

# Sterowanie adaptacyjne i estymacja

Maciej Cebula  
Kajetan Piertusa  
Daniel Rubak

Kraków, 2017

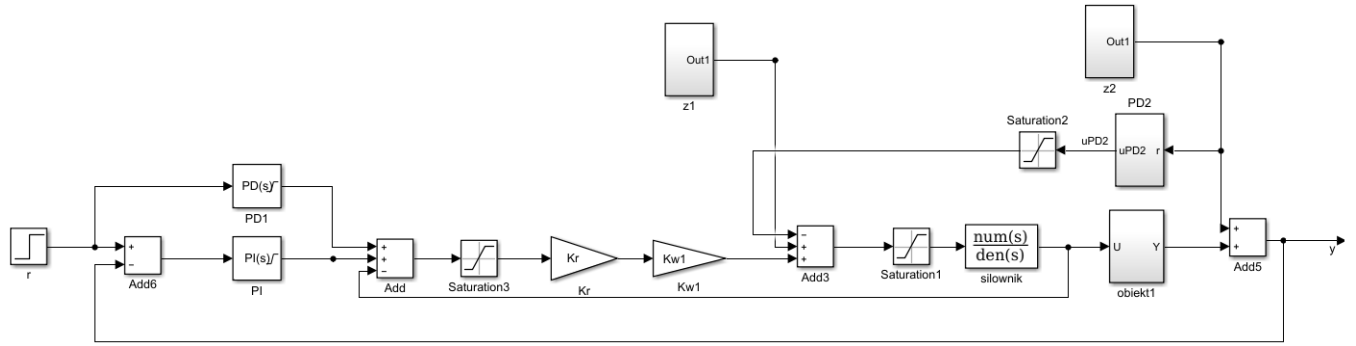
# Spis treści

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Wstęp                                      | 2  |
| 1.1   | Cel zajęć . . . . .                        | 2  |
| 1.2   | Model obiektu . . . . .                    | 2  |
| 1.3   | Regulatory . . . . .                       | 2  |
| 2     | Implementacja                              | 4  |
| 3     | Optymalizacja                              | 7  |
| 3.1   | Optymalizacja nastaw regulatora . . . . .  | 7  |
| 3.1.1 | Zestawy parametrów . . . . .               | 7  |
| 3.1.2 | Optymalizacja nastaw regulatorów . . . . . | 7  |
| 4     | Wnioski                                    | 12 |

# 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

Obiektem sterowania był model Strejca, opisany transmitancją:

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

Jest to model nieoscylacyjny składający się z  $n$  obiektów inercyjnych o jednakowych stałych czasowych  $T_0$  oraz członu opóźniającego  $e^{-\tau \cdot s}$ . Na potrzeby niniejszej pracy ograniczono się do obserwacji zachowania modeli rzędu pierwszego, drugiego oraz trzeciego.

## 1.3 Regulatory

Poszczególne regulatory znajdujące się na schemacie 1.1 opisano następującymi wzorami:

$$PD_1 = \alpha_1 + \beta_1 \cdot s \quad (1.2)$$

$$PD_2 = \alpha_2 + \beta_2 \cdot s \quad (1.3)$$

$$PI = \gamma + \frac{\delta}{s} \quad (1.4)$$

Element wykonawczy jest opisany za pomocą zależności:

$$\frac{K_{w2}}{T_w s + T} \quad (1.5)$$

Regulatory  $PD_1$  i  $PD_2$  to regulatory proporcjonalno-różniczkujące o wzmocnieniach  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  oraz czasach różniczkowania  $\beta_1$  i  $\beta_2$ . Regulator  $PI$  to regulator proporcjonalno-całkujący o wzmocnieniu  $\gamma$  i czasie całkowania  $\delta$ . Struktura schematu posiada sprzężenie do przodu (*feedforward*) w postaci regulatora  $PD_1$ , które ma ogromne znaczenie przy budowie uniwersalnego schematu regulacji. Pozwala to stworzyć szybki układ nadążający. Zastosowanie regulatora  $PI$  miało na celu eliminację wolnozmiennych zakłóceń, a tym samym osiągnięcie zerowego uchybu ustalonego, co nie jest możliwe w regulatorach typu  $P$  lub  $PD$ . Zadaniem regulatorów  $PD$  było przeciwdziałanie szybkim zmianom sygnału błędu i zabezpieczanie przed powstaniem zbyt dużej amplitudy oscylacji sygnału wykonawczego uchybu.

