzędu pierwszego, drugiego oraz trzeciego.

$$G(s) = \frac{K_0}{(T_0 \cdot s + 1)^n} \cdot e^{-\tau \cdot s} \quad (1.1)$$

Przyjęto następujące wartości parametrów:

$$K_0 = 10,$$

$$T_0 = 1,$$

$$\tau = 1.$$

Przedstawione na rysunku 1.1 bloczki Kr , $Kw1$ i *siłownik* opisują dynamikę urządzenia wykonawczego, którym w tym przypadku mógłby być np. zawór regulujący przepływ cieczy. Siłownik opisany jest transmitancją 1.2

$$G_s(s) = \frac{Kw2}{Tw2 \cdot s + 1} \quad (1.2)$$

gdzie:

$$Tw2 = 0.1,$$

$$Kw2 = 5.$$

1.3 Regulatory

Poszczególne regulatory znajdujące się na schemacie 1.1 opisano następującymi wzorami:

$$PD_1 = P1 + D1 \cdot s \quad (1.3)$$

$$PD_2 = P2 + D2 \cdot s \quad (1.4)$$

$$PI = P3 + \frac{I3}{s} \quad (1.5)$$

Regulatory PD_1 i PD_2 to regulatory proporcjonalno-różniczkujące o wzmocnieniach α_1 i α_2 oraz czasach różniczkowania β_1 i β_2 . Regulator PI to regulator proporcjonalno-całkujący o wzmocnieniu γ i współczynniku całkowania δ .

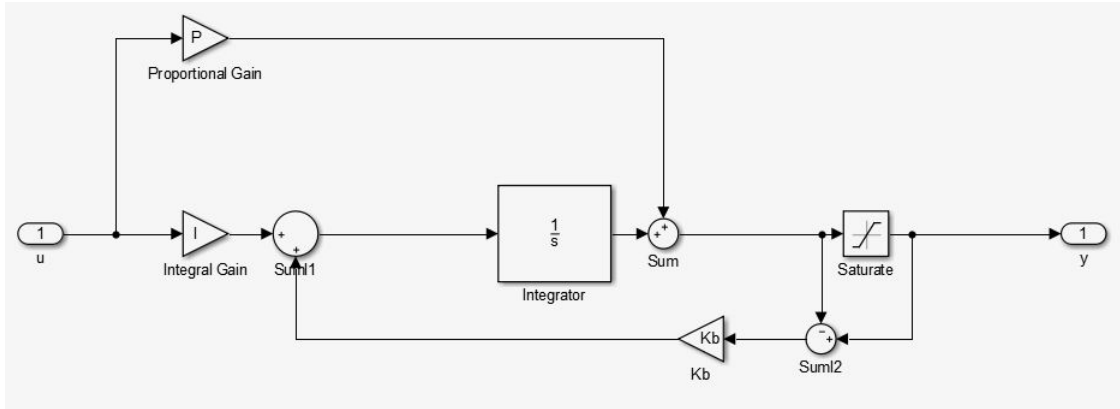
Sygnał sterujący generowany jest głównie przez układ dwóch równolegle połączonych regulatorów PI i PD_1 . Pierwszy z nich działa w klasycznej pętli regulacji z ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Głównym zadaniem regulatora PI , oprócz stabilizacji sygnału wyjściowego na zadanym poziomie, jest niwelowanie uchybu ustalonego. Drugi regulator - PD_1 , działa w pętli *feedforward* reagując na zmiany wartości zadanej. Dzięki zastosowaniu tego rozwiązania osiągnięto lepszą dynamikę układu regulatorów, niż w przypadku pojedynczego regulatora PI , zachowując jednocześnie eliminację uchybu ustalonego.

W celu zabezpieczenia układu przed niepożądanym działaniem zakłóceń wprowadzono dwie dodatkowe modyfikacje. Pierwsza z nich, to dodatkowa pętla sprzężenia tworząca zamknięty układ w obrębie urządzenia wykonawczego. Ma ona za zadanie wraz ze wzmocnieniem proporcjonalnym Kr , niwelować wpływ zakłócenia z_1 na sygnał sterujący podawany na obiekt. Drugim zabezpieczeniem jest regulator PD_2 pracujący w pętli *feedforward* od zakłócenia z_2 . Zadaniem tego regulatora jest przeciwdziałanie zakłóceniu podawanemu bezpośrednio na sygnał wyjściowy z obiektu.

1.4 Filtr wind-up

Jak można zauważyć na rysunku 1.1 do modelu obiektu wprowadzono ograniczenia na wartość sygnału sterującego w postaci saturacji. Ma to na celu odwzorowanie rzeczywistej sytuacji

gdy sygnał sterujący jest ograniczony np. przez minimalne i maksymalne napięcie podawane na urządzenie wykonawcze. Sytuacja ta negatywnie wpływa na jakość regulacji, co zauważono w przypadku działania regulatora PI , który bardzo szybko się nasycił - generował sterowanie o wartościach minimalnych lub maksymalnych. Wiązało się to z nadmiernym wzrostem członu całkującego, szczególnie dla obiektu drugiego i trzeciego rzędu. Aby temu zapobiec wprowadzono w strukturze regulatora filtr typu wind-up, który działał na zasadzie wstecznej korekcji wartości całki. Schemat tak zmodyfikowanego regulatora znajduje się na rysunku 1.2. Przyjęto, że współczynnik K_b będzie miał wartość $\frac{1}{\sqrt{\delta}}$.



Rys. 1.2: Regulator PI z filtrem wind-up.

1.5 Wskaźnik jakości

W ramach projektu należało przeprowadzić optymalizację poszczególnych parametrów podanych powyżej regulatorów, tj. $P1$, $D1$, $P2$, $D2$, $P3$, $I3$. Wskaźnikiem jakości, na mocy którego optymalizowano działanie całego układu, była całka z modułu uchybu:

$$J = \int |e(t)| dt \quad (1.6)$$

gdzie:

$e(t) = r(t) - y(t)$ - uchyb regulacji.

Ponadto, przyjęto iż oczekiwanym efektem optymalizacji będzie takie zachowanie układu, by bez względu na wartości zakłóceń z_1 i z_2 , efekt stabilizacji był jak najlepszy w sensie przyjętego wskaźnika jakości 1.6.

Implementacja

Do doboru nastaw regulatorów wykorzystano funkcję optymalizującą *fmincon*, dostępną w środowisku *Matlab/Simulink*. Funkcja ta, bazując na modelu obiektu (rys. 1.1), minimalizowała zadany wskaźnik jakości, który w tym przypadku był podany wzorem 1.6.

Na listingu 2.1 zaprezentowano kod funkcji wywoływanej przez procedurę optymalizującą. Aby umożliwić poprawne działanie procedury *fmincon* należało do funkcji wywołującej model Simulika dodać linijkę

$$opt = simset('SrcWorkspace','Current');$$

Dzięki wywołaniu tej instrukcji optymalizacja korzystała ze zmiennych lokalnego workspace'a, co umożliwiło uruchamianie modelu dla kolejnych zbiorów parametrów.

Listing 2.1: Funkcja wywoływana przez procedurę optymalizującą.

```
1 function wsk = cel( par )
2
3     global Kr Kw1 Tw2 Kw2 To Ko z1 z2 r tau limit1 limit2
4         limit3
5     P1 = par(1);
6     D1 = par(2);
7     P2 = par(3);
8     D2 = par(4);
9     P3 = par(5);
10    I3 = par(6);
11    Kr = par(7);
12
13    opt = simset( 'SrcWorkspace', 'Current' );
14    sim( 'model', 50, opt )
15
16    wsk = J;
```

Kod procedury odpowiedzialnej za przeprowadzenie całego procesu optymalizacji znajduje się na listingu 2.2

Listing 2.2: Procedura optymalizacji

```
1 clear all
2 close all
3
4
5 global Kr Kw1 Tw2 Kw2 To Ko z1 z2 r tau limit1 limit2 limit3
6
7 % Wartosci poczatkowe parametrow regulatorow
8 P1 = 0.01;
9 D1 = 0.5;
10
11 P2 = 1;
12 D2 = 0.5;
13
14 P3 = 1;
15 I3 = 0.01;
16
17 P4 = 1;
18
19 Kr = 1.3;
20
21 % Parametry obiektu
22 Kw1 = 10;
23
24 Tw2 = .1;
25 Kw2 = 5;
26 To = 1;
27 Ko = 10;
28
29 tau = 1;
30 limit1 = 20;
31 limit3 = 40;
32 limit2 = 40;
33
34 % Wartosci zadane
35 zad = [5 10 20 50 70];
36
37
38 X0 = [P1 D1 P2 D2 P3 I3 Kr];
39 A = -eye(7);
40 B = zeros(7,1);
41 LB = [0 0 0 0 0 0 0];
```

```

42 UB = [1e5 1e5 1e5 1e5 1e5 1e5 1e5];
43
44 options = optimoptions('fmincon','Display','iter','MaxIterations',
    ,100);
45
46 zad = [5 10 20 50 70];
47
48 Parametry = [];
49 for i = 1:5
50     f = inf;
51     par = [];
52     r = zad(i);
53     [par f] = fmincon(@cel, X0, A, B,[],[],LB,UB,[], options)
54 end
55
56 Parametry(i,:) = par;
57 end