Wartości parametrów  $K_{w1}$ ,  $K_{w2}$ ,  $T_w$ ,  $K_0$  potraktowano jako zadane. Przyjęto, iż testy zostaną przeprowadzone dla wartości zadanej  $r$  dla pięciu różnych poziomów zmieniających się w zakresie  $5 - 70^\circ C$ . Zakłóceniem  $z_1$  był niemierzalny skok  $1(t)$ , natomiast  $z_2$  było mierzalnym skokiem  $1(t)$ .

W ramach projektu należało przeprowadzić optymalizację poszczególnych parametrów podanych powyżej regulatorów, tj.  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ . 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.

# Implementacja

Do dobrania 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.

```
function wsk = cel( par )

    global Kr Kw1 Tw2 Kw2 To Ko z1 z2 r tau limit1 limit2 limit3
    P1 = par(1);
    D1 = par(2);
    P2 = par(3);
    D2 = par(4);
    P3 = par(5);
    I3 = par(6);
    Kr = par(7);

    opt = simset( 'SrcWorkspace' , 'Current' );
    sim( 'model' , 50 , opt )

    wsk = J;
end
```

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

Listing 2.2: Procedura optymalizacji

```
clear all
close all

global Kr Kw1 Tw2 Kw2 To Ko z1 z2 r tau limit1 limit2 limit3

% Wartosci poczatkowe parametrow regulatorow
P1 = 0.01;
D1 = 0.5;

P2 = 1;
D2 = 0.5;

P3 = 1;
I3 = 0.01;

P4 = 1;

Kr = 1.3;

% Parametry obiektu
Kw1 = 10;

Tw2 = .1;
Kw2 = 5;
To = 1;
Ko = 10;

tau = 1;
limit1 = 20;
limit3 = 40;
limit2 = 40;

% Wartosci zadane
zad = [5 10 20 50 70];

X0 = [P1 D1 P2 D2 P3 I3 Kr];
A = -eye(7);
B = zeros(7,1);
LB = [0 0 0 0 0 0 0];
```

```

UB = [1e5 1e5 1e5 1e5 1e5 1e5 1e5];

options = optimoptions('fmincon','Display','iter','MaxIterations',100);

zad = [5 10 20 50 70];

Parametry = [];
for i = 1:5
    f = inf;
    par = [];
    r = zad(i);
    [par f] = fmincon(@cel, X0, A, B,[],[],LB,UB,[],options)
end

Parametry(i,:) = par;
end

```

# Optymalizacja

## 3.1 Optymalizacja nastaw regulatora

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 były zmiennymi parametrami i odpowiednio wartości:

$n \in \{1, 2, 3\}$  - rząd obiektu,

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

### 3.1.1 Zestawy parametrów

W tabeli 3.1 zamieszczono przyjęte wartości parametrów opisujących obiekt regulacji.

### 3.1.2 Optymalizacja nastaw regulatorów

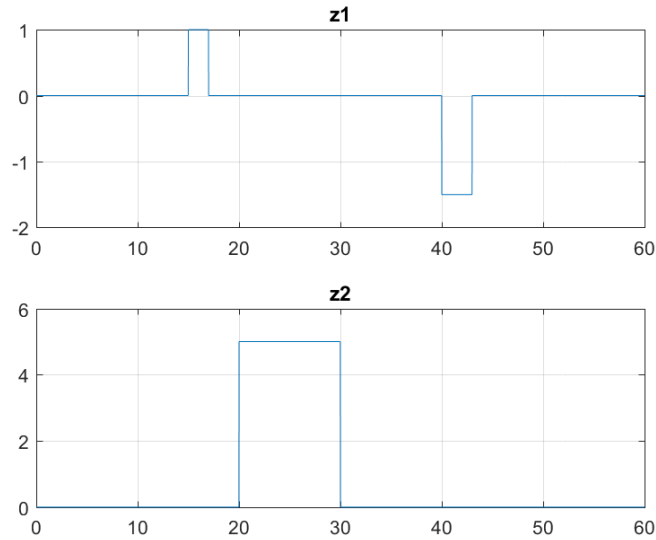
Dla kolejnych zestawów parametrów opisujących system przeprowadzano procedurę optymalizacji nastaw regulatorów minimalizując wskaźnik jakości opisany zależnością 1.6. Proces optymalizacji przeprowadzany był dla różnych wartości zadanych w obecności znanego zakłócenia  $z_2$  (zakłócenie skokowo zmieniające 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.