```


Optymalizacja

3.1 Wprowadzenie

Do optymalizacji nastaw regulatorów wykorzystano skrypty zawarte w rozdziale 2. Badania przeprowadzone zostały dla zestawu parametrów obiektu zaprezentowanego w tabeli 3.1. Rząd obiektu jak i wartość zadana były zmiennymi parametrami o następujących wartościach:

$n \in \{1, 2, 3\}$ - rząd obiektu,

$z \in \{5, 10, 20, 50, 70\}$ - wartość zadana

Tabela 3.1: Zestawy parametrów dla których przeprowadzano optymalizację nastaw regulatorów.

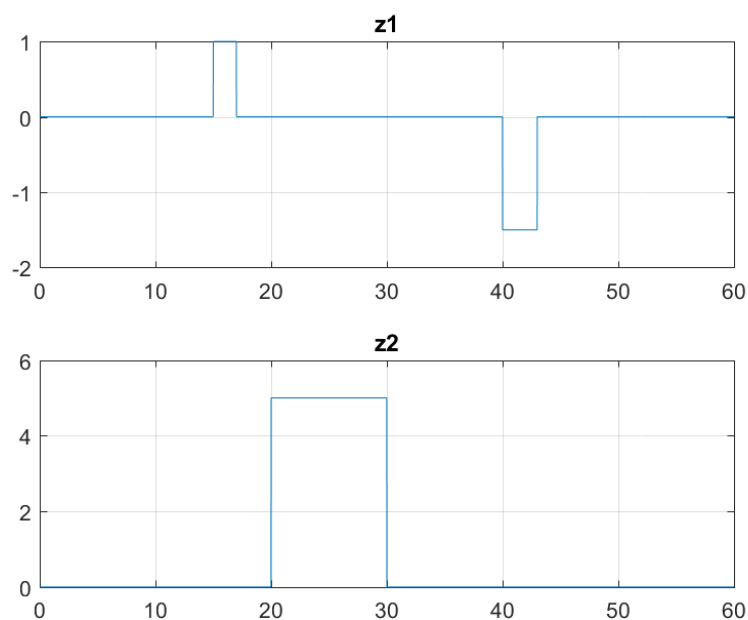
Parametr	Wartość
K_{w1}	10
K_{w2}	5
T_{w2}	0.1
T_0	1
K_0	10
τ	1

3.2 Optymalizacja nastaw regulatorów

Dla kolejnych zestawów parametrów opisujących system przeprowadzano procedurę optymalizacji nastaw regulatorów minimalizując wskaźnik jakości opisany zależnością 1.6. Proces optymalizacji przeprowadzany był dla różnych wartości zadanych w obecności znanego zakłócenia z_2 (zakłócenie skokowo zmieniające swoją wartość) oraz nieznanego zakłócenia z_1 . Przebiegi owych zakłóceń przedstawiono na rysunku 3.1.

Dla przedstawionych powyżej przebiegów zakłóceń przeprowadzono optymalizację a otrzymane nastawy dla poszczególnych obiektów zamieszczono w tabelach 3.2 - 3.4.

W tabeli 3.5 przedstawiono wartości wskaźnika jakości dla wszystkich przeprowadzonych symulacji.



Rys. 3.1: Zakłócenia.

Tabela 3.2: Parametry regulatorów dla obiektu pierwszego rzędu.