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      |
| $\tau$   | 1       |





Rys. 3.1: Zakłócenia.

Tabela 3.2: Parametry regulatorów dla obiektu pierwszego rzędu.

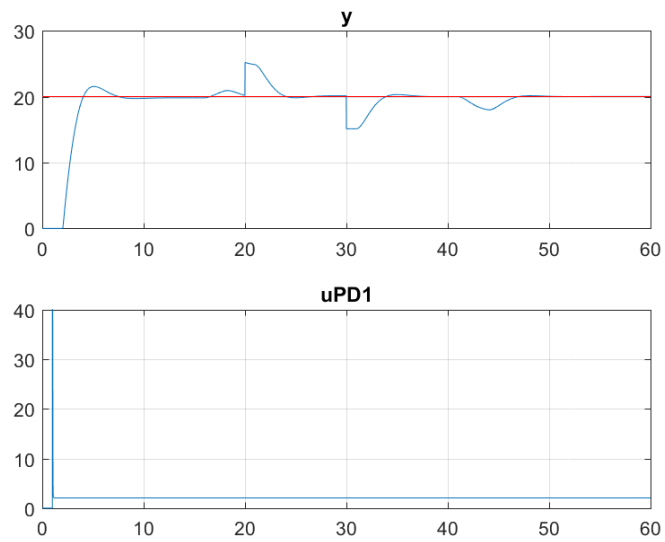
| Parametr regulatora\<br>Wart. zadana | $P1$   | $D1$    | $P2$   | $D2$     | $P3$   | $I3$   | $Kr$   |
|--------------------------------------|--------|---------|--------|----------|--------|--------|--------|
| 5                                    | 0,1583 | 0,0000  | 0,3902 | 503,9885 | 0,0565 | 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.

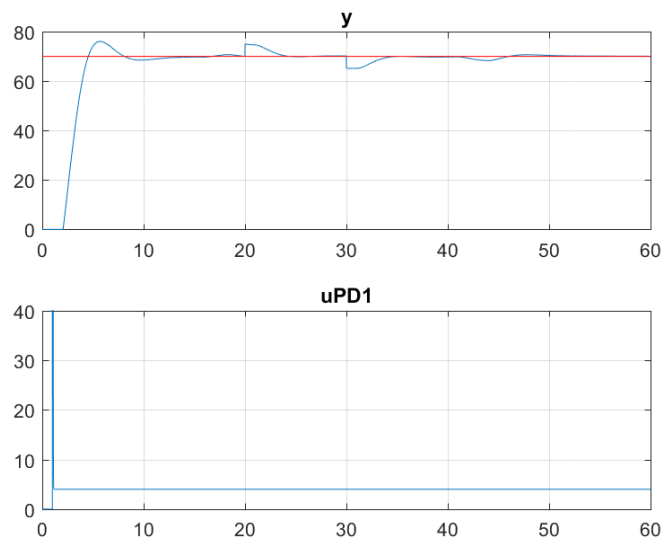
| Parametr regulatora\<br>Wart. zadana | $P1$   | $D1$     | $P2$   | $D2$    | $P3$   | $I3$   | $Kr$   |
|--------------------------------------|--------|----------|--------|---------|--------|--------|--------|
| 5                                    | 0,1036 | 0,3042   | 0,5315 | 73,9744 | 0,0442 | 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 |