Parametr regulatora\ Wart. zadana	$P1$	$D1$	$P2$	$D2$	$P3$	$I3$	Kr
5	0,1583	0,0000	0,3902	503,9885	0,0565	0,0393	1,3697
10	0,0875	0,0245	0,2230	0,3092	0,0454	0,0000	0,5617
20	0,1037	45,9950	0,4478	310,6393	0,0336	0,0000	0,5367
50	0,0800	12,6157	0,0000	4,8505	0,0326	0,0164	0,5671
70	0,0571	3,3536	0,0000	213,3236	0,0496	0,0331	0,5549

Tabela 3.3: Parametry regulatorów dla obiektu drugiego rzędu.

Parametr regulatora\ Wart. zadana	$P1$	$D1$	$P2$	$D2$	$P3$	$I3$	Kr
5	0,1036	0,3042	0,5315	73,9744	0,0442	0,0000	0,5367
10	0,1037	0,7795	0,5391	1,5989	0,0353	0,0000	0,5367
20	0,1031	17,033	0,5250	0,2906	0,0238	0,0000	0,5390
50	0,0800	0,1205	0,3564	37,7697	0,0509	0,0112	0,5420
70	0,0571	728,1221	0,2330	18,4368	0,0475	0,0222	0,5378

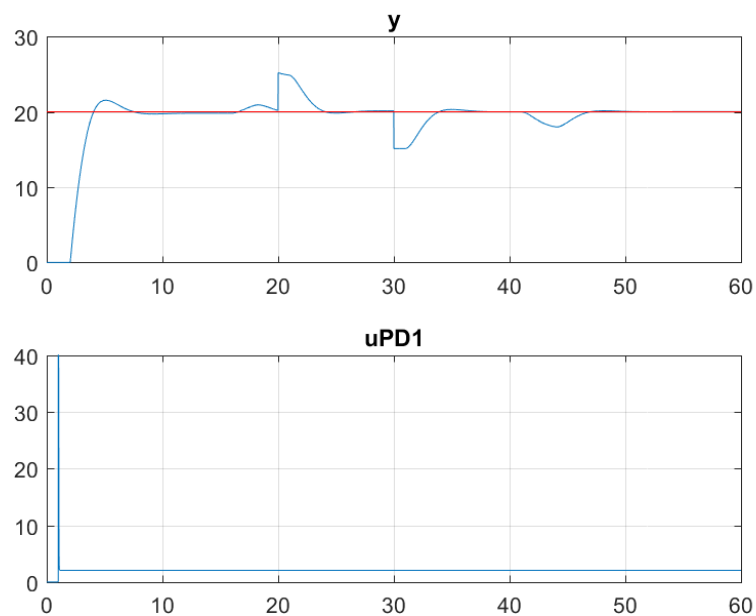
Tabela 3.4: Parametry regulatorów dla obiektu trzeciego rzędu.

Parametr regulatora\ Wart. zadana	$P1$	$D1$	$P2$	$D2$	$P3$	$I3$	Kr
5	0,1800	0,1319	1106,0058	0,4266	0,0143	0,0000	1,2768
10	0,1017	0,9193	0,4593	0,1072	0,0345	0,0000	0,5416
20	0,1026	3,2520	0,4596	123,9292	0,0283	0,0000	0,5438
50	0,0800	7164,0578	0,3120	6756,3846	0,0303	0,0084	0,5445
70	0,0571	29629,2945	0,1710	400,4956	0,0414	0,0153	0,5448

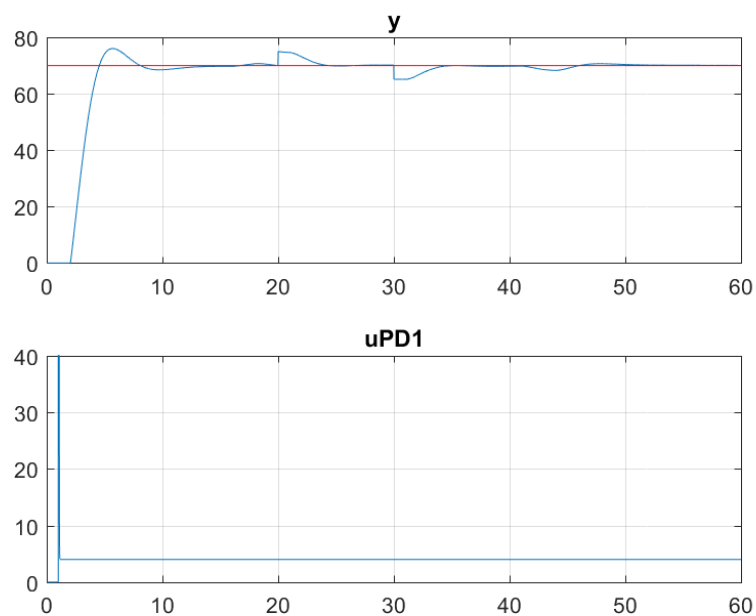
Tabela 3.5: Wartości wskaźnika jakości dla różnych wartości zadanych i różnych zestawów parametrów opisujących system.

Nr zestawu\ Wart. zadana	1	2	3
5	33,0087	43,1130	54,9063
10	38,7111	52,7556	70,6049
20	64,0122	71,5313	100,7350
50	94,3375	158,9382	195,2509
70	131,8947	198,0144	272,9748

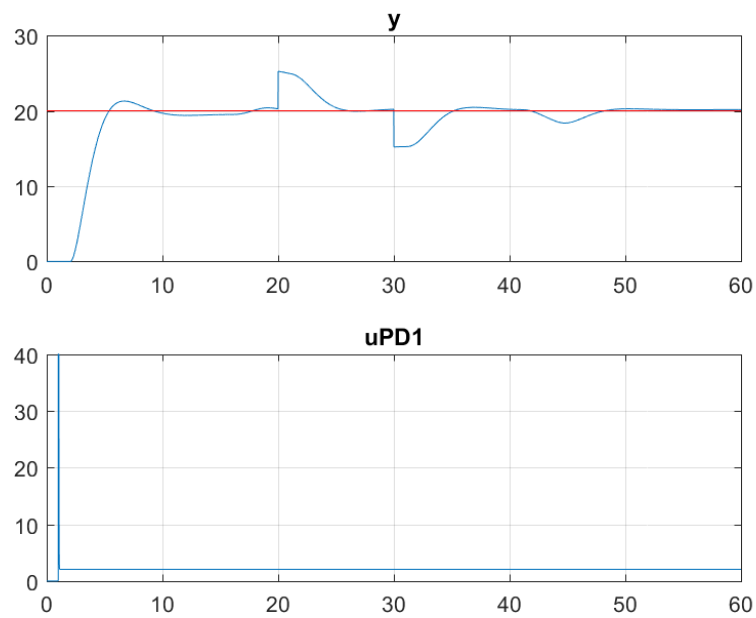
Na rysunkach 3.2 - 3.5 przedstawiono przykładowe przebiegi zawierające odpowiedzi obiektów dla różnych wartości zadanych.



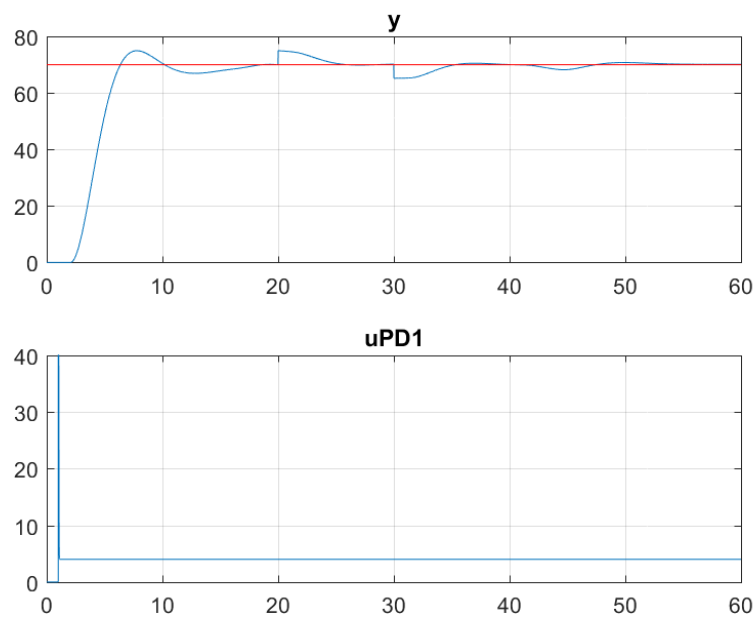
Rys. 3.2: Odpowiedź obiektu drugiego rzędu, $r = 20$