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

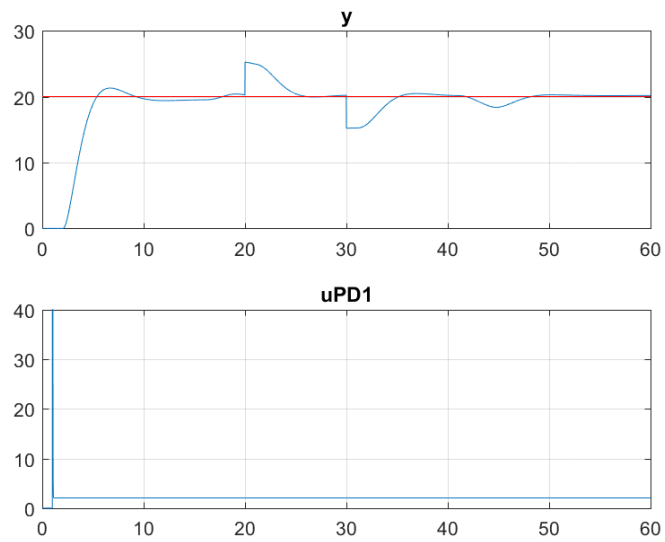
Na rysunkach 3.2 - 3.5 przedstawiono przykładowe przebiegi zawierające odpowiedzi obiektów dla różnych wartości zadanych.



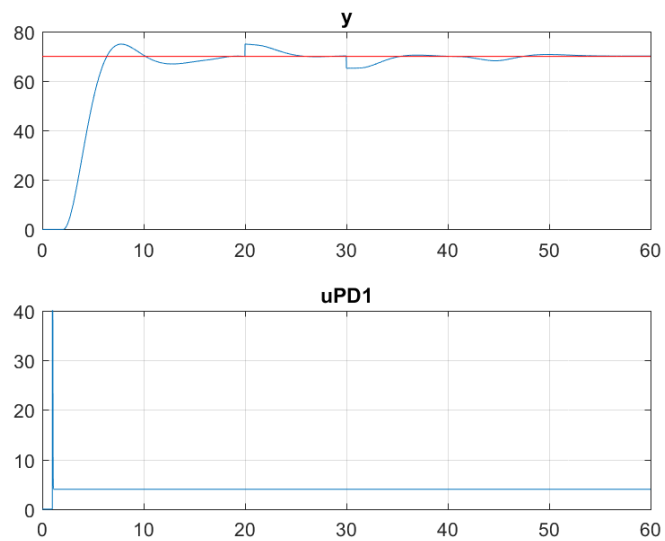
Rys. 3.2: Odpowiedź obiektu drugiego rzędu,  $r = 20$



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,  $r = 70$

Tabela 3.4: Parametry regulatorów dla obiektu trzeciego rzędu.

| Parametr regulatora\<br>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\<br>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 |

# Wnioski

Zamodelowano nieznany układ opisany modelem Strejca pierwszego, drugiego oraz trzeciego rzędu, a następnie przeprowadzono optymalizację nastaw regulatorów w obecności dwóch zakłóceń - jednego mierzalnego, drugiego niemierzalnego. Model odwzorowywał układ grzewczy, na wejście którego podawana była pewna temperatura mająca się utrzymać na jego wyjściu. Zastosowanie regulatora typu *feedforward* ( $PD_1$ ) pozwoliło stworzyć szybki układ nadążający o dużej dokładności. Dla tego regulatora im mniejszy rząd modelu tym mniejsze przeregulowania. Wartości wskaźnika jakości rosną wraz ze wzrostem wartości zadanej oraz rzędu modelu, jednak ich stosunek w obrębie jednego rzędu jest podobny, co wskazuje na znalezienie optymalnych nastaw dla każdego zestawu parametrów. Część całkująca regulatora proporcjonalno-całkującego  $PI$  działa jedynie dla dużych wartości zadanych, co jest związane z dużą stałą czasową. Zastosowanie regulatora proporcjonalnego  $P$  w tym miejscu w większości przypadków byłoby wystarczające. Regulator ten odpowiada na znane zakłócenia, dzięki czemu można go łatwo nastroić oraz uprościć jego budowę, co zmniejszyłoby koszt całej instalacji. Jak łatwo zauważyć na podstawie wykresów, cel zadania został osiągnięty z satysfakcjonującym wynikiem. Układ szybko reaguje zarówno na znane, jak i nieznane zakłócenia, a tworzące się przeregulowania są niewielkie i nie wpływają znacząco na działanie całego układu.

# Bibliografia

- [1] Witold Byrski, Obserwacja i sterowanie w systemach dynamicznych. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2007.