Rys. 3.3: Odpowiedź obiektu drugiego rzędu, $r = 70$



Rys. 3.4: Odpowiedź obiektu trzeciego rzędu, $r = 20$



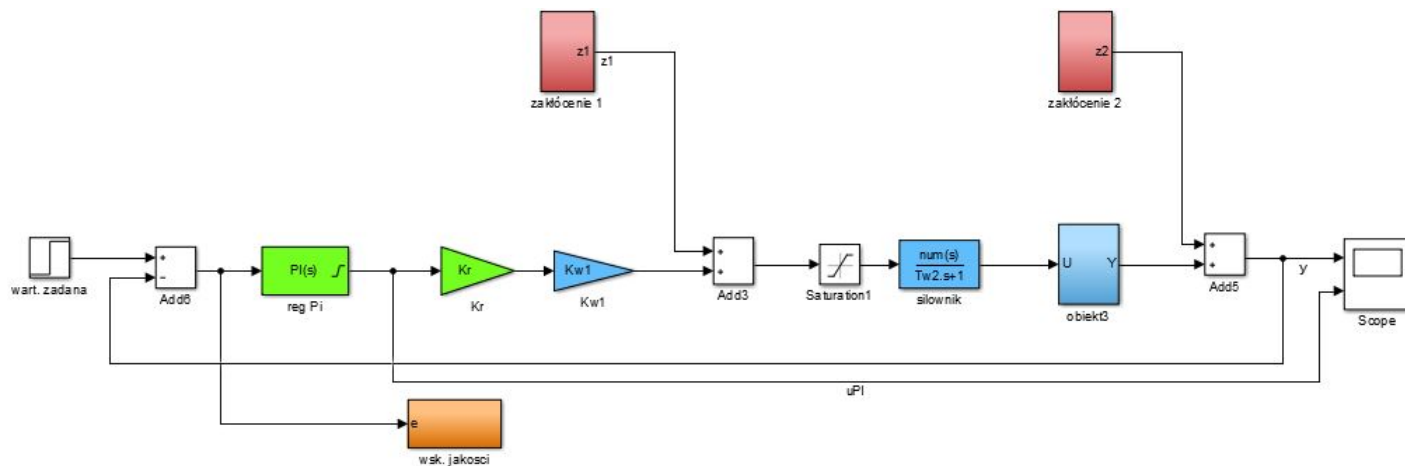
Rys. 3.5: Odpowiedź obiektu trzeciego rzędu, $r = 70$

Weryfikacja przyjętej struktury regulatora

Chcąc sprawdzić jaki wpływ na działanie całego układu mają wprowadzone dodatkowe regulatory *feedforward* przeprowadzono analogiczne badania symulacyjne dla układu zaprezentowanego na rysunku 4.1. Na potrzeby symulacji przyjęto, że obiekt sterowania będzie drugiego rzędu.

W tym przypadku skupiono się głównie na analizie działania układu w następujących przypadkach:

1. stabilizacja układu na poziomie 20 bez zakłóceń,
2. działanie regulatora w sytuacji występowania zakłócenia z_2 ,
3. działanie regulatora przy aktywnym zakłóceniu z_1 ,
4. zachowanie się systemu w przypadku gdy oba zakłócenia są aktywne.



Rys. 4.1: Podstawowy model układu sterowania

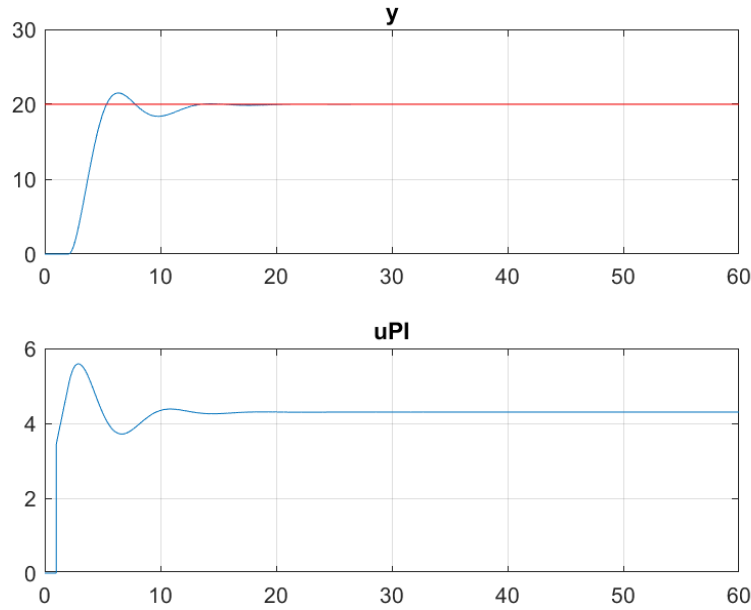
Do optymalizacji zostały wykorzystane skrypty zamieszczone w rozdziale 2.

Niestety procedura optymalizacji nie potrafiła znaleźć optymalnych nastaw regulatorów dla przypadku gdy oba zakłócenia były aktywne. W tabeli 4.1 zamieszczono wartości wskaźników jakości dla każdego z przypadków.

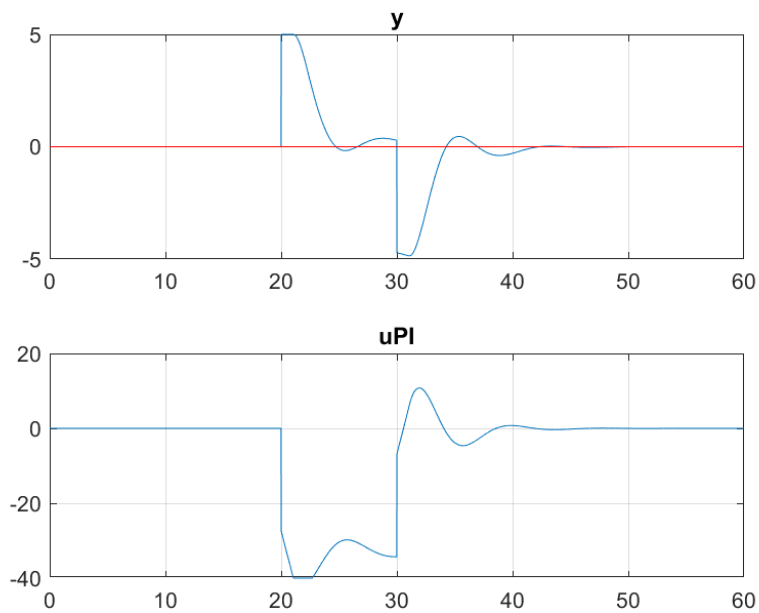
Jak można zauważyć na rysunku 4.2 klasyczny regulator PI bardzo dobrze poradził sobie z zadaniem stabilizacji na poziomie 20 bez obecność zakłóceń. W przypadku aktywacji zakłócenia z_2 - rysunek 4.3, klasyczne podejście także poradziło sobie ze zniwelowaniem niepożądanego sygnału. Dla aktywnego zakłócenia z_1 pojedynczy regulator PI również spełnił swoje zadanie, jednak nasycanie się sygnału sterującego (rysunek 4.4) może zwiastować problemy ze stabilizacją dla zakłócenia o większej amplitudzie i dłuższym czasie działania.

Tabela 4.1: Wartości nastaw regulatorów oraz wskaźnika jakości dla różnych wartości zadanych i różnych zestawów zakłóceń.

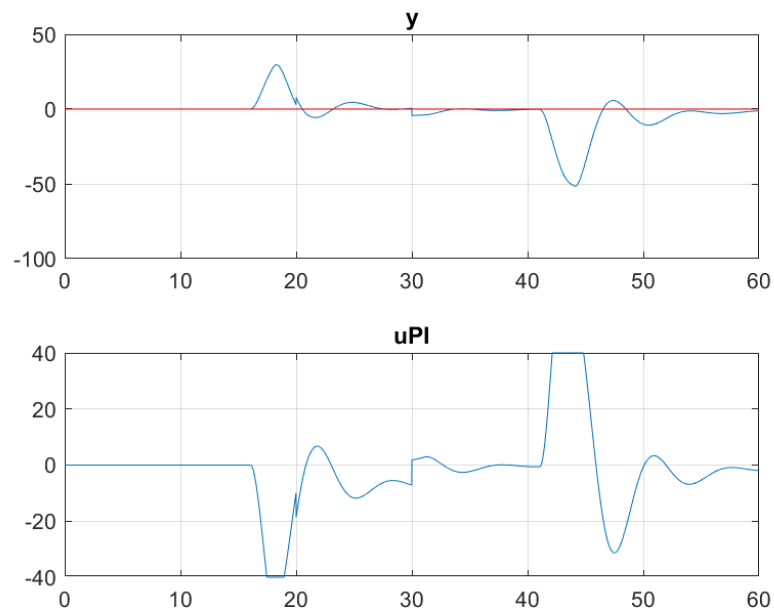
r	z1	z2	P3	I3	Kr	J
20	Nieaktywne	Nieaktywne	0,172	0,074	0,0093	62,927
0	Nieaktywne	Aktywne	5,481	2,381	0,0003	30,538
0	Aktywne	Nieaktywne	1,798	0,395	0,0012	309,038



Rys. 4.2: Odpowiedź obiektu drugiego rzędu bez regulatora feedforward, $r = 20$



Rys. 4.3: Odpowiedź obiektu drugiego rzędu bez regulatora feedforward, $r = 0$, aktywne zakłócenie z_2



Rys. 4.4: Odpowiedź obiektu drugiego rzędu bez regulatora feedforward, $r = 0$, aktywne zakłócenie z_1

Wnioski

Biorąc po uwagę zamieszczone przebiegi odpowiedzi obiektu dla znalezionych nastaw regulatora rys. 3.2 - 3.5 można wysnuć wniosek, że część różniczkująca w regulatorze PD_1 ma pomijalnie mały wpływ na dynamikę układu. Związane jest to z tym, że generuje ona sterowanie tylko w przypadku zmiany wartości zadanej. Dodatkowo, sterowanie to ma postać pojedynczej szpilki, która nie wpływa na działanie obiektu biorąc pod uwagę jego dużą inercję. Dużo większy wpływ na obiekt ma za to część proporcjonalna wspomnianego regulatora. Generuje ona bowiem natychmiastową poprawkę sterowania w zależności od aktualnej wartości zadanej. Działanie to poprawia dynamikę układu regulującego, który bazując tylko na regulatorze PI , potrzebowałby więcej czasu na korekcję sygnału sterującego (czas potrzebny na redukcję całki).

Analizując wartości wzmocnienia części całkującej w tabelach 3.2 - 3.4 można stwierdzić, że regulator PI mógłby zostać z powodzeniem zastąpiony regulatorem proporcjonalnym dla wartości zadanej przyjmującej wartości 5, 10, 20. Zwiększenie członu całkującego w tych przypadkach skutkowało pojawieniem się znacznego przeregulowania i w konsekwencji oscylacji w odpowiedzi obiektu. Wpływ na takie zachowanie obiektu miało także wprowadzenie saturacji na sygnały wyjściowe z regulatorów i urządzenia wykonawczego. W procesie optymalizacji próbowano ograniczyć oscylacje poprzez wprowadzenie filtru *wind-up* w postaci korekcji wstecznej członu całkującego.

Z zamieszczonych przebiegów odpowiedzi obiektu rys. 3.2 - 3.5 wynika, że zaproponowana struktura eliminacji wpływu zakłóceń na działanie całego systemu przyniosła zamierzony efekt. Dodatkowa pętla sprzężenia wokół urządzenia wykonawczego w zadawalający sposób kompensowała zakłócenie z_1 . Dodatkowy regulator PD_2 operujący na wartości zakłócenia z_2 natychmiast niwelował jego wpływ na wartość sygnału wyjściowego, co można zaobserwować na załączonych wykresach - po jednej sekundzie (opóźnienie czasowe obiektu) wyjście obiektu było sprowadzane do zadanego poziomu.

Badania porównawcze opisane w rozdziale 4 okazały się być cennym doświadczeniem. Przeprowadzenie procedury optymalizacji dla pojedynczego regulatora PI pokazało, że o ile klasyczny układ regulacji zaprezentowany na rysunku 4.1 mógłby z powodzeniem zastąpić analizowany system w przypadku występowania pojedynczych zakłóceń, to w sytuacji gdy aktywne są oba zakłócenia konieczne jest wprowadzenie dodatkowych regulatorów do systemu. Podsumowując, cel niniejszego projektu, którym było dobranie nastaw regulatorów w zależności do postaci obiektu i wartości zadanej, został zrealizowany. Jednak biorąc po uwagę wnioski zawarte w powyższych akapitach można przypuszczać, że zastąpienie regulatorów PI i PD_1 regulatorami proporcjonalnymi nie powinno znacząco pogorszyć działania całego układu. Operacja ta uprościłaby za to cały proces strojenia.

Bibliografia

- [1] Witold Byrski, *Obserwacja i sterowanie w systemach dynamicznych*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2007.
- [2] <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>, MathWorks